

**Фрэнк Вильчек**

ЛАУРЕАТ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ ПО ФИЗИКЕ

# красота физики

постигая  
устройство  
природы



Династия

## Annotation

Верно ли, что красота правит миром? Этим вопросом на протяжении всей истории человечества задавались и мыслители, и художники, и ученые. На страницах великолепно иллюстрированной книги своими размышлениями о красоте Вселенной и научных идей делится Нобелевский лауреат Фрэнк Вильчек. Шаг за шагом, начиная с представлений греческих философов и заканчивая современной главной теорией объединения взаимодействий и направлениями ее вероятного развития, автор показывает лежащие в основе физических концепций идеи красоты и симметрии. Герои его исследования – и Пифагор, и Платон, и Ньютон, и Максвелл, и Эйнштейн. Наконец, это Эмми Нётер, которая вывела из симметрий законы сохранения, и великая плеяда физиков XX в. В отличие от многих популяризаторов, Фрэнк Вильчек не боится формул и умеет «на пальцах» показать самые сложные вещи, заражая нас юмором и ощущением чуда.

---

- [Фрэнк Вильчек](#)
  - 
  - 
  - 
  - [Руководство пользователя](#)
  - [Вопрос](#)
    - 
    - [Духовная космология](#)
    - [Героические приключения](#)
    - [Квантовое завершение](#)
    - [Разновидности красоты](#)
    - [Понятия и реальности; Разум и материя](#)
    - [Новые идеи и интерпретации](#)
  - [Пифагор I: Мысль и объект](#)
    - [Эфемерный Пифагор](#)
    - [Настоящий Пифагор](#)
    - [«Число есть сущность всех вещей»](#)
    - [Теорема Пифагора](#)
      - 
      - [Доказательство Гвидо](#)
      - [Забава Гвидо](#)

- [Доказательство Эйнштейна \(?\)](#)
    - [Отполированная драгоценность](#)
    - [Прекрасная насмешка](#)
  - [Мысль и объект](#)
- [Пифагор II: Число и гармония](#)
  - 
  - [Гармония, число и длина: поразительная связь](#)
  - [Гармония, число и вес: поразительная связь](#)
  - [Открытия и мировоззрение](#)
  - [Послание – в частоте](#)
  - [Теория гармонии](#)
- [Платон I: Структура из симметрии – платоновы тела](#)
  - 
  - [Правильные многоугольники](#)
  - [Платоновы тела](#)
    - 
    - [Предыстория](#)
    - [Вдохновляющая идея Евклида](#)
    - [Платоновы тела как атомы](#)
    - [Структура из симметрии](#)
    - [Экономия средств](#)
    - [Молодой Кеплер и музыка сфер](#)
  - [Глубокие истины](#)
    - 
    - [Тайная вечеря Дали](#)
- [Платон II: Выйти из Пещеры](#)
  - 
  - [Аллегория Пещеры](#)
    - 
    - [Видение вечности. Парадокс состояния покоя](#)
    - [Идеал](#)
    - [Освобождение](#)
    - [Избавление от проекции: глядя вперед](#)
  - [Поворот к оторванности от мира](#)
    - 
    - [Два вида астрономии](#)
  - [Объективная субъективность: проективная геометрия](#)
    - 
    - [Вопросы перспективы: относительность, симметрия,](#)

инвариантность, дополнительность

- Ньютон I: Метод и сумасшествие
  - 
  - Анализ и Синтез
    - 
    - Требуемая точность
    - Вращивание амбиций
    - Смотреть везде
  - Наброски биографии
- Ньютон II: Цвет
  - 
  - Получение чистого света
    - 
    - Химия света
    - Выгода от анализа
- Ньютон III: динамическая красота
  - 
  - Противопоставление Земли и космоса
  - Гора Ньютона
    - 
    - Время как измерение
    - Анализ движения
    - Анаграмма Ньютона
    - Система мира
  - Динамическая красота
    - 
    - Упрощение способствует росту
    - Начиная действовать
- Максвелл I: Эстетика Бога
  - 
  - Атомы и пустота
    - 
    - Не пустить пустоту
  - Дорога к уравнениям Максвелла
    - 
    - Человек-паук
  - Уравнения Максвелла
    - 
    - Вознесение Максвелла

- [«Умнее нас»](#)
  - [Сила](#)
  - [Созидательная красота](#)
  - [Симметрия уравнений](#)
- [Максвелл II: Двери восприятия](#)
  - 
  - [Два вида желтого](#)
  - [Цветные волчки и цветные коробки](#)
    - 
    - [Реализация идей](#)
  - [Утерянные бесконечности](#)
    - 
    - [Сырье: электромагнитные волны](#)
    - [И снова очищенный свет](#)
  - [Цвет, время и скрытые измерения](#)
    - 
    - [Рецепторы света](#)
    - [Разновидности цветового зрения](#)
    - [Восприятие пространства и восприятие времени](#)
  - [Открывая двери](#)
    - 
    - [Время и цветовая слепота](#)
    - [Пути и средства](#)
  - [«Для чего это?»](#)
    - 
    - [Смерть и жизнь](#)
- [Прелюдия к симметрии](#)
  - 
  - [Путешествие с Галилеем](#)
- [Квантовая красота I: Музыка сфер](#)
  - 
  - [Назад к Пифагору](#)
    - 
    - [Система йоги музыкальных инструментов](#)
    - [Естественные колебания и резонансные частоты](#)
    - [Упущенная возможность](#)
  - [Музыка сфер: на этот раз по-настоящему](#)
    - 
    - [Скандалные гипотезы](#)

- [«Высшая форма музыкальности»](#)
- [Новая квантовая теория: атомы как музыкальные инструменты](#)
  - 
  - [Что такое квантовая теория?](#)
  - [Волновые функции, облака вероятности и дополнительность](#)
  - [Стационарные состояния как собственные колебания](#)
  - [Холодная, строгая и блистательная](#)
  - [Атомы ручной работы](#)
- [Назад к Платону](#)
- [Красота ограничения](#)
  - 
  - [Атомы против солнечных систем](#)
- [Изображение и вдохновение](#)
- [Симметрия I: два шага Эйнштейна](#)
  - 
  - [Таинственное происхождение](#)
  - [Специальная теория относительности: Галилей и Максвелл](#)
  - [Две поэмы в свете](#)
    - [Слагая радугу вновь](#)
    - [Оживляя цвет](#)
  - [Общая теория относительности: локальность, анаморфизм и флюиды в их основе](#)
- [Квантовая красота II: Процветание](#)
  - 
  - [Чего хотят электроны?](#)
    - [Чего хотят электроны?](#)
  - [Углерод!](#)
    - 
    - [Атом углерода, по одному за раз](#)
    - [Атомы углерода в связках](#)
    - [Алмаз \(трехмерная симметрия\)](#)
    - [Графен \(двумерная симметрия\) и графит \(2 + 1\)](#)
    - [Нанотрубки \(одномерная симметрия\)](#)
    - [Бакибол \(нульмерная симметрия\)](#)
- [Симметрия II: Локальный цвет](#)
  - 
  - [Анахромия](#)

- [Ответ на наш Вопрос](#)
- [Квантовая красота III: Красота в основе природы](#)
  - 
  - [Приближение к основам](#)
  - [Часть 1. Дух главной теории](#)
    - [Пространства свойств](#)
    - [Инь и ян, четыре раза подряд](#)
      - 
      - [Геометрическая мантра](#)
      - [Инь-ян](#)
      - [Мантра потока](#)
    - [Воплощения локальной симметрии](#)
    - [Где определяет что](#)
  - [Часть 2. Сильное взаимодействие более конкретно](#)
    - [Открывая атомные ядра](#)
    - [Кварковая модель](#)
    - [Прорыв: квантовая хромодинамика](#)
      - 
      - [«Максвелл на стероидах»](#)
      - [Странная действительность кварков и глюонов](#)
      - [Самоклеющийся клей](#)
    - [Подарки понимания](#)
      - 
      - [Рычаг и Дрожь Завесы](#)
      - [Новый вид физики](#)
  - [Часть 3: Слабое взаимодействие](#)
    - 
    - [Основы слабого взаимодействия](#)
    - [Еще один цветной анаморф: от «??» к «!»](#)
    - [Флюид Хиггса, поле Хиггса, частица Хиггса](#)
      - 
      - [Очарованный вечер](#)
  - [Часть 4: Подведение итогов](#)
    - [Перечень взаимодействий и сущностей](#)
    - [Вспомним о семействах](#)
  - [Конец начала](#)
- [Симметрия III: Эмми Нётер – время, энергия и здравомыслие](#)
  - 
  - [Время и энергия](#)

- - [Краткая история энергии](#)
  - [Больше уроков от Нётер](#)
  - [Эмми Нётер собственной персоной](#)
  - [Симметрия, здравомыслие и мировая конструкция](#)
- [Квантовая красота IV: Доверяем красоте](#)
  - [Притча о додекаэдре](#)
  - [Проверка реальностью](#)
    - 
    - [Переосмысление асимптотической свободы](#)
    - [Почти попали](#)
  - [Знакомство с SUSY](#)
    - 
    - [От «не вполне ошибочного» к \(возможно\) правильному](#)
    - [Драгоценный венец?](#)
  - [Доверяем Красоте](#)
    - 
    - [Двойное Благословение](#)
- [Красивый Ответ?](#)
  - 
  - [С небес на землю](#)
  - [Дополнительность как мудрость](#)
- [Благодарности](#)
- [Хронология](#)
  - [I: Доквантовая физика](#)
  - [II: Квантовая физика, симметрия и ядро](#)
- [Термины](#)
- [Примечания](#)
  - [Пифагор II: Число и гармония](#)
  - [Платон I: Структура из симметрии – платоновы тела](#)
  - [Ньютон III: Динамическая красота](#)
  - [Максвелл I: Эстетика Бога](#)
  - [Максвелл II: Двери восприятия](#)
  - [Квантовая красота I: Музыка сфер](#)
  - [Квантовая красота III: Красота в основе Природы](#)
  - [Симметрия III: Эмми Нётер – Время, энергия и здравомыслие](#)
  - [Квантовая красота IV: Доверяем красоте](#)
- [Рекомендованная литература](#)
  -

- [Классика \(доквантовый период\)](#)
- [Немного квантовой теории](#)
- [Современные достижения](#)
- [Иллюстрации](#)
- [Вклейка](#)
  - 
  - [Уравнения Максвелла](#)
  - [Противоречие Максвелла](#)
- [notes](#)
  - [1](#)
  - [2](#)
  - [3](#)
  - [4](#)
  - [5](#)
  - [6](#)
  - [7](#)
  - [8](#)
  - [9](#)
  - [10](#)
  - [11](#)
  - [12](#)
  - [13](#)
  - [14](#)
  - [15](#)
  - [16](#)
  - [17](#)
  - [18](#)
  - [19](#)
  - [20](#)
  - [21](#)
  - [22](#)
  - [23](#)
  - [24](#)
  - [25](#)
  - [26](#)
  - [27](#)
  - [28](#)
  - [29](#)
  - [30](#)

- [31](#)
- [32](#)
- [33](#)
- [34](#)
- [35](#)
- [36](#)
- [37](#)
- [38](#)
- [39](#)
- [40](#)
- [41](#)
- [42](#)
- [43](#)
- [44](#)
- [45](#)
- [46](#)
- [47](#)
- [48](#)
- [49](#)
- [50](#)
- [51](#)
- [52](#)
- [53](#)
- [54](#)
- [55](#)
- [56](#)
- [57](#)
- [58](#)
- [59](#)
- [60](#)
- [61](#)
- [62](#)
- [63](#)
- [64](#)
- [65](#)
- [66](#)
- [67](#)
- [68](#)
- [69](#)

- [70](#)
- [71](#)
- [72](#)
- [73](#)
- [74](#)
- [75](#)
- [76](#)
- [77](#)
- [78](#)
- [79](#)
- [80](#)
- [81](#)
- [82](#)
- [83](#)
- [84](#)
- [85](#)
- [86](#)
- [87](#)
- [88](#)
- [89](#)
- [90](#)
- [91](#)
- [92](#)
- [93](#)
- [94](#)
- [95](#)
- [96](#)
- [97](#)
- [98](#)
- [99](#)
- [100](#)
- [101](#)
- [102](#)
- [103](#)
- [104](#)
- [105](#)
- [106](#)
- [107](#)
- [108](#)

- [109](#)
  - [110](#)
  - [111](#)
  - [112](#)
  - [113](#)
  - [114](#)
  - [115](#)
  - [116](#)
  - [117](#)
  - [118](#)
  - [119](#)
  - [120](#)
  - [121](#)
  - [122](#)
  - [123](#)
  - [124](#)
  - [125](#)
-

# Фрэнк Вильчек

## Красота физики. Постигая устройство природы

Переводчики *Виктория Краснянская, Мария Томс*

Научные редакторы *Андрей Варламов, д. ф.-м. н.; Сергей Парновский, д. ф.-м. н.*

Редактор *Игорь Лисов*

Руководитель проекта *И. Серёгина*

Корректоры *Е. Аксёнова, М. Миловидова*

Компьютерная верстка *А. Фоминов*

Дизайн обложки *Ю. Буга*

© Frank Wilczek, 2015

All rights reserved.

© Издание на русском языке, перевод, оформление. ООО «Альпина нон-фикшн», 2016

*Все права защищены. Произведение предназначено исключительно для частного использования. Никакая часть электронного экземпляра данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, включая размещение в сети Интернет и в корпоративных сетях, для публичного или коллективного использования без письменного разрешения владельца авторских прав. За нарушение авторских прав законодательством предусмотрена выплата компенсации правообладателя в размере до 5 млн. рублей (ст. 49 ЗОАП), а также уголовная ответственность в виде лишения свободы на срок до 6 лет (ст. 146 УК РФ).*

\*\*\*



Эту работу выполнил специально для «Красоты физики» Хэ Шуйфа, современный мастер традиционного китайского искусства и каллиграфии, известный энергией и нежностью своей кисти и духовной глубиной образов природы, цветов и птиц. Перевод надписи звучит примерно так: «Двойная рыбка тайцзи – это сущность китайской культуры. Этот рисунок выполнил Хэ Шуйфа у озера в начале зимы».

Две играющие рыбки символа тайцзи оживают на рисунке Хэ Шуйфа. Инь и ян напоминают двух карпов, играющих вместе, и мы можем видеть их глаза и даже угадать намеки на плавники. В Хэнани, на Желтой реке, есть водопад «Ворота нефритового дракона», или «Юйлун Мэнь». Карпы пытаются перепрыгнуть порог, хотя им это очень трудно сделать, и те, кому удастся, превращаются в счастливых драконов. С некоторой долей юмора мы можем соотнести это событие с превращением виртуальной частицы в реальную. Это очень важный квантовый процесс, который, как мы сейчас полагаем, лежит в основе структуры Вселенной (см. цветные вклейки ХХ и ААА). Мы также можем увидеть в этих карпах себя и в их упорстве – наше стремление к истине и поиск понимания.

*Моей семье и друзьям*

## Руководство пользователя

- «Временные ряды» по большей части концентрируются на событиях, затронутых или упомянутых в книге. Они для того, для чего обычно бывают временные ряды (хронология событий). Они не должны быть и не являются полной историей чего-либо.

- Раздел «Термины» содержит определения, объяснения и обсуждения ключевых терминов и понятий, встречающихся в основном тексте. Как вы можете догадаться по его размеру, это больше, чем просто глоссарий. Он включает альтернативный взгляд на многие идеи в тексте, а некоторые из них развивает в других направлениях.

- Раздел «Примечания» содержит материал, который мог бы в случае научной книги или статьи помещаться в подстрочных примечаниях. Он одновременно уточняет текст и содержит дополнительные технические ссылки по некоторым вопросам. Также в этом разделе вы найдете пару стихотворений.

- Короткий раздел «Рекомендуемая литература» – это не банальный список научно-популярных книг или учебников, а тщательно подобранный набор рекомендаций для дальнейших изысканий в духе книги, с упором на первоисточники.

Я надеюсь, вы уже насладились оформлением обложки и фронтисписом, которые превосходно задают тон нашей медитации.

Также есть «Руководство пользователя», но это вы и так знаете.

## Вопрос

Эта книга – длинная медитация, или размышление, над одним-единственным вопросом:

«Воплощает ли наш мир красивые идеи?»

Наш Вопрос может показаться странным. Идеи – это одно, а физические тела – совсем другое<sup>[1]</sup>. Что значит «воплощать» в применении к «идее»?

Воплощение идей – задача творческих людей. Начиная с призрачных замыслов, художники создают физические объекты (или квазифизические произведения, такие как музыкальные партитуры, которые затем преобразуются в звуки). Значит, наш Вопрос близок к следующему:

«Является ли мир произведением искусства?»

Поставленный таким образом, наш Вопрос приводит нас к другим вопросам. Если мир можно считать произведением искусства, хорошо ли удалось это произведение? Красив ли наш физический мир, если считать его произведением искусства? Для познания нашего физического мира мы призываем на помощь работы ученых, но, чтобы отдать должное нашим вопросам, мы также должны обратиться к проницательности и достижениям художников-импрессионистов.

## Духовная космология

Наш Вопрос выглядит наиболее естественным в рамках духовной космологии. Если сильный и могущественный Творец создал мир, возможно что Им – или Ею, или Ими, или Этим – руководило именно желание создать что-то красивое. Эта идея представляется естественной, но, несомненно, *не* является общепринятой для большинства религиозных традиций. Создателю приписывали множество мотивов, но редко можно заметить среди них творческие амбиции.

В авраамических религиях общепринятой доктриной считается, что Творец намеревался воплотить некоторую смесь добродетели и праведности, а также создать памятник своему великолепию. Анимистические и политеистические религии предусматривают наличие существ и богов, которые создают разные части физического мира и управляют ими по самым разнообразным причинам – от благожелательности до похоти и до беззаботного восторга.

В теологии более высокого уровня иногда говорят, что мотивы Создателя настолько грандиозны, что ограниченный человеческий интеллект не может надеяться их постичь. Вместо этого нам даны частичные откровения, в которые надо верить, а не понимать. Или, возможно, Бог – это Любовь. Ни одна из этих общепринятых теорий, противоречащих друг другу, не предлагает убедительных причин, чтобы ожидать, что мир воплощает красивые идеи; так же они и не предполагают, что нам следует стремиться обнаружить такие идеи. Красота может быть частью их истории создания мира, но обычно это побочная часть вопроса, а не его суть.

Тем не менее многие творческие личности находили вдохновение в идее о том, что Создатель мог быть, кроме всего прочего, художником, чьи эстетические мотивы мы способны понять и разделить, – или даже в дерзком предположении, что Создатель – *главным образом* художник. Такие личности затрагивали наш Вопрос в его разнообразных и меняющихся формах в течение многих веков. Вдохновленные этим, они создали глубокую философию, великие науки, выдающиеся литературные произведения и поразительные скульптуры. Некоторые создали произведения, в которых сочетается несколько перечисленных свойств или даже все. Эти работы – золотая жила, проходящая через всю нашу цивилизацию.

Галилео Галилей положил красоту физического мира в основу своей собственной глубокой веры и всем ее рекомендовал:

Величие и торжество Бога изумительно сияет во всех Его творениях, и именно оно читается прежде всего в раскрытой книге небес.

...И так же поступили Иоганн Кеплер, Исаак Ньютон и Джеймс Клерк Максвелл. Для всех этих исследователей найти красоту, воплощенную в физическом мире, отражающую величие Бога, было целью поисков. Это вдохновляло их работу и освящало их любознательность. И благодаря их открытиям их вера вознаграждалась.

В то время как наш Вопрос находит поддержку в духовной космологии, он заслуживает внимания и сам по себе. И хотя положительный ответ может внушить божественную интерпретацию, она не обязательна.

Мы вернемся к этим мыслям к концу нашей медитации, и к тому времени мы будем гораздо лучше подготовлены, чтобы оценить их. А пока пусть мир говорит сам за себя.

## Героические приключения

Как у искусства, так и у представления о мире как о произведении искусства есть история и развивающиеся стандарты. В истории искусства мы привыкли к идее о том, что уже созданные направления не устаревают: принадлежащие к ним произведения по-прежнему приносят наслаждение, а кроме того, предлагают важный контекст для дальнейшего развития. Хотя эта идея куда менее распространена в науке, где у нее имеются значительные ограничения, исторический подход к нашему Вопросу имеет много преимуществ. Он позволяет нам – более того, заставляет нас – идти от простых идей к более сложным. В то же время, исследуя, как великие мыслители боролись за истину и зачастую сбивались с пути, мы можем понять, как первоначальная «странность» идей стала – через привычку – слишком «очевидной» и удобной. И последнее, хотя ни в коем случае не наименее важное: мы, люди, особенно хорошо приспособлены воспринимать информацию в форме историй и рассказов, ассоциировать идеи с именами и лицами, а также находить захватывающими рассказы о конфликтах и об их разрешении, даже если это конфликт идей и всё обходится без кровопролития. (На самом деле не всегда...)

По этой причине мы для начала споем песнь героям: Пифагору, Платону, Филиппо Брунеллески, Ньютону, Максвеллу. (Далее появится и главная героиня, Эмми Нётер.) Этими именами назывались реально существовавшие – и очень интересные! – люди. Но для нас они не просто люди, но также легенды и символы. Я описал их такими, как я думаю о них, таким образом делая акцент на ясность и простоту в ущерб научной точности в мелочах. Здесь биография – это средство, а не цель. Каждый герой продвигает вперед нашу медитацию на несколько шагов:

- *Пифагор* в своей известной теореме о прямоугольных треугольниках открыл наиболее фундаментальные связи между числами, с одной стороны, и размерами и формами – с другой. Так как Число – это чистейший плод Разума, в то время как Размер – это простейшая характеристика Материи, то это открытие обнаружило скрытое единство между Разумом и Материей.

Пифагор также открыл в законах о струнных инструментах простую и удивительную связь между числами и музыкальной гармонией. Это открытие завершает троицу Разум – Материя – Красота с Числом в роли связующей нити. Впечатляюще! Это привело Пифагора к догадке о том, что «Число есть сущность всех вещей». С этими открытиями

и предположениями наш Вопрос обретает жизнь.

- *Платон* думал грандиозно. Он предложил геометрическую теорию атомов и Вселенной, основанную на пяти симметричных формах, которые мы сегодня называем платоновыми телами. В своей дерзкой модели физической реальности Платон больше ценил красоту, чем точность. Подробности его теории были безнадежно неверными. И все же она дала увидеть такой ослепительный образ того, каким может быть ответ на наш Вопрос, что это вдохновляло Евклида, Кеплера и многих других на блестящие работы в течение веков спустя. Действительно, наши современные, изумительно успешные теории элементарных частиц, систематизированные в Главной теории (см. ниже), основаны на возвышенных идеях симметрии, которые обязательно заставили бы Платона радостно улыбнуться. И когда я пытаюсь угадать, что же будет дальше, я часто следую стратегии Платона, предлагая объекты, обладающие математической красотой, в качестве моделей Природы.

Платон был также великим писателем. Его метафора Пещеры ухватила суть важных эмоциональных и философских аспектов наших отношений как исследователей с действительностью. В ее основе – вера в то, что повседневная жизнь предлагает нам всего лишь тень реальности, но что через смелость мысли и развитие способности чувствовать мы можем проникнуть в ее суть – и что эта суть яснее и прекраснее, чем ее тень. Он придумал посредника – *демиурга*, что можно перевести как *мастер*, который воплощал мир безупречных, вечных Идей в его несовершенную копию – мир, в котором мы живем. Здесь понятие о мире как о произведении искусства выражено явным образом.

- *Брунеллески* привнес новые идеи в геометрию для нужд искусства и инженерного дела. Его *проективная геометрия*, которая имеет дело с реальным обликом вещей, принесла с собой идеи – об относительности, инвариантности, симметрии – не только красивые сами по себе, но и открывающие новые возможности.

- *Ньютон* вывел математическое понимание Природы на совершенно новый уровень притязаний и точности.

Общая идея пронизывает титаническую работу Ньютона над светом, математическим исчислением, движением и механикой. Это метод, который он называл Анализ и Синтез. Метод анализа и синтеза предлагает двухступенчатую стратегию для достижения понимания. В стадии анализа мы рассматриваем мельчайшие части того, что мы изучаем, – его «атомы» – в метафорическом смысле этого слова. В случае удачного анализа мы определяем малые части с простыми свойствами, которые можно

резюмировать в виде точных законов. Например:

- в изучении света атомы – это лучи чистых спектральных цветов;
- в изучении исчисления атомы – это бесконечно малые и их отношения:
- в изучении движения атомы – это скорость и ускорение;
- в изучении механики атомы – это силы.

(Мы подробнее обсудим все это позже.) В стадии синтеза мы переходим с помощью логических и математических доводов от поведения отдельных атомов к описанию систем, которые содержат множество атомов.

Описанный в таком общем виде, ньютоновский Анализ и Синтез не выглядит слишком впечатляюще. В конце концов, он близок к обычным практическим методам, например, «чтобы решить сложную проблему, разделяй и властвуй» – а это едва ли возбуждающее открытие. Но Ньютон потребовал точности и полноты понимания, говоря:

Гораздо лучше сделать немного, но наверняка, а остальное оставить для других, которые придут после вас, чем объяснять все вещи с помощью гипотез, не будучи уверенным ни в чем до конца.

И в этих впечатляющих примерах он достиг своих целей. Ньютон убедительно показал, что Природа сама идет по пути анализа и синтеза. В «атомах» действительно есть простота, и Природа действительно функционирует, позволяя им делать свое дело.

Ньютон также в своей работе о движении и механике обогатил наше представление о том, что такое физические законы. Его законы движения и гравитации – это *динамические* законы. Другими словами, это законы изменения. Такие законы воплощают идею красоты, отличную от статического совершенства, которое так любили Пифагор и (особенно) Платон.

Динамическая красота выходит за пределы отдельных предметов и явлений и призывает нас постичь широту возможностей. Например, размеры и формы настоящих орбит планет не просты. Они не являются ни (усложненными) окружностями Аристотеля, Птолемея или Николая Коперника, ни даже почти правильными эллипсами Кеплера – это скорее кривые, которые нужно вычислять как функции времени, изменяющиеся сложным образом в зависимости от положений и масс Солнца и остальных

планет. В этом есть восхитительная красота и простота, но это полностью очевидно только тогда, когда мы понимаем внутреннее устройство. Видимые проявления отдельных предметов не исчерпывают красоту законов.

- *Максвелл* был первым по-настоящему современным физиком. Его работа по электромагнетизму возвестила одновременно новое представление о реальности и новый метод в физике. Новое представление, которое Максвелл развил из догадок Майкла Фарадея, состоит в том, что элементарные составляющие физической реальности – это не точечные *частицы*, а скорее наполняющие пространство *поля*. Новый метод – это метод *вдохновенных догадок* (inspired guesswork). В 1864 г. Максвелл кратко записал известные законы электричества и магнетизма в виде системы уравнений, но понял, что полученная система противоречива. Как и Платон, который подогнал пять идеальных тел под четыре элемента и Вселенную, Максвелл не сдался. Он заметил, что если добавить еще одно слагаемое, то уравнения можно сделать одновременно более симметричными и математически непротиворечивыми. Полученная система, известная под названием уравнений Максвелла, не только объединила электричество и магнетизм, но и имела следствием описание света, и она дожила до наших дней в качестве надежных обоснований этих явлений.

Чем же воодушевляются «вдохновенные догадки» физика? Логическая непротиворечивость необходима, но едва ли достаточна. Скорее Максвелла и его последователей – т. е. всех современных физиков – подвели ближе к истине красота и симметрия, как мы далее увидим.

Максвелл в работе по восприятию света также открыл, что аллегорическая Пещера Платона отражает нечто довольно реальное и конкретное: ничтожность нашего чувственного восприятия по сравнению с доступной реальностью. И его работа, проливая свет на границы восприятия, позволяет нам выйти за эти границы. Ведь лучшее средство для развития чувственных способностей – это ищущий ум.

## Квантовое завершение

Решительное «да» на наш Вопрос прозвучало только в XX в., когда была разработана квантовая теория.

Квантовая революция привела к такому открытию: мы наконец узнали, что такое Материя. Необходимые уравнения являются частью теоретической структуры, которую часто называют Стандартной моделью. Такое наводящее зевоту название едва ли отдает должное этому достижению, и я продолжу свою кампанию, начатую в «Легкости бытия<sup>[2]</sup>», по его замене на кое-что более подходящее и потрясающее:

### *Стандартная модель → Главная теория.*

Это изменение более чем оправданно, и вот почему.

1. «Модель» ассоциируется с временным суррогатом, который ждет замена на «настоящую вещь». Но Главная теория уже является точным представлением физической реальности, которое любая будущая гипотетическая «настоящая вещь» должна принимать во внимание.

2. «Стандартная» ассоциируется с «общепринятой» и намекает на наличие какого-то высшего знания. Но такого высшего знания нет. На самом деле я думаю – и тому есть горы свидетельств, – что, хотя Главная теория будет дополнена, ее сердцевина останется прежней.

Главная теория воплощает красивые идеи. Уравнения для атомов и света почти буквально совпадают с уравнениями, которым подчиняются музыкальные инструменты и звук. Горстка изящных схем лежит в основе богатого разнообразия устройства Природы, начиная с простых структурных компонентов материального мира.

Наши Главные теории четырех взаимодействий в Природе – гравитации, электромагнетизма, сильного и слабого взаимодействий – воплощают по своей сути общий принцип: *локальную симметрию*. Как вы прочитаете далее, этот принцип одновременно осуществляет чаяния Пифагора и Платона о гармонии и понятийной чистоте, а также выходит за их пределы. Как вы *увидите*, этот принцип строится на художественной геометрии Брунеллески и блестящих озарениях Ньютона и Максвелла о природе света, и в то же время он выходит за их рамки.

Главная теория завершает анализ материи для практических целей. Используя ее, мы можем *сделать вывод* о том, какие виды атомных ядер, атомов, молекул – и звезд – могут существовать. И мы можем надежно управлять поведением более крупных скоплений этих элементов, чтобы создавать транзисторы, лазеры или Большие адронные коллайдеры. Уравнения Главной теории проверены с гораздо большей точностью и при гораздо более экстремальных условиях, чем это нужно для их применения в химии, биологии, инженерном деле или астрофизике. Хотя, конечно, существуют вещи, которых мы не понимаем, – и совсем скоро я упомяну несколько важных из них – мы действительно понимаем устройство Материи, из которой мы состоим и с которой сталкиваемся в обычной жизни (даже если мы химики, инженеры или астрофизики).

Несмотря на свои огромные достоинства, Главная теория не идеальна. Действительно, именно потому, что это описание реальности настолько верно, мы должны в поисках ответа на наш Вопрос оставаться на самом высоком эстетическом уровне. Если пристально рассмотреть Главную теорию, в ней обнаруживаются недостатки. Ее уравнения кривобоки, и они содержат несколько мало связанных друг с другом кусков. Больше того, Главная теория не объясняет существования так называемых темной материи и темной энергии. Хотя этими неуловимыми формами материи можно пренебречь при рассмотрении нашего ближайшего окружения, они занимают прочные позиции в межзвездном и межгалактическом пространстве и потому оказываются преобладающими в общей массе Вселенной. По этой и другим причинам мы не можем оставаться удовлетворенными.

Попробовав вкус красоты в сердце мира, мы жаждем большего. В этих поисках, я думаю, нет более многообещающего проводника, чем сама красота. Я дам вам некоторые подсказки, которые наводят на мысль о конкретных возможностях улучшения нашего описания Природы. Так как я стремлюсь к вдохновенным догадкам, в красоте мое воодушевление. Как вы увидите ниже, для меня это уже несколько раз сработало.

## Разновидности красоты

У разных художников разные стили. Мы не ожидаем найти приглушенные цвета Ренуара в мистическом полумраке Рембрандта или утонченность Рафаэля у любого из двух предыдущих. Музыка Моцарта пришла из совершенно иного мира, чем музыка The Beatles, а музыка Луи Армстронга – еще из третьего. Точно так же красота, воплощенная в физическом мире, – это особый вид красоты. Природа как художник имеет свой особый стиль.

Чтобы оценить по достоинству искусство Природы, мы должны проникнуть в ее стиль с пониманием. Галилей выразил это, как всегда красноречиво, следующим образом:

Философия [Природа] описана в этой великой книге, которая всегда находится у нас перед глазами – я имею в виду Вселенную, – но мы не можем понять ее, если мы не выучим сначала ее язык и не поймем ее символов, с помощью которых она написана. Эта книга написана математическим языком, и ее символы – это треугольники, круги и другие геометрические фигуры, без помощи которых невозможно понять в ней ни одного слова; без которых будешь тщетно бродить по темному лабиринту.

Сегодня мы гораздо дальше проникли в суть этой великой книги и открыли, что ее позднейшие главы используют более изобретательный и менее привычный язык, чем евклидова геометрия, которую знал Галилей. Чтобы начать бегло на нем разговаривать, потребуется целая жизнь (или, по крайней мере, несколько лет магистратуры и/или аспирантуры). Но так же, как диплом по истории искусств не является необходимым условием для того, чтобы заинтересоваться мировым искусством и найти этот опыт очень приятным, так и я надеюсь этой книгой помочь вам увлечься искусством Природы, сделав стиль последней доступным для вас. Ваши усилия будут вознаграждены, ибо, как мог бы сказать Эйнштейн:

Природа изощрена, но не злонамеренна.

Две навязчивые идеи являются характерными для стиля Природы:

- Симметрия – любовь к гармонии, равновесию

и пропорциональности.

- Экономия – удовольствие от создания большого разнообразия явлений очень ограниченным числом способов.

Наблюдайте за тем, как повторяются, ширятся и развиваются эти мотивы сквозь весь наш рассказ и дают ему единство. Восприятие этих идей происходило интуитивно, часто принятием желаемого за действительное, однако привело к созданию точных, действенных и плодотворных методов познания.

Теперь нужна небольшая оговорка. Многие разновидности красоты плохо представлены в стиле Природы в смысле выраженности в ее фундаментальной операционной системе. Наше восхищение человеческим телом и наша увлеченность выразительными портретами, наша любовь к животным и к природным ландшафтам – и многие другие источники художественной красоты – наукой не задействованы. Но наука это не всё, что есть на свете, слава богу.

## Понятия и реальности; Разум и материя

Наш Вопрос можно понимать двояко. Наиболее очевидно, что он является вопросом о мире. Это то значение, на которое мы делали упор до настоящего момента. Но и второе значение столь же завораживающее. Когда мы обнаруживаем, что *наше* чувство прекрасного осуществляется в физическом мире, мы узнаем что-то о мире, но также мы узнаем кое-что о себе.

Понимание человеком фундаментальных законов Природы – достижение недавнее по эволюционным или даже историческим меркам. Кроме того, эти законы открываются нам только в результате тщательно продуманных экспериментов: использования совершенных микроскопов и телескопов, деления атомов и ядер, а также обработки длинных цепочек математических умозаключений. Все это само по себе не приходит. Наше чувство прекрасного никак напрямую не приспособлено к фундаментальным работам Природы. И все-таки с той же уверенностью можно сказать, что наше чувство прекрасного откликается на то, что мы в них находим.

Что же объясняет эту восхитительную гармонию Разума и Материи? Без объяснения этого чуда наш Вопрос остается без ответа. Эта тема будет затронута в нашей медитации неоднократно. А сейчас два коротких предварительных рассуждения:

1. Мы, люди, в первую очередь визуальные существа. Конечно, наше зрение и наши самые глубинные виды мышления (множеством менее очевидных способов) обусловлены нашим взаимодействием со светом. Каждый из нас, например, рожден, чтобы в совершенстве, хотя и неосознанно, практиковать проективную геометрию. Эта способность жестко вмонтирована в наш мозг. Именно это позволяет нам интерпретировать двумерное изображение, которое получает наша сетчатка, как представление о мире объектов в трехмерном пространстве.

Наш мозг содержит специализированные модули, которые позволяют нам быстро и без сознательных усилий создавать динамическое представление о мире, в основе которого – трехмерные объекты, расположенные в трехмерном пространстве. Мы делаем это, начиная с двумерных изображений на нашей сетчатке глаз (которые, в свою очередь, образуются благодаря лучам света, испущенным или отраженным от поверхностей внешних предметов, которые распространяются до нас

по прямой). Восстановить из полученных нами изображений предметы, которые были их причиной, – непростая задача в инверсной проективной геометрии. На самом деле утверждается, что это неразрешимая задача, потому что в проекциях совершенно недостаточно информации, чтобы сделать однозначную реконструкцию. Основная проблема в том, что, даже чтобы просто начать ее решать, нам нужно отделить объекты от их фона (или от того, что находится перед ними). Чтобы достичь этого, мы пользуемся всевозможными уловками, основанными на типичных свойствах объектов, которые нам встречаются, таких как их цвет или контрастность текстуры и отчетливые границы. Но даже после того, как эта стадия успешно пройдена, нам остается сложная геометрическая задача, для которой Природа любезно снабдила нас превосходным специализированным процессором в нашей зрительной коре<sup>[3]</sup>.

Другая важная черта нашего зрения состоит в том, что свет приходит к нам очень издалека и дает нам возможность заниматься астрономией. Видимое регулярное движение звезд и чуть менее систематическое движение планет послужили ранними намеками на подчинение Вселенной определенным законам и предоставили нам изначальное вдохновение и поле для проверки математического описания Природы. Как любой хороший учебник, оно содержит задачи различной степени сложности.

В самых передовых, современных разделах физики мы узнаем, что свет сам является формой материи, а также то, что на самом деле и материя в целом, при глубоком ее понимании, необыкновенно похожа на свет. Итак, еще раз: наш интерес и опыт соприкосновения со светом, который глубоко заложен в самой нашей природе, оказываются удачными и способствующими познанию.

Существам, которые, как большинство млекопитающих, воспринимают мир прежде всего через обоняние, было бы гораздо сложнее добраться до той физики, которую мы знаем, даже если бы они обладали высоким интеллектом в других областях. Можно вообразить, например, собак, эволюционирующих в очень умных социальных существ, с развитым языком, живущих интересной полной жизнью, но лишенных отдельных видов любопытства и мироощущения, которые основаны на зрительном опыте и которые ведут к нашему виду глубокого понимания физического мира. Их мир был бы полон синтезов и разложений – у них были бы прекрасные наборы для химии, сложная кухня, афродизиаки и, как у Пруста, произвольная память. Проективная геометрия и астрономия, возможно, не были бы так представлены. Мы знаем, что запах – это химическое чувство, и мы начинаем понимать его основы

в виде молекулярных событий. Но «обратная» задача понять по запаху, какие молекулы вызвали его и какие законы им свойственны, и в конце концов прийти к физике, какой мы ее знаем, кажется мне безнадежно сложной.

Птицы же – визуальные существа, как и мы. Кроме того, их образ жизни дал бы им дополнительное преимущество перед людьми в том, чтобы начать понимать физику. Птицы с их свободой полета испытывают присущую трехмерному пространству симметрию столь хорошо знакомым им способом, которого у нас нет. Они также испытывают основные законы движения (и особенно роль инерции в своей повседневной жизни), так как они существуют в практически лишенной трения среде. Птицы рождаются, можно сказать, с интуитивным знанием классической механики и принципа относительности Галилея, так же как и геометрии. Если бы какие-нибудь виды птиц развили хорошее абстрактное мышление, т. е. перестали бы иметь «птичьи мозги», они бы быстро создали физику. А вот людям пришлось отучиваться от нагруженной трением аристотелевой механики, чтобы достичь более глубокого понимания. Исторически для этого потребовались немалые усилия!

Дельфины в их водной среде и летучие мыши с их эхолокацией предоставляют нам другие вариации на эту тему, но я не буду развивать их здесь.

Основной философский аргумент, который эти соображения иллюстрируют, состоит в том, что мир не дает своей собственной уникальной интерпретации. Мир предлагает множество возможностей для разных вселенных, основанных на разных чувствах, которые способствуют совершенно разным интерпретациям значимости мира. В этом смысле наша так называемая Вселенная уже очень похожа на мультивселенную.

2. Успешное восприятие включает в себя сложные умозаключения, поскольку информация, которую мы получаем о мире, одновременно очень неполная и сильно «зашумлена» побочными сигналами. Несмотря на наши врожденные способности, мы также должны учиться видеть, взаимодействуя с миром, формируя ожидания и сравнивая наши предсказания с действительностью. Когда мы формируем ожидания, которые оказываются правильными, мы испытываем удовольствие и удовлетворение. Эти механизмы вознаграждения поощряют успешное обучение. Также они стимулируют наше чувство прекрасного – а на самом деле они и *есть* это чувство.

Суммируя все эти наблюдения, мы обнаруживаем объяснение того,

почему мы находим интересные явления (явления, благодаря которым мы узнаем что-то новое!) в физике красивыми. Важное следствие состоит в том, что мы особенно ценим опыт, который нас удивляет, но удивляет не слишком сильно. Стандартное, поверхностное узнавание не потребует от нас усилий и не сможет быть вознаграждено так же, как активное обучение. В то же время явления, значение которых мы совсем не можем понять, также не принесут нам удовольствия; это помехи.

И здесь нам тоже повезло в том, что Природа использует в своей основе симметрию и экономию средств: ведь эти принципы, так же как наше интуитивное понимание света, способствуют успешным предсказаниям и обучению. По внешнему виду части симметричного объекта мы можем предсказать (успешно!) внешний вид остальной его части; по поведению частей объектов природы мы можем предсказать (иногда успешно!) поведение целых объектов. Следовательно, симметрия и экономия средств – это как раз то, что мы хорошо приспособлены воспринимать как красоту.

## Новые идеи и интерпретации

Вместе с новым взглядом на некоторые очень старые и некоторые не столь старые идеи вы найдете в этой книге и несколько идей существенно новых. Здесь я бы хотел упомянуть некоторые из самых важных.

Мое представление Главной теории как геометрии и мои размышления о следующих шагах за ее пределы являются адаптацией моих работ в фундаментальной физике. Эти работы, конечно же, основаны на работах многих других людей. Новым, насколько мне известно, является применение цветовых полей в качестве примера дополнительных измерений и мое использование тех возможностей, которые они открывают для иллюстрации локальной симметрии.

Моя теория о том, что ощущение обучения лежит в основе нашего чувства прекрасного в важных случаях и является его эволюционной причиной, а также приложение этой теории к музыкальной гармонии, которое предлагает рациональное объяснение открытий Пифагора в музыке, составляют созвездие идей, которыми я долгое время развлекался частным образом и которые впервые представляю публике здесь. Будьте бдительны!

Мои рассуждения о расширении цветового восприятия основано на идущих в настоящее время практических исследованиях, которые, как я надеюсь, приведут к появлению коммерческих продуктов и которые защищены патентами.

Я хотел бы думать, что Нильс Бор поддержал бы мою широкую интерпретацию дополнительности, и мог бы даже признать свое авторство – но не уверен, что он бы это сделал.

# **Пифагор I: Мысль и объект**

## Эфемерный Пифагор

Человек по имени Пифагор жил примерно в 570–495 гг. до н. э., но о нем известно очень мало. Или, вернее, о нем «известно» очень много, но бóльшая часть этих фактов наверняка ошибочна, потому что документальные свидетельства его жизни полны противоречий. В них сочетаются возвышенное, смешное, невероятное и даже полная нелепица.

Говорили, что Пифагор был сыном Аполлона, имел золотое бедро и светился. Возможно, он был сторонником вегетарианства, хотя вполне может быть, что все было наоборот. Среди его самых известных высказываний дурную славу приобрел запрет есть бобы, потому что «у бобов есть душа», хотя несколько ранних источников недвусмысленно отрицают, что Пифагор когда-либо говорил или верил во что-то подобное. Более определенно можно сказать, что Пифагор верил в переселение душ и проповедовал это учение. Существует несколько историй, которые подтверждают это, хотя каждая из них, конечно, вызывает сомнения. Согласно Авлу Геллию<sup>[4]</sup>, Пифагор помнил четыре свои прошлые жизни, в том числе ту, в которой он был прекрасной куртизанкой по имени Алко. Ксенофан вспоминал, что Пифагор, услышав скулеж собаки, которую били, бросился остановить ее обидчика, заявив, что узнал голос умершего друга. Также Пифагор, как и святой Франциск столетия спустя, поклонялся животным.

Стэнфордская энциклопедия философии – кстати, бесплатный и чрезвычайно полезный сетевой ресурс – подытоживает все это в следующем виде:

В современности сложился известный образ Пифагора как ведущего математика и ученого. Тем не менее дошедшие из древности свидетельства говорят о том, что, хотя Пифагор был известен в годы своей жизни и даже 150 лет спустя после смерти, во времена Платона и Аристотеля, его слава не была связана с математикой или наукой. Он был знаменит как:

- 1) знаток того, что происходит с душой после смерти, считавший, что душа бессмертна и переживает многочисленные реинкарнации;
- 2) знаток религиозных ритуалов;
- 3) чудодей, у которого было золотое бедро и который мог быть в двух местах одновременно;
- 4) основоположник аскетического образа жизни, включающего в себя ограничения в пище, религиозные ритуалы и суровую самодисциплину.

Некоторые факты выглядят более ясными. Реальный Пифагор родился на греческом острове Самосе, много путешествовал и стал вдохновителем и создателем необычного религиозного движения. Его братство посвященных процветало в течение недолгого времени в Кротоне, в Южной Италии, и имело несколько ответвлений в других провинциях, пока не было повсеместно запрещено. Пифагорейцы организовывали тайные общества, вокруг которых сосредотачивалась жизнь братьев. Эти общины, включающие и мужчин, и женщин, способствовали появлению некоего вида интеллектуального мистицизма, который казался современникам удивительным и великолепным, хотя и пугающе необычным. Их взгляды на мир сосредоточились вокруг молитвенного восхищения числами и музыкальной гармонией, которые они считали отражением глубинной структуры реальности. Как мы увидим далее, в какой-то мере это имело отношение к действительности.

## Настоящий Пифагор

Снова приведем цитату из Стэнфордской энциклопедии:

Портрет Пифагора, который вырисовывается из этих свидетельств, показывает нам не математика, который приводит строгие доказательства, и не ученого, который проводит эксперименты, чтобы открыть природу естественного мира, а скорее, какого-то человека, который придает особое значение и приписывает особую роль математическим соотношениям, которые были известны и до него.

Бертран Рассел более лаконичен:

Это смесь Эйнштейна и Мэри Бейкер Эдди<sup>[5]</sup>.

Для ученых, изучающих настоящую биографию Пифагора, самой большой проблемой является тот факт, что последователи Пифагора приписывали ему свои собственные мысли и открытия. Очевидно, так они надеялись одновременно придать вес своим идеям и улучшить репутацию Пифагора, чтобы развивать свою общину – ту, которую он основал. Таким образом, блестящие открытия в математике, физике, музыке, а также вдохновляющий мистицизм, плодотворная философия и чистая мораль были все связаны с образом одной богоподобной фигуры. Эта приводящая в священный трепет фигура и стала для нас *настоящим* Пифагором.

Нельзя сказать, что совершенно неприемлемо приписывать заслуги эфемерного Пифагора (оставшегося в истории) настоящему Пифагору, поскольку великие достижения в математике и физике, совершенные настоящим Пифагором, проистекали из образа жизни, на который мнимый Пифагор вдохновил своих последователей, и из общины, которую тот создал.

(Если угодно, вы можете провести параллели с тем, как по-разному складывается судьба других крупных религиозных деятелей при жизни и после.)

Благодаря Рафаэлю мы знаем, как мог выглядеть настоящий Пифагор. На цветной вклейке, на иллюстрации В мы видим, как он, окруженный почитателями, сосредоточенно записывает что-то в большой книге.

## **«Число есть сущность всех вещей»**

Очень трудно разобрать, что же там пишет Пифагор, но мне нравится думать, что это какой-то вариант его фундаментального кредо:

«Число есть сущность всех вещей»<sup>[6]</sup>.

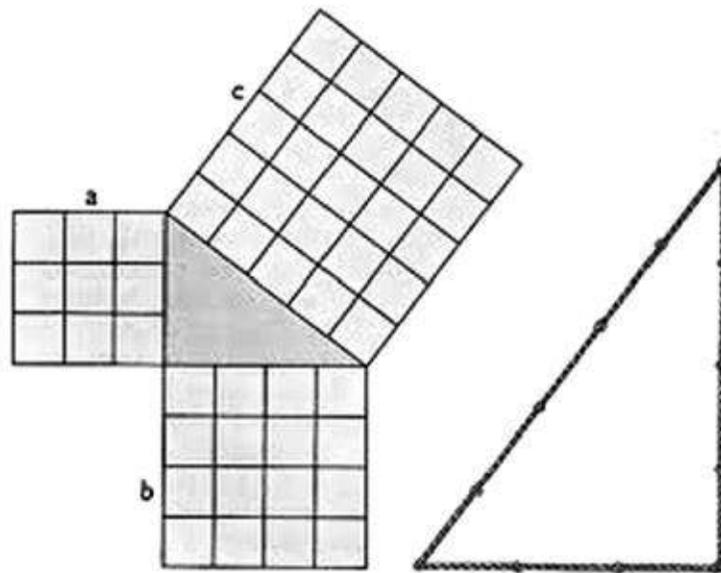
Очень трудно понять сквозь разделяющую нас огромную пропасть во времени и пространстве, что же именно он имел в виду под этой фразой. Так что здесь нам придется дать волю своему воображению.

## Теорема Пифагора

Начнем с того, что на Пифагора неизгладимое впечатление произвела теорема, впоследствии названная его именем. Впечатление было настолько огромным, что из-за этого открытия он нарушил принципы вегетарианства и заказал гекатомбу – ритуальное жертвоприношение сотни быков, за которым следовал пир. Это было сделано в знак благодарности музам.

Из-за чего же был весь шум?

Теорема Пифагора – это утверждение, касающееся прямоугольных треугольников, т. е. треугольников, имеющих угол, равный  $90^\circ$ , иначе говоря, прямой угол. Теорема гласит, что если построить квадраты на разных сторонах такого треугольника, то сумма площадей двух меньших квадратов будет равна площади большего. Классический пример – это прямоугольный треугольник со сторонами 3-4-5, изображенный на илл. 1.



Илл. 1. Прямоугольный треугольник со сторонами 3-4-5, простейший случай теоремы Пифагора

Площади двух меньших квадратов составляют  $3^2 = 9$  и  $4^2 = 16$ , как мы можем это увидеть, если в духе Пифагора *подсчитаем* количество маленьких квадратиков, на которые разбиты фигуры. Площадь большого квадрата составляет  $5^2 = 25$ . И мы можем проверить:  $9 + 16 = 25$ .

Сейчас теорема Пифагора знакома большинству из нас, хотя бы как смутное воспоминание из школьного курса геометрии. Но если вы услышите заново – ушами Пифагора, так сказать, – содержащееся в ней послание, вы поймете нечто потрясающее. Эта теорема гласит, что *геометрия* объектов воплощает скрытые *численные* отношения. Иными словами, она говорит, что Числами можно описать пусть не все, но по крайней мере нечто очень важное в физической реальности, а именно размеры и формы объектов, составляющих ее.

Позднее в этой медитации мы будем иметь дело с гораздо более продвинутыми и сложными концепциями, и мне придется прибегать к метафорам и аналогиям, чтобы передать их значение. Та особая радость, которую ученый находит, когда мыслит четкими математическими категориями, а точно определенные понятия идеально подходят друг к другу, теряется при такой передаче. Но сейчас у нас есть возможность испытать эту особую радость. Часть волшебства теоремы Пифагора состоит в том, что ее можно доказать, имея минимальную подготовку. Самые лучшие ее доказательства незабываемы, и воспоминание о них остается на всю жизнь. Они вдохновляли Олдоса Хаксли и Альберта Эйнштейна – не говоря уж о самом Пифагоре! – и, надеюсь, вдохновят и вас.

## Доказательство Гвидо

«Так просто!»

Именно эти слова произнес Гвидо, юный герой рассказа Олдоса Хаксли «Молодой Архимед», описывая свое доказательство теоремы Пифагора. Доказательство Гвидо основывается на формах, изображенных на цветной вклейке (иллюстрация С).

## Забава Гвидо

Давайте разберем то, что было очевидно для Гвидо с первого взгляда.

Каждый из двух больших квадратов, разделенных на части, содержит четыре цветных треугольника, и они одинаковы в обоих больших квадратах. Все цветные треугольники являются прямоугольными треугольниками, и все они имеют одинаковый размер. Будем считать, что длина самой короткой стороны есть  $a$ , следующей по длине –  $b$ , а самой длинной (гипотенузы) –  $c$ . Тогда легко заметить, что стороны двух больших

квадратов имеют длину  $a + b$ , и далее, что эти два квадрата равны по площади. Таким образом, не вошедшие в треугольники части больших квадратов тоже должны иметь равные площади.

Но из чего состоят эти равные площади? В первом большом квадрате, слева, у нас есть синий квадрат со стороной  $a$  и красный квадрат со стороной  $b$ . Они имеют площади  $a^2$  и  $b^2$ . Во втором большом квадрате, справа, у нас есть серый квадрат со стороной  $c$ . Его площадь равна  $c^2$ . Вспомнив то, о чем говорилось в предыдущем абзаце, мы можем прийти к выводу, что  $a^2 + b^2 = c^2$ .

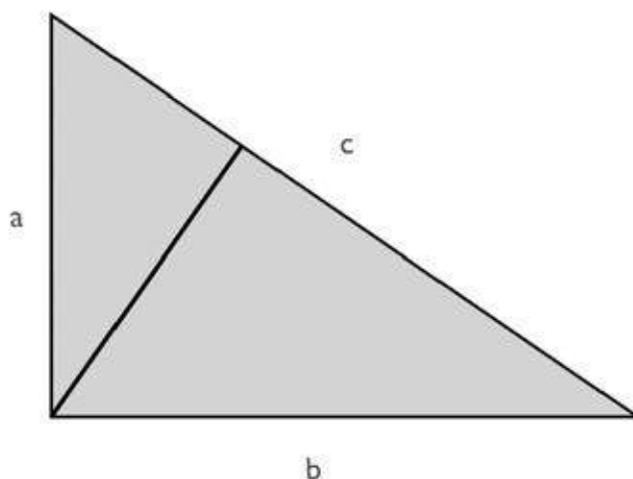
А это и есть теорема Пифагора!

## Доказательство Эйнштейна (?)

В своих автобиографических записках Эйнштейн вспоминает:

Помню, дядя рассказал мне о теореме Пифагора еще до того, как священная книжка по геометрии попала мне в руки. В результате многочисленных усилий мне удалось добиться успеха в «доказательстве» этой теоремы на основании подобия треугольников; таким образом мне казалось «очевидным», что соотношение сторон в прямоугольном треугольнике должно определяться одним из острых углов.

В этой записи действительно недостаточно деталей, чтобы с полной достоверностью реконструировать доказательство Эйнштейна, но ниже, на илл. 2, приведено мое наилучшее предположение. Оно претендует на правильность, поскольку является самым простым и самым красивым доказательством теоремы Пифагора. В частности, это доказательство делает совершенно понятным, почему именно квадраты сторон задействованы в этой теореме.



Илл. 2. Вероятная реконструкция доказательства Эйнштейна из автобиографических записок

### Отполированная драгоценность

Мы начинаем с наблюдения о том, что прямоугольные треугольники, которые имеют общий угол  $\varphi$ , являются подобными друг другу в строгом смысле, т. е. вы можете перейти от одного к другому с помощью изменения масштаба (увеличения или сжатия). Кроме того, если мы изменим длину стороны треугольника, умножив ее на какой-либо коэффициент, то его площадь изменится в количество раз, равное квадрату этого коэффициента. Теперь рассмотрим три прямоугольных треугольника, показанных на илл. 2: всю фигуру и два треугольника, которые она включает в себя. Каждый из этих треугольников содержит угол  $\varphi$ , следовательно, они подобны. Вследствие этого их площади пропорциональны  $a^2$ ,  $b^2$ ,  $c^2$  в порядке от самого маленького к самому большому. Но так как два меньших треугольника составляют большой треугольник, соответствующие площади также должны суммироваться, поэтому

$$a^2 + b^2 = c^2.$$

И теорема Пифагора тут как тут!

### Прекрасная насмешка

Прекрасная насмешка состоит в том, что теорема Пифагора может быть использована, чтобы подорвать его доктрину о том, что число есть сущность всех вещей. Такой возмутительный вывод следует из одного открытия пифагорейской школы, которое приписывали не Пифагору, а его ученику Гиппасу. Вскоре после того, как он сделал это открытие, Гиппас утонул в море. Не известно, была ли его смерть вызвана волей богов или волей пифагорейцев. Доказательство Гиппаса очень хорошо продумано, но не является слишком сложным. Давайте с ним ознакомимся.

Рассмотрим равнобедренные прямоугольные треугольники, у которых два катета равны, т. е.  $a = b$ . Теорема Пифагора гласит, что  $2 \times a^2 = c^2$ .

Теперь предположим, что длины сторон  $a$  и  $c$  выражаются целыми числами. Если все вещи – числа, то лучше бы это было так! Но выясняется, что это невозможно. Если  $a$  и  $c$  – четные числа, мы можем рассмотреть подобный треугольник, составляющий половину от размера первоначальной фигуры. Мы можем продолжать уменьшать его каждый раз в два раза, пока не получим треугольник, где по крайней мере одно из значений ( $a$  или  $c$ ) является нечетным.

Но какой бы выбор мы ни сделали, мы быстро достигнем противоречия. Вначале давайте предположим, что  $c$  выражается нечетным числом. Тогда  $c^2$  также является нечетным. Но  $2 \times a^2$  явно дает четное число, поскольку содержит множитель 2. Таким образом, у нас не получается равенства  $2 \times a^2 = c^2$ , как гласит теорема Пифагора. Противоречие!

Предположим тогда, что  $c$  выражается четным числом, – скажем,  $c = 2 \times p$ . Тогда  $c^2 = 4 \times p^2$ . Теорема Пифагора говорит нам (после того, как мы разделим обе части равенства на 2), что  $a^2 = 2 \times p^2$ . Следовательно,  $a$  не может выражаться нечетным числом – по тем же причинам, что и выше. Противоречие!

Таким образом, все-таки не все вещи могут быть выражены целыми числами. Не может существовать никакого атома длины, из которого могут быть выведены все возможные длины как произведение целого числа на этот самый атом.

Кажется, пифагорейцы не представляли себе, что можно прийти к другому умозаключению и сохранить неприкосновенной идею о том, что все вещи есть числа. В конце концов, можно представить себе мир, где все пространство состоит из множества одинаковых неделимых частей. Например, мои друзья Эд Фредкин и Стивен Вольфрам продвигают модели нашего мира, основанные на клеточных автоматах, которые обладают именно этим свойством. И монитор вашего компьютера, изображение

на котором состоит из точек света, называющихся пикселями, доказывает, что такой мир может выглядеть достаточно реалистично! Если рассуждать логически, справедливо было бы прийти к выводу, что в таком мире невозможно построить правильный равнобедренный прямоугольный треугольник. В нем обязательно что-то будет немного не так. Или прямой угол будет немного отклоняться от  $90^\circ$ , или катеты будут не совсем равны или – как на экране монитора – стороны такого треугольника будут не совсем прямыми.

Но такой подход не был близок греческим математикам. Они-то рассматривали геометрию в наиболее соблазнительной, непрерывной форме, где сосуществуют в точности прямые углы и точное равенство сторон. (Этот подход также оказался самым плодотворным для физиков, как мы увидим на примере Ньютона.) Чтобы утвердить такую точку зрения, грекам пришлось установить приоритет геометрии над арифметикой, потому что – как мы уже видели – целые числа не могут адекватно описать даже очень простую геометрическую фигуру. Таким образом, они отказались от буквы доктрины о том, что все вещи есть числа, но не от ее духа.

## Мысль и объект

Истинная сущность кредо Пифагора – это не буквальное утверждение того, что мир должен воплощать целые числа, но оптимистичное убеждение в том, что мир должен воплощать красивые понятия.

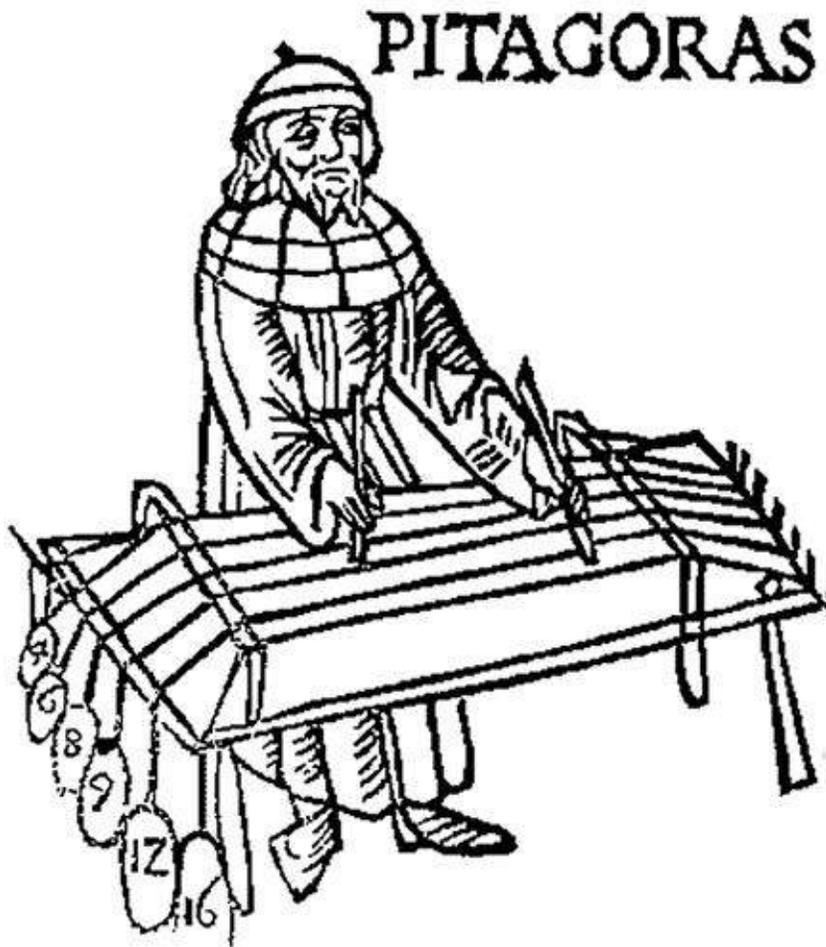
Урок, за который Гиппас заплатил жизнью, состоит в том, что мы должны стремиться узнать у Природы, в чем состоят ее правила. В этом предприятии скромность является необходимой чертой. Геометрия не менее красива, чем арифметика. На самом деле она более естественно подходит для нашего мозга, который во многом нацелен на обработку визуальных образов, и большинство людей предпочитают именно ее. И геометрия не содержит в себе меньше идей, меньше чистой работы ума, чем арифметика. Большая часть древнегреческой математики, систематизированная в «Началах» Евклида, стремилась доказать именно то, что геометрия – это логическая система.

Продолжив нашу медитацию, мы обнаружим, что Природа изобретательна в своем языке. Она поражает наше воображение новыми видами чисел, новыми видами геометрических форм – и даже, в квантовом мире, новыми видами логики.

## Пифагор II: Число и гармония

Сущность всех струнных инструментов, будь это древняя лира или современная гитара, виолончель или пианино, одинакова: они производят звук с помощью движения струн. Качество звука, или тембр, зависит от множества сложных факторов, в том числе от материала струн, формы поверхности деки – «звукоотражателя», вибрирующего согласованно со струной, и способа извлечения звука из струны: щипком, проведением смычка или ударом. Но для всех инструментов существует основной тон или строй, который мы, слушая игру на них, распознаем как ноты. Пифагор – настоящий Пифагор – открыл, что музыкальный строй подчиняется двум удивительным правилам. Эти правила имеют прямую связь с числами, свойствами физического мира и нашим чувством гармонии (которая является одним из ликов красоты).

На следующем рисунке, который не принадлежит кисти Рафаэля, изображен Пифагор, проводящий эксперименты по гармонии.



Илл. 3. Средневековая европейская гравюра, изображающая Пифагора за изучением музыкальной гармонии.

Из рисунка мы можем сделать вывод, что Пифагор слушает, как изменяется звук его инструмента, когда он меняет два различных параметра. Зажимая струну в разных точках, он может варьировать рабочую длину вибрирующей части, а изменяя груз, который натягивает струну, он может менять ее натяжение

## Гармония, число и длина: поразительная связь

Первое правило Пифагора устанавливает соотношение между длиной вибрирующей струны и нашим восприятием ее тона. Оно гласит, что две одинаковые струны с одним и тем же натяжением издадут вместе приятный звук, когда длины струн пропорциональны небольшим целым числам. Так, например, когда соотношение длин составляет 1:2, тональности формируют октаву. При соотношении 2:3 мы слышим доминантовую квинту, а при 3:4 – мажорную кварту. В музыкальном нотном письме (в регистре «до») это соотносится с тем, что одна за другой проигрываются две ноты до различных диапазонов, до и соль или до и фа соответственно. Такие комбинации тональностей привлекательны для людей. Они стали основой классической и большей части народной музыки, а также поп- и рок-музыки.

Применяя правило Пифагора, мы должны понимать под длиной струны ее рабочую длину, т. е. длину той части струны, которая в действительности вибрирует. Зажимая струну и таким образом создавая мертвую зону, мы можем поменять тональность. Гитаристы и виолончелисты пользуются этой возможностью, зажимая струны пальцами левой руки. Делая это, они, зная об этом или нет, призывают к жизни Пифагора. На рисунке мы видим, как Пифагор подбирает рабочую длину струны, используя заостренные зажимы, которые нужны для того, чтобы добиться точности в измерениях. Когда звуки звучат вместе хорошо, мы говорим, что они находятся в гармонии или созвучны. Таким образом, Пифагор открыл, что та гармония звуков, которую мы ощущаем, отражает отношения, которые имеют место, казалось бы, в совершенно другом мире – в мире чисел.

## Гармония, число и вес: поразительная связь

Второе правило Пифагора связано с натяжением струны. Нужно натяжение можно получить управляемым и хорошо измеряемым способом, отягощая струну грузами различного веса, как это показано на илл. 6. Здесь результат еще более интересен. Звуки находятся в гармонии, если натяжение пропорционально квадратам небольших целых чисел. Более сильное натяжение соответствует более высокой тональности. Так, соотношение натяжений 1:4 создает октаву и т. д. Когда музыканты настраивают свои инструменты перед выступлением, подтягивая или ослабляя струны, поворачивая колки, Пифагор снова возвращается.

Эта вторая закономерность впечатляет куда больше, чем первая, в качестве свидетельства того, что ощущения являются скрытыми числами. Она лучше спрятана, потому что числа должны быть обработаны – если быть точным, возведены в квадрат – до того, как закономерность станет очевидной. Соответственно потрясение от открытия куда сильнее. Также эта закономерность связана с весом предметов. А вес более безошибочно, чем длина, приводит нас к вещам материального мира.

## Открытия и мировоззрение

Вот мы и обсудили три главных открытия Пифагора: его теорему о прямоугольных треугольниках и два правила музыкального созвучия.

Все вместе они связывают форму, размер, вес и гармонию общей нитью, которой оказываются числа.

Для пифагорейцев этого триединства открытий было более чем достаточно, чтобы склониться к мистическому мировоззрению. Вибрация струн – это источник музыкального звука. Она представляет собой не что иное, как периодическое движение, т. е. движение, которое повторяется через определенные интервалы времени. Мы также видим, что Солнце и планеты совершают периодические движения по небу, и делаем логический вывод об их периодических движениях в космосе. Таким образом, они тоже должны производить звуки. Эти звуки формируют Музыку сфер, музыку, которая наполняет космос.

Пифагор увлекался пением. Он также заявлял, что действительно слышал Музыку сфер. Некоторые современные ученые строят предположения о том, что исторический Пифагор страдал от тиннитуса, т. е. от шума в ушах. Конечно, с настоящим Пифагором не происходило ничего подобного.

В любом случае более широкий смысл этих открытий состоит в том, что все есть числа и что числа поддерживают гармонию. Пифагорейцы, помещенные на математике, жили в мире, наполненном гармонией.

## Послание – в частоте

Я полагаю, что музыкальные правила Пифагора заслуживают того, чтобы считаться первыми количественными законами природы, когда-либо открытыми человеком. (Астрономические закономерности, начиная с регулярной смены дня и ночи, были, конечно, замечены намного раньше. Составление календарей и гороскопов, использование математики для предсказания или воспроизведения имевшего места в прошлом положения Солнца, Луны или планет являлись особыми практическими искусствами задолго до рождения Пифагора. Но эмпирические наблюдения за отдельными объектами весьма отличаются от изучения общих законов Природы.)

Странно поэтому осознавать, что мы до сих пор не понимаем до конца, почему они верны. Сегодня мы намного лучше понимаем физические процессы, связанные с получением, передачей и восприятием звука, но связь между этими знаниями и ощущением «нот, которые звучат хорошо вместе» пока что ускользает от нас. Думаю, по поводу этого существует большое количество многообещающих идей, которые близки к центральному понятию нашей медитации, поскольку (если они верны) проливают свет на важный аспект происхождения нашего чувства красоты.

Наше описание того, как и почему работают правила Пифагора, состоит из трех частей. В первой части звук колеблющейся струны достигает барабанной перепонки в нашем ухе. Во второй – звук, достигший барабанной перепонки, превращается в первичные нервные импульсы. В третьей – первичные нервные импульсы приводят слушателя к ощущению гармонии.

Колебания струны проходят несколько трансформаций, прежде чем достигают нашего мозга как послание. Они воздействуют на окружающий воздух напрямую, просто толкая его. Тем не менее само по себе дрожание отдельной струны достаточно слабое. На практике у музыкального инструмента есть звукоотражающая поверхность – дека, которая в ответ на колебания струны сама вибрирует гораздо сильнее. Движение деки толкает окружающий воздух более чувствительно.

Сотрясение воздуха вокруг струны или деки порождает свое собственное возмущение, которое становится нарастающим: звуковая волна распространяется во всех направлениях. Любая звуковая волна является повторяющимся циклом сжатия и разрежения. Воздух,

колеблющийся в каждой точке пространства, оказывает давление на соседние участки, и они тоже начинают колебаться. В конце концов часть этой звуковой волны, пройдя сквозь ухо с его сложной геометрией, неизбежно достигает мембраны, которая называется барабанной перепонкой и находится на глубине нескольких сантиметров в слуховом проходе. Наша барабанная перепонка работает как антипод деки: теперь колебания воздуха вызывают механические движения, а не наоборот.

Колебания барабанной перепонки порождают дальнейшую реакцию, о которой мы сейчас расскажем. Но перед этим мы должны сделать одно простое наблюдение, которое тем не менее является фундаментальным. Может вызвать удивление, как в этот длинный ряд преобразований значимый сигнал, отражающий поведение струны, передается так далеко по цепочке. Дело здесь в том, что во всех этих трансформациях одно свойство сигнала остается неизменным. Число колебаний в единицу времени или, как мы говорим, *частота* остается одинаковой, независимо от того, была ли это вибрация струны, деки, воздуха или барабанной перепонки – или слуховых косточек, кохлеарной жидкости, базилярной мембраны или волосковых клеток, следующих далее по очереди. Поскольку во время каждой трансформации толчки и натяжения на предыдущей стадии вызывают сжатие и разрежение на следующей, в точном соответствии с изначальным сигналом, то, таким образом, различные виды колебаний оказываются синхронизованными или, как мы говорим, «одновременными». Вследствие этого мы можем ожидать и действительно увидим, что, если мы хотим, чтобы наше восприятие отражало свойства изначальных колебаний, полезно отслеживать частоту тех колебаний, которые в конце концов возникают в наших головах.

Таким образом, первый шаг к пониманию правил Пифагора – это перевод их на язык частот. Сегодня мы можем положиться на уравнения механики, которые позволяют вычислить, как меняется частота колебаний струны, если мы изменим ее длину или натяжение. Используя эти уравнения, мы находим, что частота уменьшается пропорционально длине и возрастает пропорционально квадрату натяжения. Следовательно, оба правила Пифагора, переведенные на язык частот, передают одно и то же простое утверждение. Они гласят, что ноты звучат хорошо вместе, если их частоты соотносятся как небольшие целые числа.

## Теория гармонии

Теперь вернемся к тому, что происходит со звуком на второй стадии. Барабанная перепонка крепится к трем маленьким слуховым косточкам, которые, в свою очередь, прикреплены к мембранному «овальному окну», открывающемуся в спиралевидную улитку, которая является критически важным для слуха органом, играющим примерно такую же роль, как глаз для зрения. Она наполнена жидкостью, приходящей в движение от вибрации овального окна. В эту жидкость погружена длинная базилярная мембрана постепенно уменьшающейся толщины, которая, извиваясь, проходит через завитки спиралевидной улитки. Параллельно базилярной мембране пролегает кортиев орган. Именно в нем сигнал от струны наконец – после множества трансформаций – переводится в нервные импульсы. Детальное описание этих преобразований очень сложно и интересует только специалистов, но в целом картина проста и не зависит от этих деталей. Она состоит в том, что частота первоначальных колебаний переводится в серию возбуждений нейронов, имеющую ту же частоту.

Один важный аспект этого перехода особенно красив и соответствует духу учения Пифагора; в 1961 г. Дьёрдь фон Бекешти получил за него Нобелевскую премию. Поскольку толщина базилярной мембраны уменьшается вдоль длинной оси, различные ее части стремятся колебаться в разном темпе. У более широких частей инерция больше, поэтому они вибрируют медленнее, на более низких частотах, в то время как более узкие части вибрируют на более высоких частотах. (Из-за этого эффекта существует разница в общем тоне типично мужских и типично женских голосов. Во время пубертатного периода мужские голосовые связки утолщаются, что приводит к более низким частотам вибрации и более глубокому голосу.) Итак, после того, как звук после множества преобразований приводит окружающую жидкость в движение, реакция базилярной мембраны оказывается различной в разных местах по ее длине. Низкочастотные звуки приведут более широкие части в интенсивное движение, в то время как высокочастотные звуки затронут более узкие части<sup>[7]</sup>. Таким образом, информация о частоте перекодируется в информацию о местоположении.

Если спиралевидная улитка является для слуха тем же, чем глаз для зрения, то кортиев орган – это его сетчатка. Он работает параллельно

с базилярной мембраной и находится очень близко от нее. Его детальная структура сложна, но, грубо говоря, он состоит из волосковых клеток и нейронов, причем каждая волосковая клетка связана со своим собственным нейроном. Движение базилярной мембраны, проходящее через промежуточную жидкость, передает усилие на волосковые клетки. Волосковые клетки двигаются в ответ, и их движение вызывает электрическое возбуждение<sup>[8]</sup> в соответствующих нейронах. Его частота остается той же, что и частота стимуляции, которая, в свою очередь, абсолютно такая же, как частота первоначального звука. (Для тех, кто хочет знать больше: частотные характеристики возбуждения зашумлены, но они содержат сильный компонент с частотой исходного сигнала.) Из-за того, что кортиев орган примыкает к базилярной мембране, его нейроны возбуждаются с частотой, зависящей от их пространственного расположения. Для нашего восприятия созвучий очень важно, что сигналы от нескольких одновременно звучащих тонов не полностью смешиваются. На различные тоны преимущественно отзываются разные нейроны! Таков физиологический механизм, который позволяет нам так хорошо различать тоны.

Другими словами, наше внутреннее ухо следует совету Ньютона – и предвосхищает его опыты со светом, проводя великолепный анализ с разложением поступающего звука на чистые тона. (Как мы обсудим позже, наша сенсорная способность анализировать частоту световых сигналов или, другими словами, цветовую составляющую света основана на других принципах и гораздо более ограничена.)

Теперь мы можем перейти к третьей части нашей истории. В ней сигналы от первичных сенсорных нейронов в кортиевом органе сочетаются и переходят в последующие нейронные слои в мозге. О том, что происходит здесь, мы знаем не так точно. Но только на этой стадии мы можем подойти вплотную к нашему главному вопросу:

«Почему звуки, частоты которых соотносятся как небольшие целые числа, дают приятное созвучие?»

Давайте рассмотрим, что происходит в мозге, когда звуки двух различных частот проигрываются одновременно. Тогда мы получаем два набора первичных нейронов, активно реагирующих с той же частотой, как и вибрация струны, породившая всю цепочку процессов. Эти первичные нейроны передают свой сигнал в глубины мозга «более высоким» уровням нейронов, где сигналы сочетаются и объединяются.

Некоторые из этих нейронов следующего уровня получают входящие сигналы от обоих наборов первичных возбужденных нейронов. Если частоты первичных нейронов соотносятся как небольшие целые числа, тогда их сигналы могут быть синхронизированы. (В этом обсуждении мы упрощаем реальный отклик, игнорируя шум и считая его в точности периодическим.) Например, если звуки формируют октаву, один набор нейронов будет колебаться в два раза быстрее другого и каждый нейрон из более медленной группы будет вступать в те же предсказуемые отношения с нейроном быстрой. Таким образом, нейроны, воспринимающие сигнал от обоих первичных наборов, получают вполне предсказуемый повторяющийся шаблон, который легко интерпретировать. Из предыдущего опыта (хотя, возможно, это врожденный инстинкт) эти вторичные нейроны – или более поздние нейроны, интерпретирующие их поведение, – «поймут» сигнал. Таким образом, для них становится легче предсказать будущие входящие сигналы (следующие повторы), а простые предсказания будущего поведения будут порождаться на протяжении многократных восприятий вибрации, пока звук не изменит свой характер.

Хочу отметить, что звуки, которые мы можем слышать, имеют частоты в пределах от нескольких десятков до нескольких тысяч колебаний в секунду, так что даже краткие звуки производят множество повторений, за исключением самых низкочастотных. На низких же частотах наше чувство гармонии иссякает, точно так же, как и эта мысль, которую я сейчас пытаюсь додумать.

Более высоким уровням нейронов, которые сочетают уже объединенные сигналы, нужен понятный входной сигнал, чтобы справиться со своей работой. Поэтому если наши «объединители» производят имеющий смысл сигнал и в особенности если их предсказания проходят проверку по времени, то в интересах нейронов более высокого уровня вознаградить их какой-либо положительной обратной связью или по крайней мере оставить в покое. И наоборот, если «объединители» производят неправильные предсказания, ошибки будут распространяться на более высокие уровни, немедленно породив дискомфорт и желание прекратить этот процесс.

Когда «объединители» будут производить неверные предсказания? Это произойдет, когда первичные сигналы почти, но не совсем синхронизированы. В этом случае колебания будут усиливать друг друга в течение нескольких циклов, и «объединители» проэкстраполируют эту модель. Они будут ожидать, что она продолжится, но этого-то и не произойдет! И в самом деле, звуки, которые только слегка различаются

(как до и до-диез, например), особенно неприятны, если проигрываются вместе.

Если эта идея правильна, тогда в основе гармонии лежит успешное предсказание на ранних стадиях восприятия. (Этот процесс предсказания не нуждается и обычно не сопровождается привлечением сознательного внимания.) Успех в нем воспринимается как удовольствие или красота. Напротив, неудачное предсказание – источник боли или ощущения безобразия. Отсюда следует, что, расширяя наш опыт и знания, мы можем услышать гармонию, которая раньше была скрыта от нас, и избавиться от источников боли.

В историческом развитии западной музыки набор приемлемых комбинаций звуков постепенно расширялся. Отдельные люди при повторяющемся воздействии незнакомых им ранее мелодий также могут научиться наслаждаться сочетаниями звуков, которые изначально показались им неприятными. В самом деле, если мы заточены под то, чтобы получать удовольствие, *учась* делать удачные предсказания, тогда предсказания, давшиеся нам слишком легко, не доставят нам того огромного удовольствия, которое и должно быть в новизне.

## **Платон I: Структура из симметрии – платоновы тела**

Платоновы тела поддерживают вокруг себя какую-то магию. Они всегда были и остаются теми объектами, с которыми можно творить волшебство. Они уходят корнями глубоко в доисторическую пору человечества и живут сейчас как предметы, сулящие удачу или неудачу в самых известных настольных играх, в частности в знаменитых «Подземельях и драконах». Кроме того, их таинственная сила вдохновила ученых на некоторые из самых плодотворных открытий в развитии математики и физики. Их невыразимая красота достойна того, чтобы поглубже сконцентрироваться на них.

Альбрехт Дюрер на своей гравюре «Меланхолия I» (илл. 4) подразумевает очарование правильных многогранников, хотя тело, изображенное на его картине, не вполне платоново. (Технически это усеченный треугольный трапецоэдр. Он может быть получен растягиванием граней октаэдра определенным образом.) Возможно, Крылатый Гений впал в меланхолию, потому что не может вникнуть, почему злобная летучая мышь сбросила ему в кабинет именно это, не вполне платоново тело вместо правильной фигуры.



Илл. 4. Альбрехт Дюрер «Меланхолия I»

На картине изображено усеченное платоново тело, магический квадрат и множество других эзотерических символов. С моей точки зрения, она прекрасно показывает досаду, которую я часто испытываю, пытаюсь с помощью чистой идеи понять реальность. К счастью, так бывает не всегда.

## Правильные многоугольники

Прежде чем перейти к платоновым телам, давайте начнем с чего-нибудь попроще – с их самых близких аналогов в двух измерениях, а именно с правильных многоугольников. Правильный многоугольник – это плоская фигура, у которой все стороны равны и смыкаются под равными углами. Самый простой правильный многоугольник имеет три стороны – это равносторонний треугольник. Далее идет квадрат с четырьмя сторонами. Затем – правильный пятиугольник, или пентагон (который был выбран символом пифагорейцев и взят за основу в проекте хорошо известной штаб-квартиры вооруженных сил<sup>[9]</sup>), шестиугольник (часть пчелиного улья и, как мы увидим далее, графена<sup>[10]</sup>), семиугольник (его можно найти на различных монетах), восьмиугольник (знаки обязательной остановки), девятиугольник... Этот ряд можно продолжать бесконечно: для каждого целого числа, начиная с трех, существует уникальный правильный многоугольник. В каждом случае количество вершин равно количеству сторон. Мы также можем рассматривать круг как предельный случай правильного многоугольника, где число сторон становится бесконечным.

Правильные многоугольники, в некотором интуитивном смысле, могут приобрести значение идеального воплощения плоскостных «атомов». Они могут служить как концептуальные атомы, из которых мы можем составлять более сложные построения порядка и симметрии.

## Платоновы тела

Теперь перейдем от плоских фигур к объемным. Для максимального единообразия мы можем обобщать понятие правильного многогранника различными способами. Самый естественный из них, который оказывается наиболее плодотворным, ведет к платоновым телам. Мы говорим об объемных телах, грани которых являются правильными многоугольниками, все одинаковы и одинаково смыкаются в каждой вершине. Тогда вместо бесконечного ряда решений мы получим ровно пять тел!



Илл. 5. Пять платоновых тел – волшебных фигур

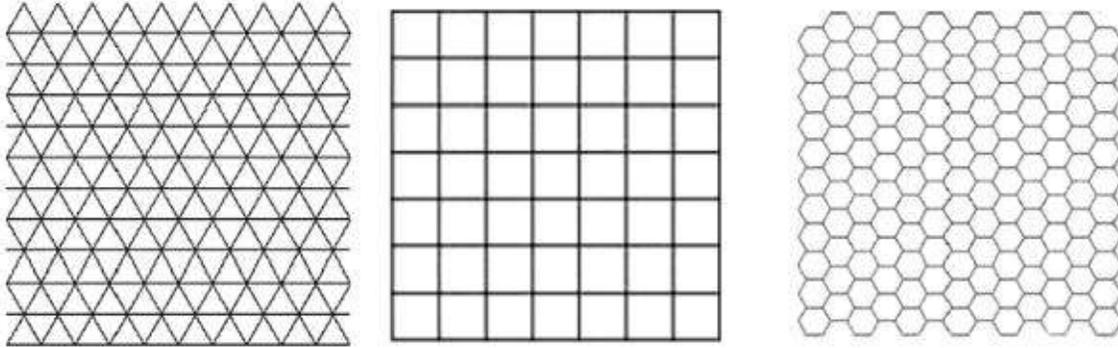
Пять платоновых тел – это:

- *тетраэдр* с четырьмя треугольными гранями и четырьмя вершинами, в каждой из которых сходится по три грани;
- *октаэдр* с восемью треугольными гранями и шестью вершинами, в каждой из которых сходится по четыре грани;
- *икосаэдр* с 20 треугольными гранями и 12 вершинами, в каждой из которых сходится по пять граней;
- *додекаэдр* с 12 пятиугольными гранями и 20 вершинами, в каждой из которых сходится по три грани;
- *куб* с шестью квадратными гранями и восемью вершинами, в каждой из которых сходится по три грани.

Существование этих пяти многогранников легко понять, без особых трудностей можно и сконструировать их модели. Но почему их только пять? (Или есть еще другие?)

Чтобы разобраться с этим вопросом, заметим, что вершины тетраэдра, октаэдра и икосаэдра объединяют три, четыре и пять треугольников,

сходящихся вместе, и зададим вопрос: «Что произойдет, если мы продолжим и их будет шесть?» Тогда мы поймем, что шесть равносторонних треугольников, имеющих общую вершину, будут лежать на плоскости. Сколько ни повторяй этот плоский объект, он не позволит нам построить законченную фигуру, ограничивающую некий объем. Вместо этого фигура будет бесконечно распространяться по плоскости, как показано на илл. 6 (слева).



**Блудные сыновья Платона**

Илл. 6. Три бесконечных платоновы поверхности

На рисунке показаны только конечные их части. Эти три правильных замещения плоскости могут и должны восприниматься как родственные платоновым телам – их блудные братья, которые отправились в паломничество и никогда не вернутся.

Мы получим такие же результаты, если совместим четыре квадрата или три шестиугольника. Эти три правильные сечения на плоскости – достойные дополнения к платоновым телам. Далее мы увидим, как они воплощаются в жизнь в микромире (илл. 29).

Если мы попытаемся совместить более шести равносторонних треугольников, четырех квадратов или трех любых бóльших правильных многоугольников, нам не хватит места и мы просто не сможем разместить вокруг вершины их суммарный угол. И поэтому пять платоновых тел – это все конечные правильные многогранники, которые могут существовать.

Знаменательно, что определенное конечное число – пять – появляется из соображений геометрической правильности и симметрии. Правильность и симметрия – это естественные и прекрасные вещи для размышления, но у них нет очевидной или прямой связи с определенными числами. Как мы увидим, Платон интерпретировал этот сложный случай их возникновения удивительно творческим образом.

## Предыстория

Часто известным людям достается слава за открытия, сделанные другими. Это «эффект Матфея», обнаруженный социологом Робертом Мёртоном и основанный на строчках из Евангелия от Матфея:

Ибо каждому имеющему будет дано, и у него будет изобилие, а у неимеющего будет взято и то, что он имеет<sup>[11]</sup>.

Так случилось и с платоновыми телами.

В музее Ашмолин в Оксфордском университете<sup>[12]</sup> можно увидеть стенд с пятью резными камнями, изготовленными примерно в 2000 г. до н. э. в Шотландии, которые кажутся реализациями пяти платоновых тел (хотя некоторые ученые и оспаривают это). По всей видимости, они использовались в какой-то игре с костями. Можно представить, как пещерные люди собирались вокруг общего костра и резались в «Подземелья и драконы» эпохи палеолита. Вполне возможно, что не Платон, а его современник Теэтет (417–369 гг. до н. э.) первым математически доказал, что это эти самые пять тел – единственные возможные правильные многогранники. Не ясно, в какой степени Платон вдохновил Теэтета или наоборот, или в воздухе античных Афин витало что-то такое, что вдохнули они оба. В любом случае платоновы тела получили свое название, потому что Платон оригинально использовал их в работе гения, одаренного творческим воображением, чтобы провидческим образом создать теорию физического мира.



Илл. 7. Доплатоновские изображения платоновых тел, которые, возможно, использовались в играх с костями около 2000 г. до н. э.

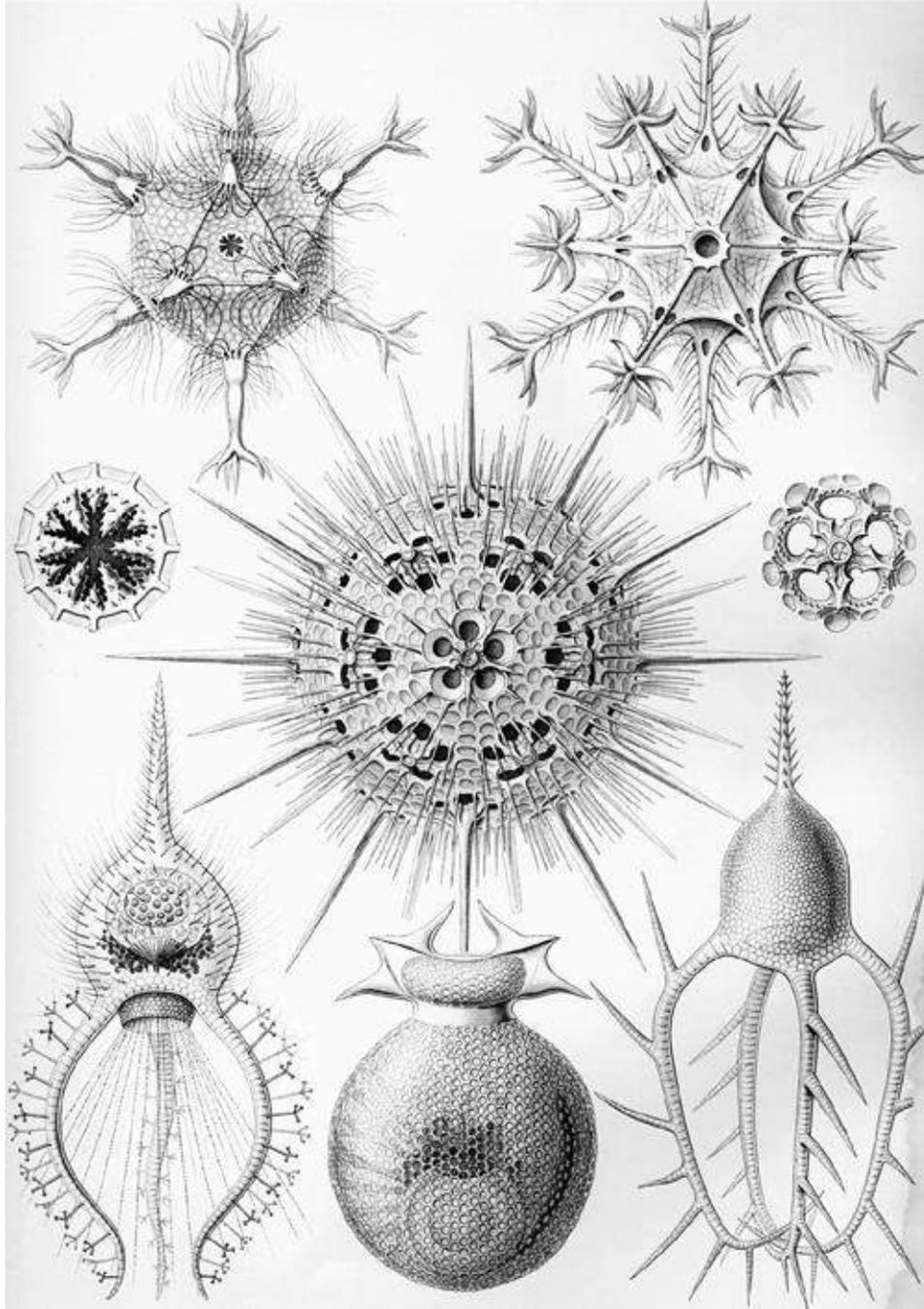
Заглянув в гораздо более далекое прошлое, мы понимаем, что некоторые простейшие создания биосферы, в том числе вирусы и диатомеи (не пары атомов, как можно было бы подумать из названия, а морские водоросли, которые часто отращивают вычурные панцири в виде платоновых тел), не только «открыли», но и буквально воплотили платоновы тела задолго до того, как на Земле появились первые люди. Вирус герпеса; вирус, который вызывает гепатит В; вирус иммунодефицита человека и вирусы многих других болезней имеют форму, напоминающую икосаэдр или додекаэдр. Они заключают свой генетический материал – ДНК или РНК – в белковые капсулы-экзоскелеты, которые определяют их внешние формы, как показано на цветной вклейке D. Капсулы маркированы цветом таким образом, что одинаковые цвета обозначают одинаковые «строительные блоки». В глаза бросается характерное для додекаэдра соединение трех пятиугольников. Но если провести прямые линии через центры синих областей, то мы увидим икосаэдр.

Более сложные микроскопические существа, в том числе радиолярии, которые любил изображать Эрнст Геккель в своей великолепной книге «Красота форм в природе», также воплощают в жизнь платоновы тела. На илл. 8 мы видим замысловатый кремниевый экзоскелет этих одноклеточных организмов. Радиолярии – древняя форма жизни, которую обнаруживают в самых ранних окаменелостях. Ими полны океаны

и сегодня. Каждое из пяти платоновых тел воплощается в некотором количестве биологических видов живых организмов. В названиях некоторых из них даже закрепились их форма, в том числе *Circoporus octahedrus*, *Circogonia icosahedra* и *Circorrhegma dodecahedra*.

### **Вдохновляющая идея Евклида**

«Начала» Евклида являются величайшим учебником всех времен, и другие книги им в этом не чета. Эта книга принесла в геометрию систему и строгость. Если посмотреть более широко, она ввела в область идей – путем практического применения – метод анализа и синтеза.



Илл. 8. Радиоларии становятся видимыми под объективом самого простого микроскопа. Их экзоскелеты часто демонстрируют симметрию платоновых тел.

Анализ и Синтез являются предпочтительной формулировкой «редукционизма» для Исаака Ньютона и для нас тоже. Вот что говорит Ньютон:

Путем такого анализа мы можем переходить от соединений к ингредиентам, от движений – к силам, их производящим, и вообще от действий – к их причинам, от частных причин – к более общим, пока аргумент не закончится наиболее общей причиной. Таков метод анализа, синтез же предполагает причины открытыми и установленными в качестве принципов; он состоит в объяснении при помощи принципов явлений, происходящих от них, и доказательстве объяснений<sup>[13]</sup>.

Эту стратегию можно сравнить с подходом Евклида к геометрии, где он начинает с простых, интуитивно понятных аксиом, чтобы потом вывести из них более сложные и удивительные следствия. Великие «Математические начала» Ньютона, основополагающий документ современной математической физики, тоже следуют показательному стилю Евклида, пошагово переходя от аксиом при помощи логических построений к более значительным результатам.

Важно подчеркнуть, что аксиомы (или законы физики) не говорят вам, что с ними делать. Собирая их вместе без всякой цели, легко создать большое количество ничего не значащих фактов, о которых скоро забудут. Это как пьеса или музыкальный отрывок, которые бредут как неприкаянные и не приходят никуда. Как обнаружили те, кто пытался приспособить искусственный интеллект для решения творческих математических задач, самое трудное в этом деле – определить цели. Имея в голове стоящую цель, становится легче найти средства, чтобы достичь ее. Я люблю печенье с предсказаниями, и раз мне попало самое удачное на свете печенье: изречение, которое я в нем нашел, великолепно подытоживает все сказанное:

Работа сама научит вас, как ее сделать.

И, конечно, для лучшего усвоения материала, для студентов и потенциальных читателей заманчиво иметь перед собой вдохновляющую цель. С самого начала на них производит глубокое впечатление понимание того, что они могут предвкушать ощущение удивительного трюка создания конструкции, которая неумолимо движется от «очевидных» аксиом к далеко не очевидным заключениям.

Итак, какова была цель Евклида в «Началах»? Тринадцатый и последний том этого шедевра завершается построением пяти платоновых тел и доказательством, почему их существует только пять. Мне приятно

думать – тем более что это вполне правдоподобно, – что Евклид думал об этом заключении, когда начинал работать над всей книгой и пока писал ее. В любом случае это подходящее и приносящее чувство завершенности заключение.

## **Платоновы тела как атомы**

Древние греки признавали в материальном мире четыре основные составляющие, или элемента: огонь, вода, земля и воздух. Вы, возможно, заметили, что количество элементов – четыре – близко к пяти, количеству правильных многогранников. Платон, разумеется, заметил! В его самом авторитетном, пророческом и непостижимом диалоге «Тимей» можно найти теорию элементов, основанную на многогранниках. Она состоит в следующем.

Каждый элемент состоит из атомов определенного вида. Атомы имеют форму платоновых тел: атомы огня – форму тетраэдра, атомы воды – икосаэдра, атомы земли – куба, атомы воздуха – октаэдра.

В этих утверждениях есть определенное правдоподобие. Они дают объяснения. Атомы огня имеют острую форму, что объясняет, почему прикосновение к огню болезненно. Атомы воды самые гладкие и круглые, поэтому они могут плавно обтекать друг друга. Атомы земли могут быть плотно прижаты друг к другу и заполняют пространство без пустот. Воздух, который может быть и горячим, и влажным, имеет промежуточную между огнем и водой форму атомов.

Хотя четыре и близко к пяти, но они не могут быть равны, поэтому полного совпадения между правильными многогранниками, рассмотренными как атомы, и элементами быть не может. Менее одаренный мыслитель был бы, возможно, обескуражен этой трудностью, но гениальный Платон не утратил присутствия духа. Он воспринял это как вызов и как возможность. Он предположил, что оставшийся правильный многогранник, додекаэдр, тоже сыграл свою роль в руках Творца-строителя, но не как атом. Нет, додекаэдр – это не просто какой-то атом, скорее, он повторяет форму самой Вселенной в целом.

Аристотель, который всегда старался превзойти Платона, предложил другую, более консервативную и последовательную теорию. Две главные идеи этих влиятельных философов состояли в том, что Луна, планеты и звезды, населяющие небесный свод, состоят из совершенно иной материи, чем та, которую мы можем найти в подлунном мире, и в том,

что «природа не терпит пустоты»; таким образом, небесное пространство не могло быть пустым. Эти рассуждения требовали существования пятого элемента, или квинтэссенции, отличающейся от земли, огня, воды и воздуха, чтобы заполнить небесный свод. Так додекаэдр нашел свое место в качестве атома квинтэссенции или эфира.

Сегодня трудно согласиться с деталями обеих этих теорий. Науке нет никакой пользы от того, чтобы анализировать мир в терминах этих четырех (или пяти) элементов. В современном представлении атомы – вовсе не твердые тела, и уж подавно они не имеют форму платоновых тел. Теория элементов Платона с сегодняшней точки зрения выглядит грубой и во всех отношениях безнадежно неверной.

## Структура из симметрии

Но хотя взгляды Платона провалились как научная теория, они были успешны как предсказание и, я бы сказал, как произведение интеллектуального искусства. Чтобы оценить концепцию в этом качестве, мы должны отойти от деталей и посмотреть на нее в целом. Глубинная, ключевая догадка в системе физического мира с точки зрения Платона состоит в том, что мир этот должен по большому счету воплощать в жизнь красивые понятия. И эта красота должна быть красотой особого рода: красотой математической правильности, идеальной симметрии. Для Платона, как и для Пифагора, эта догадка была в то же время верой, страстным желанием и основополагающим принципом. Они жаждали привести Разум в гармонию с Веществом, показав, что Вещество состоит из чистейших произведений Разума.

Важно подчеркнуть, что Платон поднялся в своих идеях над общепринятым уровнем философских обобщений своего времени, чтобы сделать определенные заявления о том, что же такое вещество. Его своеобразные, хотя и неправильные, идеи не попадают в позорную категорию «даже не ошибочно»<sup>[14]</sup>. Как мы уже видели, Платон даже сделал некоторые шаги в направлении сравнения этой теории с реальностью. Огонь обжигает, потому что у тетраэдра острые грани, вода течет, потому что икосаэдры легко перекатываются друг по другу, и т. д. В диалоге Платона «Тимей», где говорится обо всем этом, вы также найдете причудливые объяснения того, что мы бы назвали химическими реакциями и свойствами сложных (состоящих больше чем из одного элемента) веществ. Эти объяснения основаны на геометрии атомов. Но эти

напрасно потраченные усилия удручающе далеки от того, что мы при всем желании могли бы считать серьезным экспериментальным доказательством научной теории и еще дальше от использования научных знаний для практических целей.

И все же взгляды Платона в нескольких направлениях предвосхищают современные идеи, находящиеся сегодня на переднем крае научного мышления.

Хотя строительные «кирпичики» материи, которые предложил Платон, совсем не те, которые мы знаем сегодня, сама идея о том, что есть лишь немногие строительные элементы, существующие в множестве одинаковых копий, остается основополагающей.

Но даже если не принимать во внимание эту смутную вдохновляющую идею, более специфический принцип построения теории Платона – выделение *структуры* из *симметрии* – оставил свой след в веках. Мы приходим к небольшому числу особых структур из чисто математических соображений – соображений симметрии – и преподносим их Природе как возможные элементы ее строения. Тот вид математической симметрии, который избрал Платон, чтобы составить свой список составляющих элементов, весьма отличен от симметрии, которую мы используем сегодня. Но идея о том, что в основе Природы *лежит* симметрия, стала доминировать в нашем восприятии физической реальности. Умозрительная идея о том, что симметрия определяет структуру – т. е. что кто-то может использовать высокие требования математического совершенства, чтобы прийти к небольшому перечню возможных реализаций, а потом воспользоваться этим списком как руководством по построению модели мира, – стала нашей путеводной звездой на границах неизведанного, не нанесенных ни на одну карту. Эта идея почти кощунственна в своем безрассудстве, поскольку провозглашает, что мы можем разобраться, как действовал Мастер и точно узнать, как все было сделано. И, как мы увидим далее, она оказалась совершенно правильной.

Для того чтобы обозначить Творца физического мира, Платон использовал слово «демиург». Буквальное его значение – «мастер»; обычно его переводят словом «создатель», что не совсем верно. Это греческое слово Платон подобрал очень тщательно. Оно отражало его веру в то, что физический мир не является окончательной реальностью. Есть также вечный и вневременной мир Идей, которые существуют до какого-либо, с необходимостью несовершенного, физического воплощения и независимо от него. Беспокойный творческий ум – Мастер или Создатель – отливает

свои создания из идей, используя последние как формы.

«Тимей» – непростое для понимания произведение, и всегда остается соблазн принять неясность или ошибку за глубину. Осознавая это, я нахожу тем не менее интересным и вдохновляющим то, что Платон не останавливается на платоновых телах, но размышляет о том, что атомы в иных формах, подобно физическим объектам, в свою очередь могут быть составлены из более примитивных треугольников. Детали, конечно, «даже не ошибочны», но интуиция, призывающая рассмотреть модель серьезно, говорить на ее языке и раздвигать границы, в корне верна. Идея о том, что атомы могут иметь составные части, предвосхищает современное стремление анализировать все глубже и глубже. А идея о том, что эти составные части в нормальных условиях не могут существовать как отдельные объекты, а обнаруживаются только как части более сложных объектов, возможно, как раз и реализуется в сегодняшних кварках и глюонах, вечно связанных внутри атомных ядер.

Помимо всего прочего среди размышлений Платона мы найдем идею, которая является центральной в наших размышлениях, – идею о том, что мир в своей глубинной структуре воплощает Красоту. Это оживший дух умозаключений Платона. Он предполагает, что сама основа структуры мира – его атомы – это воплощения чистых идей, которые могут быть открыты и четко сформулированы одним лишь напряжением ума.

## Экономия средств

Возвращаясь к вирусам: где же они научились своей геометрии?

Это тот случай, когда простота приобретает вид сложности или, если быть более точным, когда простые правила определяют строение кажущихся сложными структур, которые по зрелом размышлении становятся идеально простыми. Суть в том, что ДНК вирусов<sup>[15]</sup>, которая должна нести в себе информацию обо всех аспектах их жизнедеятельности, очень ограничена в размерах. Чтобы сэкономить на длине строительного материала, стоит делать что-либо из простых идентичных частей, соединенных одинаковым образом. Мы уже слышали эту песню: «простые, идентичные части, одинаково соединенные» – и как раз в определении платоновых тел! Поскольку часть создает целое, вирусам не нужно знать о додекаэдрах или икосаэдрах, а только о треугольниках, да еще одно или два правила, чтобы соединить их вместе. Это только более разнородным, нерегулярным и на первый взгляд даже случайным телам –

таким как люди – требуются более подробные сборочные инструкции. Симметрия появляется как структура по умолчанию, когда информация и ресурсы ограничены.

## **Молодой Кеплер и музыка сфер**

Спустя два тысячелетия после Платона молодой Иоганн Кеплер услышал его призыв. Здесь в центре также оказалось число 5. Кеплер, один из самых первых и страстных почитателей идеи Коперника, поставившей Солнце в центр мироздания, попытался понять строение Солнечной системы. В то время было известно шесть планет: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер и Сатурн. Шесть, как вы увидите далее, – это очень близко к пяти. Совпадение? Кеплер так не думал. Что могло быть лучше для Творца, чем использовать в творческом созидании самые идеальные геометрические объекты?

Коперник, как и Птолемей, основывал свою астрономическую теорию на движении планет по окружностям. Это была еще одна ошибка красоты, одобренная (и во многом порожденная) Платоном и Аристотелем. Только самая идеальная фигура – окружность – могла быть достойна Творца. Предполагалось, что планеты держатся на небесных сферах. У Коперника и Птолемея были разные точки зрения по поводу того, где следует расположить центр этих сфер (Земля или Солнце), но оба, как и молодой Кеплер, считали их существование само собой разумеющимся. Таким образом, Кеплер полагал, что существует шесть великих сфер, в центре которых находится Солнце. Он задал себе вопрос: почему их шесть? И почему они имеют такие размеры, какие имеют?

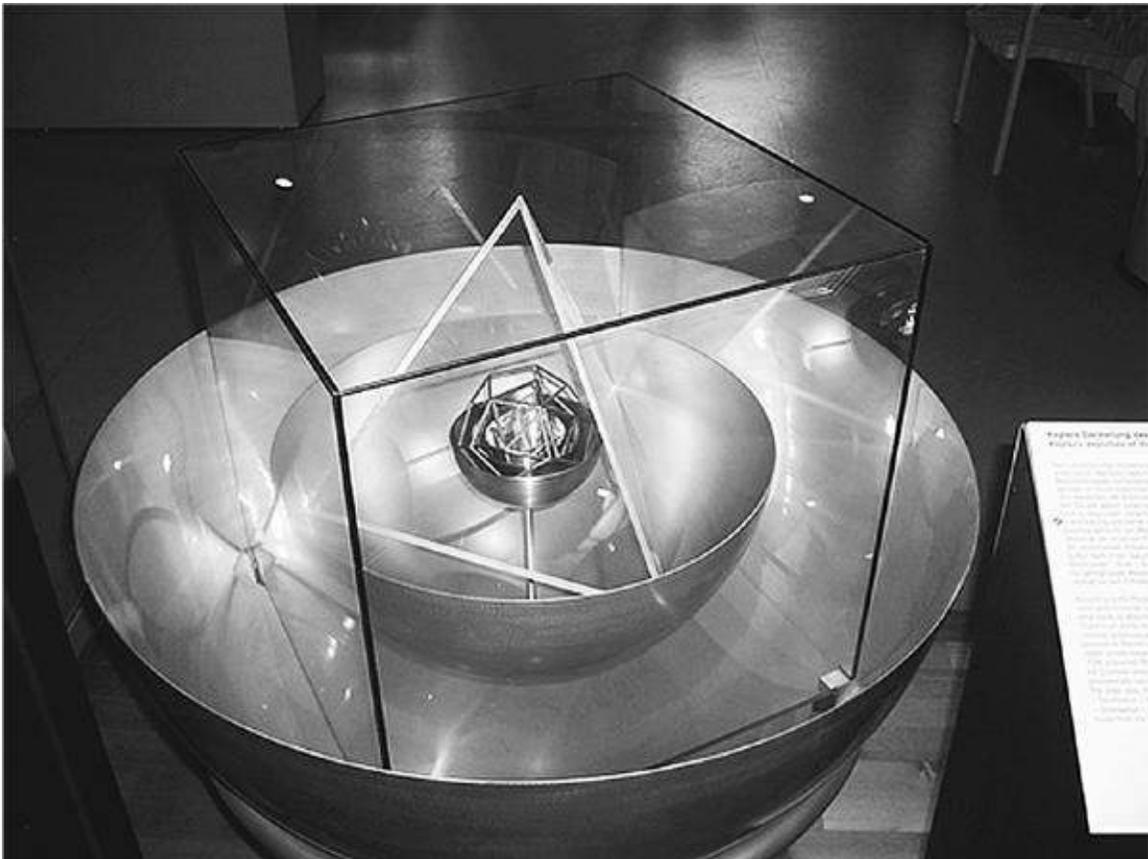
В один прекрасный день Кеплер, читая лекцию по введению в астрономию, увидел ответ. Можно описать некое платоново тело вокруг каждой из первых пяти сфер и вписать его в следующую! Таким образом, пять платоновых тел становятся посредниками между шестью сферами! Однако эта система заработает, только если сферы будут соответствующего размера. Значит, Кеплер мог предсказать относительные расстояния между различными планетами и Солнцем! Будучи убежденным, что он разгадал Божественный план, Кеплер объявил о своем открытии в восторженной книге «Тайна мироздания», полной высказываний вроде этого:

Я чувствую себя захваченным и одержимым невыразимым восторгом от божественного зрелища небесной гармонии.

Или этого:

Сам Господь был настолько добр, что стал тратить время попусту и начал играть в игру со знаками, посылая в мир признаки своего расположения; вследствие этого у меня есть шанс думать, что вся природа и благословенные небеса символически выражают искусство геометрии.

Это была действительно великолепная система, которую вы можете видеть на блистательно выполненной модели на илл. 9. Очевидно, Кеплер задал себе тот же Вопрос, что и мы, и решил, что нашел на него ответ. Мир действительно воплощает в себе Красоту, примерно так же, как предсказывал Платон. Он начал обсуждать в конкретных деталях природу музыки, возникающей при вращении этих небесных сфер, и написал партитуру!



Илл. 9. Платоновы тела вдохновили Кеплера создать модель, отражающую размер и форму Солнечной системы и представленную здесь. Планеты прикреплены к вращающимся небесным сферам, размер

промежутков между которыми контролируется с помощью поверхностей платоновых тел, размещенных между сферами как подмости.

Энтузиазм Кеплера помог ему пройти через жизнь, полную как личных, так и профессиональных поражений. Он жил неподалеку от центра вихрей политических и религиозных войн, которые проносились через Центральную Европу после Реформации. Его мать обвиняли в том, что она ведьма. И в результате честной, кропотливой работы по точному описанию движения планет, в которой Кеплер использовал свои собственные открытия, был получен результат, который опрокинул его юношеские мечты. Потому что планеты описывали не окружности, а эллипсы (Первый закон Кеплера), а Солнце находилось не в центре этих эллипсов (для особенно интересующихся: оно находится в одном из фокусов). В конце концов в более зрелом и точном портрете природы Кеплера была и более глубокая красота, но она очень отличалась от мечтаний молодости, и автору не довелось увидеть их воплощенными.

## Глубокие истины

Великий датский физик и философ Нильс Бор (1885–1962), один из основоположников квантовой теории и автор принципа дополнительности, который будет освещен далее в этой книге, был увлечен идеей, которую он называл «глубокая истина». Она иллюстрирует предположение Людвиг Виттгенштейна о том, что вся философия может (а возможно, и должна) быть выражена в форме шутки.

Согласно Бору, обыкновенные высказывания исчерпываются их буквальными значениями, и обычно противоположностью истинного высказывания является ложное высказывание. В то же время у глубоких высказываний значение скрыто под поверхностью. Вы можете опознать глубокую истину по ее характерной черте – противоположностью глубокой истины также является глубокая истина. В этом смысле трезвое замечание

Мир, увы, не организован в соответствии с математическими принципами, как предполагал Платон.

выражает глубокую истину. Поскольку противоположное также верно:

Мир организован в соответствии с математическими принципами, как догадался Платон.

## Тайная вечеря Дали

Мне кажется подходящим закончить этот раздел наших размышлений произведением современного искусства, в котором как бы играют его основные темы.

На цветной вклейке Е вы можете видеть шедевр Сальвадора Дали «Причастие последнего ужина»<sup>[16]</sup>, где содержится множество скрытых геометрических тем. Самое странное и поразительное из них – это появление нескольких больших, но прорисованных только частично пятиугольников, довлеющих над всей сценой. Кажется понятным, что вместе они должны составлять додекаэдр, который включает не только участников трапезы, но также и зрителя. Подразумевается, что мы должны вспомнить мысль Платона о том, что именно эта форма обрамляет всю Вселенную.

## Платон II: Выйти из Пещеры

Наш Вопрос о красоте частично зависит от взаимоотношений между физической реальностью и нашим восприятием этой реальности. Мы уже обсудили, как это происходит со слухом, а позже поговорим о зрении.

Но есть и другой подход к нашему Вопросу, в котором взаимоотношения устанавливаются между физической реальностью и реальностью подлинной. Однако вы, возможно, чувствуете себе неуютно (что вполне понятно) в связи с понятием подлинной реальности, поэтому давайте скажем проще: речь о том, как мы связываем глубинную природу физической реальности с нашими надеждами и мечтами. Что все это означает, если оно вообще что-то означает? Эти вопросы являются главными элементами в принятии (или неприятии) красоты мира, если мы поднимемся над уровнем первичного восприятия.

Очень давно Платон предложил кое-какие ответы на эти вопросы, основанные скорее на мистической интуиции и сомнительной логике, нежели на науке. Тем не менее они стали вдохновляющими идеями научных работ и продолжают ими быть. У нас будет много поводов оглянуться на них. Их влияние распространяется на науку, философию, искусство и религию. Альфред Норт Уайтхед писал:

Самая надежная характеристика европейской философской традиции – то, что она состоит из ряда примечаний к Платону.

Так давайте сейчас посетим платонову Пещеру, где мы найдем мистический ключ к его пониманию мира, спрятанный в воображаемых образах.

## Аллегория Пещеры

Платоновская аллегория Пещеры содержится в его самой весомой работе «Государство». Он вложил ее, как и множество других своих мыслей, в уста Сократа, своего глубокоуважаемого учителя. Сократ описывает Пещеру Главкону, старшему брату Платона, который тоже был учеником Сократа. Эта сцена и подбор персонажей подчеркивает особую важность Пещеры в размышлениях Платона.

Вот так он представляет ее:

**Сократ.** После этого, ты можешь уподобить нашу человеческую природу в отношении просвещенности и непросвещенности вот какому состоянию... Представь, что люди находятся как бы в подземном жилище наподобие пещеры, где во всю ее длину тянется широкий просвет. С малых лет у них на ногах и на шее оковы, так что людям не двинуться с места, и видят они только то, что у их прямо перед глазами, ибо повернуть голову они не могут из-за этих оков. Люди обращены спиной к свету, исходящему от огня, который горит далеко в вышине, а между огнем и узниками проходит верхняя дорога, огражденная, представь, невысокой стеной, вроде той ширмы, за которой фокусники помещают своих помощников, когда поверх ширмы показывают кукол<sup>[17]</sup>.

**Главкон.** Это я себе представляю.

**Сократ.** Так представь же себе и то, что за этой стеной другие люди несут различную утварь, держа ее так, что она видна поверх стены; проносят они и статуи, и всяческие изображения живых существ, сделанные из камня и дерева. При этом, как водится, одни из несущих разговаривают, другие молчат...

**Главкон.** Ты показал мне очень странный образ и очень странных узников.

**Сократ.** Таких же, как мы.

Суть здесь проста и ясна: узники видят только проекцию реальности, а не саму реальность. Поскольку им известна только проекция, они принимают ее как само собой разумеющееся. Это их мир. Но мы не должны чувствовать себя выше этих ввергнутых во мрак узников,

потому что, согласно Сократу (иначе говоря, Платону), наше собственное положение ничем не отличается. Слова «таких же, как мы» оглушают как удар грома.

Рассказ о Пещере, конечно, не доказывает эту позицию – это, в конце концов, только выдуманная история. Но она заставляет нас задуматься о логичной возможности того, что реальность больше того, что мы можем воспринять нашими органами чувств. И эта очень противоречивая история бросает нам вызовы: «Не принимай ограничений», «Пытайся найти способы увидеть вещи с разных сторон», «Сомневайся в своих чувствах», «Не доверяй авторитетам».

Платоново видение реальности, скрытой под покровом мира видимых явлений, красиво показано на цветной вклейке F, где вы видите космическую версию Пещеры.

Я должен отметить, что Платон как политический мыслитель был реакционером-утопистом. Он не считал, что его нарушающие привычный уклад идеи пригодны для всеобщего внедрения. Его призыв мыслить свободно не является рекомендацией для каждого, а только руководством для небольшой группы избранных хранителей, которые должны быть философами, ответственными за управление всем. По-видимому, лишь для них он и предназначал свои труды!

## **Видение вечности. Парадокс состояния покоя**

Восприятие Платоном действительности за видимостью объединяет два потока мысли. Мы уже углубились в один из них, в пифагорейское «все вещи есть числа». Как мы видели, несколько красивых открытий обеспечили поддержку этому кредо. Теория атомов Платона, которую мы обсуждали в предыдущей главе, была еще одной попыткой в том же духе (которой не хватало только доказательств или истинности).

Второй поток был по-настоящему философским в современном смысле. Это часть метафизики. (Интересно происхождение этого слова. Когда были собраны труды Аристотеля, о тех книгах, которые шли после «Физики», говорили по-гречески *tà metà tà φυσiká* – «то, что после физики», сокращенно – «метафизика». Главным вопросом этих сочинений были первоначала вещей. В метафизике такие темы, как бытие, пространство, время, знание и тождественность, рассматриваются не с помощью экспериментов и наблюдения, а с помощью чистого аргументирования, как в математике. Эти изысканные, хотя

и расплывчатые, интеллектуальные головоломки с тех пор и получили название метафизики.)

Вот типичный отрывок метафизических рассуждений, принадлежащий Пармениду и описанный Берtrandом Расселом, выдающимся философом и математиком XX в. Он объясняет, почему ничего никогда не может измениться (!):

Когда ты думаешь, ты думаешь о чем-то; когда ты используешь имя, это должно быть имя чего-то. По этой причине и мысль, и язык требуют объектов вне себя. И поскольку ты можешь думать о вещи или говорить о ней в то или иное время, все, о чем можно думать и говорить, должно существовать во все времена. Вследствие этого нет никаких изменений, поскольку изменения заключаются в вещах, вступающих в бытие или прекращающих быть.

Несмотря на эту неопровержимую логику, психологически не очень просто убедить кого-либо в том, что ничто никогда не меняется. Если изменение – это иллюзия, то достаточно убедительная.

Например, все выглядит так, как будто вещи движутся. Первый шаг в преодолении этой иллюзии – отвергнуть наивную веру в видимые явления. Ученик Парменида Зенон из Элеи был мастером таких диверсий. Он придумал четыре парадокса, которые должны были продемонстрировать, что наивная идея движения безнадежно запутана.

Самый известный из них – это парадокс об Ахилле и черепахе. Ахилл, великий герой «Илиады» Гомера, был известен как воин, славящийся не только своей силой, но и быстротой бега. Нам предлагается представить себе соревнование между Ахиллом и обыкновенной черепахой – чтобы говорить конкретно, возьмем, к примеру, дистанцию в 50 ярдов. Черепахе дается фора в десять ярдов. Можно ожидать, что Ахилл победит. «Неверно!» – говорит Зенон. Зенон указывает на то, что для того, чтобы обогнать черепаху, Ахилл должен вначале ее догнать. А с этим большая проблема – на самом деле бесконечно большая проблема. Предположим, что на старте черепаха находится в позиции А. Ахилл добегаёт до А, но за это время черепаха продвинется вперед до точки А'. Затем Ахилл достигает А', но черепаха уже переместилась в А''. Понимаете, к чему это ведет – сколько раз ни повторяй эту процедуру, Ахилл и в самом деле никогда не догонит черепаху.

Отрицание движения, как рекомендует Парменид, может быть

ошеломляющим. Но куда хуже принимать его, доказывает Зенон. Это не ошеломляет, а сводит с ума.

Бертран Рассел написал о Зеноне такие слова:

Он изобрел четыре доказательства, все безмерно искусные и запутанные, но неотесанность последующих философов сделала его просто искусным мошенником, а его доказательства – всего лишь софизмами. После двух тысяч лет постоянного опровержения эти софизмы были восстановлены в правах и стали основой математического ренессанса.

В самом деле, настоящий физический ответ Зенону появился только вместе с механикой Ньютона и заключающейся в ней математикой, как мы узнаем немного позже.

Сегодня в рамках квантовой теории кажется возможным согласиться с Парменидом и все равно отдать должное видимым явлениям. Изменение действительно может быть лишь видимостью. Я объясню это не вписывающееся ни в какие рамки явление до конца наших размышлений.

Но давайте продолжим наш рассказ и вернемся к историческому ходу событий.

## Идеал

По платоновской теории идеального существует два потока – пифагорейское восприятие гармонии и совершенства и неизменная реальность Парменида. Эти потоки текут вместе. (Теорию Платона обычно называют теорией идей, но я считаю, что «идеал» лучше подходит к тому, что Платон имел в виду, поэтому буду пользоваться этим словом.)

Идеалы – это совершенные объекты, а реальные объекты являются их несовершенными копиями. Так, например, существует Идеальный Кот. Настоящие животные – это коты до той степени, до которой они разделяют свойства этого Кота. Идеальный Кот, разумеется, никогда не умирает и не меняется каким-либо образом. Эта теория воплощает в себе метафизику Парменида: существует мир Идеалов, самый глубокий слой реальности, который вечен и неизменен и обеспечивает источник всего, что мы можем назвать или о чем можем говорить. И он строится по Пифагору: мы вступаем в близкий контакт с этим миром вечности, с совершенными Идеалами, когда оперируем математическими понятиями,

такими как числа или платоновы тела.

Существует третий, «подземный» поток, который, несомненно, питает теорию Идеалов. Это поток орфических культов. Можно сказать, что это был серьезный раздел греческой мифологии. Детали орфизма, в том числе его тайные ритуалы, были утрачены в ходе истории (такова судьба всех секретов!), и здесь они не должны нас заботить. Но в центре этих культов была доктрина бессмертия души, которая имела (и, конечно, все еще имеет) возвышенный эмоциональный посыл. «Википедия» описывает ее следующим образом:

Человеческая душа является божественной и бессмертной, но обречена (на определенное время) проживать «горестный круг» следующих друг за другом телесных жизней через метемпсихоз или переселение душ.

Эти идеи очень изящно согласуются с теорией Идеалов. Каждый из нас в силу нашей природы имеет отношение к миру Идеалов. Часть, которая взаимодействует с ним, – это наша душа, и она вечна. Пока мы живем на Земле, наше внимание поглощено видимыми явлениями и если мы не выйдем за их пределы, то будем лишь смутно сознавать Идеалы, а наши души будут дремать. Но с помощью философии, математики и солидной порции мистицизма (таинственные церемонии орфических культов) мы можем пробудить их. Пещера существует, но существует и выход из нее.

## Освобождение

Платон так описывает процесс освобождения:

**Сократ.** Когда же с кого-нибудь из них снимут оковы, заставят его вдруг встать, повернуть шею, пройтись, взглянуть вверх – в сторону света, ему будет мучительно выполнять все это, он не в силах будет смотреть при ярком сиянии на те вещи, тень от которых он видел раньше. Не решит ли он, что эти тени являются более настоящими, чем те предметы, которые теперь показывают ему?

**Главкон.** Гораздо более настоящие.

**Сократ.** Тут нужна привычка, раз ему предстоит увидеть все то, что там, наверху. Начинать надо с самого легкого: сперва

смотреть на тени, затем на отражения в воде людей и различных предметов, и уж потом – на самые вещи; при этом то, что на небе, и самое небо ему легче было бы видеть не днем, а ночью, т. е. смотреть на звездный свет и Луну, а не на Солнце и его свет?

**Главкон.** Конечно.

Достоинно внимания, что Платон (через Сократа) описывает освобождение как активный процесс, процесс обучения с вовлечением в него. Большое различие с гораздо более популярными, хотя, на мой взгляд, менее вдохновляющими идеями, где спасение приходит через внешнее прощение или самоотречение!

Если освобождение приходит через вовлечение в скрытую реальность, как мы можем достичь его? Здесь есть два пути, внутренний и внешний.

На внутреннем пути мы критически рассматриваем наши представления и пытаемся счистить с них налет пустой видимости, чтобы достигнуть идеального значения (иначе говоря, Идеала). Это путь философии и метафизики.

На внешнем пути мы принимаем видимые явления критически и пытаемся очистить их от усложнений, чтобы обнаружить скрытую сущность. Это путь науки и физики. Как мы и ожидали и как увидим далее, внешний путь действительно ведет к освобождению.

### **Избавление от проекции: глядя вперед**

В своих главных предчувствиях Платон был достаточно точен – на самом деле даже более точен, чем он мог знать. Наша естественно данная точка зрения на мир – это не что иное, как теневая проекция того мира, каков он есть на самом деле.

Наши несовершенные чувства воспринимают лишь мизерную часть образцов из рога изобилия информации, которую предоставляет мир. С помощью микроскопа мы открываем микромир, наполненный крошечными чуждыми существами, некоторые из которых дружелюбны, а другие – нет. Существует еще больше чуждых образований внутри материи, и они ведут себя по странным правилам квантовой механики. С помощью оптического телескопа мы открываем обширные пространства космоса, в сравнении с которым наша Земля кажется карликом, и находим обширные, темные, пустые (на вид) пространства, расцвеченные миллиардами миллиардов различных солнц и планет. С помощью радиоприемников мы можем «увидеть» невидимые излучения, которые

наполняют пространство, и заставить их служить нам. И так далее...

То, что верно для наших чувств, справедливо и для нашего сознания. Без тренировки и помощи оно не может делать верные суждения о богатстве реальности, которую мы знаем, не говоря уж о той, которую мы еще не знаем, – о неизведанной неизвестности. Мы ходим в школу, читаем книги, подключаемся к сети Интернет и используем различные гаджеты, компьютерные программы и другие приспособления, которые помогают нам привести сложные идеи в порядок, решить уравнения, управляющие Вселенной, и сделать видимыми их следствия.

Эта помощь органам чувств и воображению открывает двери восприятия, позволяя нам совершить побег из Пещеры.

## Поворот к оторванности от мира

Но Платон, ничего не зная о таком будущем, подчеркивает значение внутреннего пути. Здесь он объясняет почему:

**Сократ.** Соответственно, мы должны использовать роскошно изукрашенные небеса как примеры для иллюстрации наших теорий, как кто-нибудь мог бы использовать великолепные чертежи, сделанные хорошим художником, как Дедал. Знаток геометрии, увидев такие чертежи, восхитился бы их искусной обработкой и мастерством исполнения, но он и не мечтал бы изучить их целиком, ожидая, что все углы и длины точно соответствуют теоретическим данным.

**Главкон.** Это, конечно, было бы нелепо.

**Сократ.** Тогда настоящий астроном должен принять тот же взгляд на изучение движения планет. Он должен признать, что небо и все, что оно содержит, были созданы творцом настолько идеальными, насколько таковыми могут быть вещи. Астроном не будет представлять, что эти видимые, материальные изменения будут продолжаться вечно без малейшего изменения или нерегулярности, и тратить свои силы, пытаясь найти в них идеальную точность.

**Главкон.** Теперь, когда ты говоришь таким образом, я согласен.

**Сократ.** Таким образом, если мы намерены изучать астрономию путем, который принесет истинную пользу природному интеллекту души, мы должны изучать ее как геометрию, работая над математическими задачами и не тратя время на наблюдение неба.

Мы можем подытожить этот односторонний диалог словом «неравенство». Он попросту утверждает, что Реальное не ровня Идеальному. Реальное гораздо меньше

*Реальное < Идеального.*

Мастер, который творит физический мир из мира Идеалов, – это художник, причем хороший. При этом Мастер – это и бездарный копиист, чьи творения отражают несовершенство доступных материалов. Мастер рисует широкой кистью и размывает детали. Физический мир – это неполноценное изображение вечной реальности, к которой мы должны стремиться.

Другими словами, Платон рекомендует отвернуться от мира. Если твои теории красивы, но не точно согласуются с наблюдениями – что ж, тем хуже для наблюдений.

## **Два вида астрономии**

Почему Платон в поисках окончательной истины повернулся от физического мира внутрь? Без сомнений, частично причиной стало то, что он слишком любил свои теории и не мог смириться с их возможным провалом. Эта простая человеческая слабость известна и сейчас – она повсеместно распространена в политике, общепринята в социальных науках и иной раз встречается даже в физике.

Но частично истоком его рассуждений стало изучение природы, а именно – астрономии, темы приведенного выше диалога.

Ведение точного календаря было важным для государств Древнего мира, чья экономика основывалась на сельском хозяйстве, а особенно там, где оно было связано с ирригационными системами. Также оно было важно, причем не случайно, для религиозных целей, потому что ритуалы были расписаны по времени, чтобы получить содействие богов в посадке растений или сборе урожая. Для всего этого требовалась астрономия. Также она была нужна и для искусства предсказания будущего с помощью астрологии. Древние вавилоняне были очень искушены в предсказании времени астрономических событий, в том числе различного положения Солнца на закате и на восходе, равноденствий, солнцестояний, а также лунных и солнечных затмений. Их метод в принципе был прост и почти не зависел от теории. Они накопили столетия точных наблюдений, отметили регулярность (периодичность) в поведении светил и экстраполировали эту регулярность на будущее. Другими словами, они предполагали, что будущие циклы поведения небесных тел будут повторять их поведение в прошлом, поскольку такие повторы уже неоднократно наблюдались. Огромные наборы данных очень популярны сегодня, но основы этой концепции уходят очень глубоко в историю – ведь

это не что иное, как астрономический метод древних вавилонян.

Во времена, когда писал Платон, работы вавилонян входили в пору расцвета, и, скорее всего, он имел о них не более чем смутное представление. В любом случае их принцип «снизу вверх», нагруженность данными при слабости теоретической части полностью расходились с его целями и методами.

Для Платона, как мы уже видели, безгранично важной казалась человеческая душа, ее восхождение к мудрости, чистоте и совершенному Идеалу. Поэтому в создании теории движения планет самое важное, чтобы теория была красивой, пусть даже она не будет совсем точной. Основная цель – это определение Идеалов, которые вдохновили Мастера. Компромиссы, на которые ему пришлось пойти из-за несовершенного строительного материала, – это уже второстепенные соображения.

Главные, а также и самые простые, периодические циклы в астрономии – это регулярность смены дня и ночи, а также времен года, которые связаны с видимым движением звезд по небу и с видимой траекторией Солнца. Сегодня мы понимаем, что эти циклы связаны с суточным вращением Земли вокруг своей оси и ее годичным обращением вокруг Солнца. Поскольку оба вида движения достаточно близки к движению по окружности с постоянной скоростью, наблюдаемые явления могут быть описаны (с замечательной степенью приближения) чрезвычайно красивой теорией, а именно:

Самой идеальной геометрической фигурой является окружность. Будучи уникальной среди всех замкнутых фигур, окружность выглядит одинаково на всем своем протяжении. У любой другой фигуры различные части могут быть разными, и, таким образом, она может не быть так хороша со всех сторон и, следовательно, не может быть такой прекрасной вся в целом. Также самое идеальное движение – это движение по окружности с постоянной скоростью. Также такое движение настолько неизменно, насколько вообще может быть неизменным движение, потому что оно в каждый момент времени принимает одну и ту же форму.

Из всех этих рассуждений «сверху вниз» мы делаем вывод, что Идеал движения – это движение по окружности с постоянной скоростью. А когда мы смотрим на небо, мы обнаруживаем, что, комбинируя два таких идеальных движения, мы можем почти точно получить видимое движение Солнца и звезд.

Это, на первый взгляд, ошеломляющий успех. Полученный результат вполне в духе открытий Пифагора, отыскивающих скрытые численные и геометрические соотношения в музыкальной пьесе, звучащей в реальном

мире. Он превосходит предыдущие открытия в грандиозности и величии, потому что Солнце и звезды вышли прямо из рук Мастера, тогда как всего лишь простые люди-мастера создают музыкальные инструменты.

К сожалению, как только мы пытаемся пойти дальше этого первого достижения, все очень быстро запутывается. Оказывается, что видимое движение планет и Луны описать гораздо труднее. Иерархически организованный подход требует, чтобы мы рассматривали видимые явления с точки зрения Идеала движения (движения с постоянной скоростью по окружности). Астрономы-математики отвечали на это, гипотетически предполагая, что круговые орбиты планет сами движутся по круговым траекториям. Система все еще работала не очень хорошо, тогда они вводили новые круговые движения в движениях по окружности круговых орбит... При достаточном количестве и искусной организации этих циклов на циклах становилось возможным воспроизвести видимые явления. Но в таких сложных, нарочито искусственных системах терялось первоначальное обещание красоты и чистоты. Можно было получить или красоту, или истину, но не то и другое вместе.

Платон настаивал на красоте и был готов принести в жертву, а лучше сказать, сдать с потрохами точность. Это пренебрежение фактами, прикрытое гордыней, выдает глубинное отсутствие уверенности и в некотором роде изнурение. Это отказ от желания получить все сразу, сочетать законным браком красоту и точность, Реальное и Идеальное. Платон показал этот далекий от реального мира путь, а его ученики прошли по нему еще дальше. Влечение к отказу от мира в те темные времена понятно, если принять во внимание, что в мире была война, бедность, болезни и надвигался крах классической греческой цивилизации.

Аристотель, наследник и соперник Платона, в некотором роде был более истинным учеником Природы. Он и его ученики собирали информацию о биологических видах, проницательно наблюдали многие явления природы и записывали свои результаты честно и детально. К несчастью, из-за того, что в самом начале они сосредоточили свои усилия на очень сложных объектах и проблемах, Аристотель и его ученики упустили ясность и простоту геометрии и астрономии. Они не искали и даже не могли надеяться найти математические Идеалы среди этих искривленных ветвей Реального. Они уделяли особое внимание описанию и организации материала и не стремились ни к красоте, ни к совершенству. Когда последователи Аристотеля обратились к физике и астрономии, они точно так же ограничили свои устремления. В то время как более поздние (и более ранние) ученые требовали точных уравнений, они вполне

удовлетворялись расплывчатыми словесными описаниями.

## Объективная субъективность: проективная геометрия

Столетия спустя, в эпоху Возрождения, вновь создаваемая культура заново открыла Платона. Она выполнила его завет по поиску Идеалов, при этом отказавшись от отрицания реального мира.

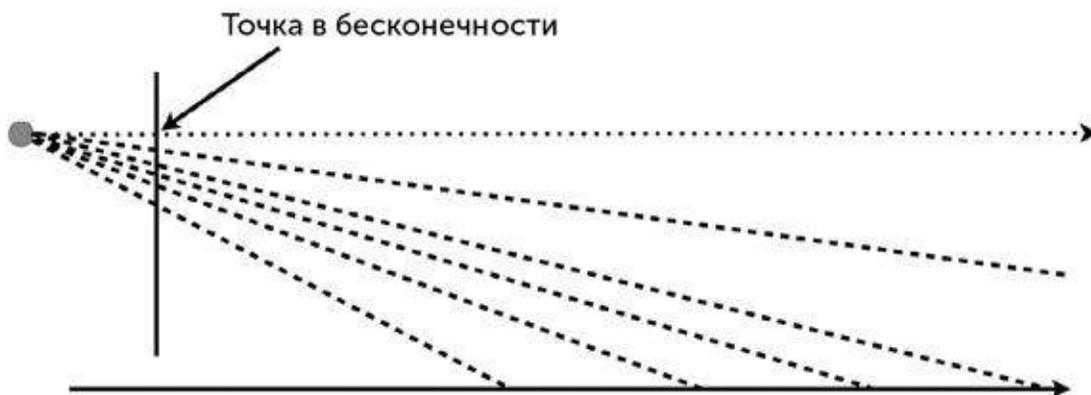
Художники и мастера – из числа людей – шли этим путем. Вызов, который они приняли, лежал в самой основе: как двумерное изображение может представить геометрию объектов в трехмерном пространстве? Это была реальная, практическая задача. Во времена, когда фотографии еще не существовало, а уже накапливались значительные личные состояния, заказчики хотели иметь картины, которые являлись бы постоянной летописью того, как они и их собственность выглядят в реальности.

На первый взгляд кажется, что в этом нет ничего общего с желанием Платона проникнуть сквозь видимую поверхностную сущность вещей в более глубокий слой реальности. Но все искусство художественной перспективы как раз и посвящено тому, как правильно передать видимое и поверхностное!

Есть, впрочем, некий смысл, в котором овладение видимостью вещей приближает нас к их сущности. Понимая, что одна и та же сцена может выглядеть по-разному в зависимости от точки зрения, с которой она передается, мы учимся отделять случайные элементы, зависящие от того, как посмотреть на вещь, от характерных особенностей самой вещи. Используя субъективность объективно, мы управляем ею.

Но довольно говорить абстрактно. Уже первые шаги в этой работе преподносят несколько восхитительных сюрпризов. Так давайте упростим задачу до ее основной сути, нарисовав сечения холста и ландшафта так, чтобы они выглядели как прямые линии (илл. 10).

Точки на нашем максимально упрощенном пейзаже – плоской горизонтальной поверхности, дающей в поперечном сечении прямую, – проецируют свет вдоль прямых линий к зрителю. Эти линии показаны пунктиром. Пройдя по ним до пересечения с холстом (место пересечения показано прямой вертикальной линией), мы определим, где различные точки пейзажа должны появиться на картине.



Илл. 10. Точки вдоль горизонтальной линии (пола) проецируются на участок прямой вдоль вертикальной линии (холста). Горизонтальная линия бесконечна, чего невозможно достичь в реальности, и тем не менее проецируется на реальную, конечную «точку бесконечности» на холсте.

Как вы можете видеть, точки, которые находятся дальше, проецируются на холст выше по вертикали. Но если мы будем рассматривать все более и более отдаленные точки, то, хотя они и будут на холсте располагаться одна над другой, промежутки между ними будут уменьшаться. Связывающие их лучи света достигают горизонтального предела, который на рисунке показан линией из точек. Эта линия не связана ни с какой реальной деталью ландшафта и тем не менее пересекает полотно в определенной точке.

Прямо на наших глазах на понятийном уровне происходит чудо – мы смогли поймать бесконечность! Когда мы смотрим на пейзаж, мы видим, что существует горизонт. Горизонт не существует в физической реальности, это – абстракция. Он представляет собой границу видимости и находится на бесконечном расстоянии. Тем не менее изображение линии горизонта на холсте, несомненно, реально. Это уникальная, особая точка – точка на бесконечности.

Дальнейшие чудеса ожидают нас после того, как мы возвратим и холст, и легший в его основу пейзаж (и равнину, и плоскость) в два измерения. Чтобы было проще, предположим, что холст и равнина перпендикулярны друг другу.

Теперь мы должны представить на пейзаже множество прямых линий. Каждая из них простирается до горизонта, и каждая проецирует соответствующую точку в бесконечности на холст. Тем не менее можно заметить, что параллельные линии на плоскости стремятся в одну и ту же

точку на линии горизонта. Это наглядно показано на илл. 11.



Илл. 11. Параллельные прямые на линии горизонта встречаются в «точке схода», как ее обычно называют. Как только вы один раз обратите внимание на это явление, будете замечать его повсюду вокруг себя.

Мы называем эту точку точкой схода семейства параллельных линий в перспективе. Если говорить языком, который подходит для описания холстов, то мы можем сказать, что параллельные линии сходятся в точке бесконечности.

Здесь мистическая поэзия воплощается в прямом описании художественной реальности.

Различные семейства параллельных линий сходятся в различных точках, которые все вместе определяют горизонт. Спроецированный на холст, горизонт дает горизонтальную линию, представляющую его как собрание точек на бесконечности. Иными словами, концептуальный горизонт проецируется на холст как вполне реальная линия, лежащая в бесконечности.

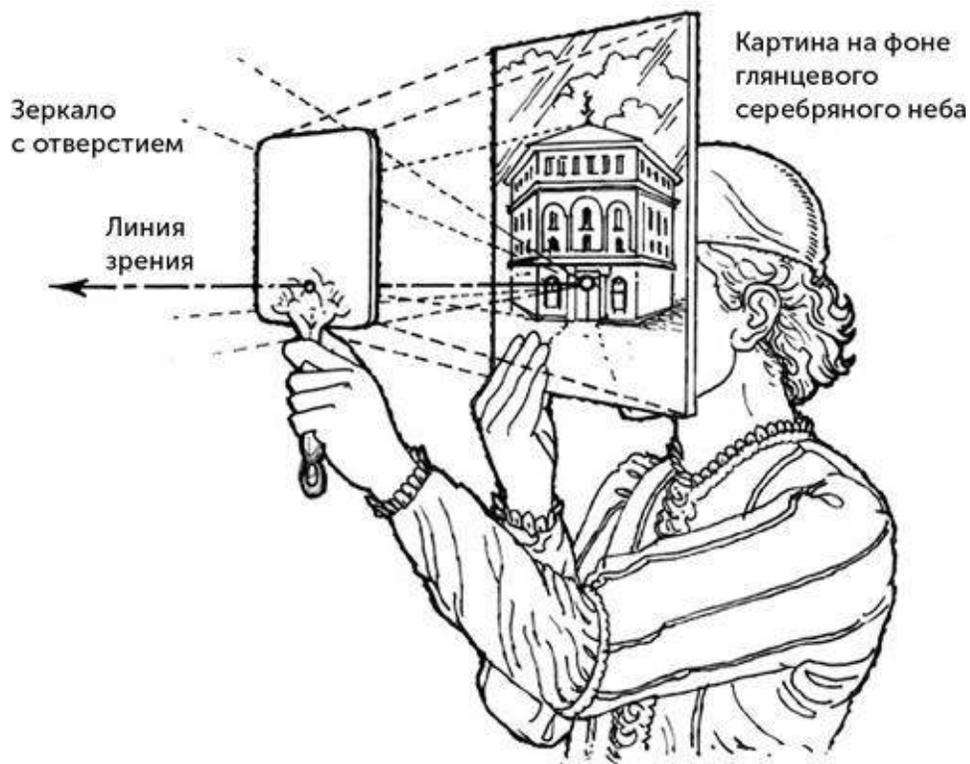
Открытия, подобные этому, одновременно наполняли радостью и силой Брунеллески, одного из первых художников-ученых-инженеров эпохи Возрождения. Он превратил эти прозрения в мощную технику

для создания реалистичных рисунков. Во время знаменитого эксперимента он использовал проективную геометрию, чтобы создать точное изображение того, как будет выглядеть баптистерий Сан-Джованни во Флоренции, если смотреть на него от входа в соседний собор, в то время только строящийся. Как показано на илл. 12, он сделал так, что зритель мог сравнить рисунок с настоящим баптистерием, отразив его в зеркале.

Изображение настоящего объекта появляется, если убрать зеркало, а для зрителя в рисунке оставлено небольшое отверстие.

Эта гениальная демонстрация произвела огромное впечатление на художников-современников, которые с энтузиазмом переняли технику Брунеллески и принялись ее энергично развивать. Вскоре роскошное пиршество перспективы породило такой шедевр, как «Передача ключей Святому Петру» Пьетро Перуджино (цветная вклейка G). Здесь перспектива играет активную роль, внося особое чувство порядка, гармонии и преклонения перед событием, основополагающим для Католической церкви. Эта фреска находится в Сикстинской капелле.

Нет лучше способа понять радость художника, открывшего перспективу и экспериментирующего с ней, чем разделить ее в одном из более простых творений. На цветной вклейке H я показал, как происходит процесс, благодаря которому вы можете в точной перспективе нарисовать пол, разделенный на квадраты, если посмотреть на него спереди и сверху, причем линии стремятся к бесконечно удаленному горизонту. Все, что вам нужно, – это карандаш, прямой край и ластик. (Под прямым краем имеется в виду линейка, на которой не нанесены метки расстояния. Разумеется, сгодится и обычная линейка – просто не обращайтесь внимания на деления!)



Илл. 12. Приспособление Брунеллески для сравнения рисунков, основанных на новом учении о перспективе, с реальностью

Процесс создания рисунка показан в верхней части вкладки. Мы проводим линию, отмеченную черным, – это будет горизонт. Начинаем с одного квадрата пола внизу, отмеченного синим. Конечно, рисовать квадрат не надо, поскольку мы смотрим на пол наискосок. Противоположные стороны «квадратов» после того, как будут продолжены, встретятся на линии горизонта, в точках схождения. Эти продолжения линий также показаны синим цветом. То есть начинаем мы вот с чего: одна плитка пола и линия горизонта. Трудность состоит в том, чтобы нарисовать все остальные одинаковые квадраты пола так, как они выглядели бы (в перспективе) для настоящего зрителя.

Самое главное наблюдение состоит в том, что диагонали квадратов также формируют семейство параллельных линий. Это семейство также сходится на линии горизонта, в своей собственной точке схождения. Мы можем продолжить красным цветом диагональ уже существующего квадрата, чтобы найти эту точку. А затем мы, обозначая новые линии оранжевым, вернемся назад уже от нее, чтобы отметить диагонали соседних квадратов! Найдя положения этих диагоналей, мы увидим,

что пересечения оранжевых и синих линий – это вершины соседних квадратов. Желтые линии через эти вершины и соответствующие точки схождения, таким образом, составят стороны квадратов. Теперь мы можем продолжать: пересечения желтых линий «сторон» с оранжевыми «диагоналями» – это вершины новых квадратов... Продолжать можно так долго, как вам нравится, пока вы не потеряете терпение, или не сточится карандаш, или ваши квадраты не достигнут размеров атомов.

Чтобы закончить построение, вы можете просто стереть диагонали и (по желанию) сделать все линии одного цвета, как на рисунке внизу. Перспективное сокращение на этом рисунке очень велико, как будто мы смотрим на пол с точки зрения муравья – очень близко и с малой высоты. Это сделано, чтобы подчеркнуть, насколько могут на вид отличаться равные фигуры, такие как эти квадраты. Конечно, вы можете взять книгу и посмотреть на рисунок в разных ракурсах – вы увидите различные видимые размеры квадратов, но сетка пересечений будет оставаться одной и той же.

Я делал это построение раз десять или больше и каждый раз все еще чувствую возбуждение, когда у меня получается этот пол из квадратных плит. Это маленький, но подлинный акт творения.

Я испытываю те же чувства, какими наслаждается любой Мастер.

Я нашел, что ощущение этих основных идей перспективы открыло мне глаза. Если формулировать более точно, эти идеи привели мои глаза в более близкий контакт с моим внутренним сознанием. Я часто (особенно часто в городской обстановке) нахожу множество наборов (физически) параллельных прямых, убегающих вдаль к различным точкам схода. Когда я готов к таким вещам, мой опыт расширяется и становится более живым. Я надеюсь, что вы увидите, как нечто подобное произойдет с вами. С помощью тренированного воображения мы выходим за пределы Пещеры невежественных ощущений.

### **Вопросы перспективы: относительность, симметрия, инвариантность, дополнительность**

Многие основные идеи современной фундаментальной физики совершенно незнакомы большинству людей. Они могут показаться абстрактными и неприступными, если представлять их обрывочно, в контекстах, отличающихся от их обычной среды обитания. По этой причине те из нас, кто пытается донести эти идеи до широкой аудитории,

часто используют метафоры и аналогии. Найти метафоры, которые подходят к первоначальным идеям и одновременно доступны для понимания, – трудная задача. А еще труднее сделать это таким образом, чтобы можно было судить об их красоте. За эти годы я много раз сталкивался с данной проблемой и сейчас счастлив представить решение, которое принесло мне настоящее чувство удовлетворения.

- *Проективная геометрия*, это художественное изобретение эпохи Возрождения, содержит не просто метафоры, но подлинные *модели* из галереи больших, изящных и невероятно плодородных идей.

- *Относительность* – идея о том, что один и тот же объект может быть правильно и без всяких потерь представлен многими различными способами. В этом смысле относительность является самой сущностью проективной геометрии. Мы можем нарисовать одну и ту же сцену с многих разных ракурсов. Мы по-разному расположим в каждом случае краски на холсте, но различные картины будут нести одну и ту же информацию об объекте, просто по-разному закодированную.

- *Симметрия* – это идея, близко связанная с относительностью, но внимание здесь больше направлено на объект, а не на наблюдателя. Например, если мы поворачиваем объект, который рисуем, то с любого определенного ракурса он будет выглядеть иначе. Но его проективное описание, т. е. вся совокупность видов со всех возможных перспектив, остается прежним (потому что художники могут перемещать свои мольберты, чтобы уравновесить вращение). Подводя итоги, можно сказать, что вращение объекта – это симметрия его проективного описания. Мы можем изменить объект, вращая его, не меняя его проективное описание. Как мы еще и еще подчеркнем в нашем дальнейшем повествовании, Изменение без Изменения – это сущность симметрии.

- *Инвариантность* – это противоположность относительности. Различные аспекты объекта при изменении перспективы могут быть представлены по-разному, но некоторые характерные черты остаются общими для всех этих представлений. Например, прямые линии объекта всегда, с любой перспективы будут выглядеть прямыми линиями (хотя их направление и положение на холсте будут различаться). Или если в объекте пересекается три прямые линии, то их образы будут встречаться в одной точке с любой перспективы. Черты, которые являются общими для всех представлений, называются инвариантами. Инвариантные качества чрезвычайно важны, потому что они определяют характерные черты предмета, которые сохраняются в любой перспективе.

- *Дополнительность* (комплементарность) – это усиление

относительности. Это один из глубинных принципов квантовой теории, но его важность как способа проникнуть вглубь вещей простирается далеко за границы физики. (Я полагаю, что дополнительность является гениальным метафизическим прозрением – и это на самом деле редкость.)

На самом простом уровне дополнительность означает, что в принципе может существовать множество различных точек зрения на некоторый объект, которые одинаково правомерны, но для того, чтобы наблюдать (или нарисовать, или описать) объект, вы должны выбрать только одну определенную точку.

Если бы на этом все заканчивалось, то дополнительность была бы небольшим частным случаем относительности. Новизна, которая появилась в квантовой теории, гласит, что в общем случае два квантовых портретиста не смогут нарисовать один и тот же объект в одно и то же время с разных ракурсов. Поскольку в квантовом мире мы должны принимать в расчет то, что наблюдение – это активный процесс, при котором нам приходится взаимодействовать с объектом.

Давайте, например, попробуем увидеть электрон. Чтобы это сделать, мы должны облучить электрон светом (или рентгеновскими лучами). Но свет передает электрону энергию и импульс и, следовательно, нарушает его местоположение, которое мы как раз и пытались определить!

Приняв необходимые предосторожности и совершив с электроном какие-либо необходимые манипуляции, мы можем провести наши измерения так, чтобы получить некоторые аспекты правильной информации о нашем объекте. Но другой информацией придется пожертвовать, поскольку она разрушается в процессе наблюдения. Сделав другие приготовления и предприняв другие предосторожности, мы сможем сделать иной выбор между тем, за чем наблюдать и чем пожертвовать, но самого этого выбора избежать не можем. Изображая квантовый мир, мы должны выбирать одну из всех возможных перспектив и работать, чтобы достичь ее. Если другой художник также работает, совершая манипуляции с нашим электроном своим собственным способом и преследуя свои цели, он исказит наше видение и уничтожит наш портрет, а мы уничтожим его рисунок.

Более сложная формулировка дополнительности, которая выводит ее за пределы относительности, звучит так: существует множество одинаково достоверных точек зрения на один и тот же объект – их можно назвать перспективами в общем смысле этого слова, – но они взаимоисключают друг друга. В квантовом мире мы можем реализовать только одну перспективу в единицу времени. Квантовый кубизм существовать не может.

Эти великие идеи – относительность, симметрия, инвариантность, дополнительность – сочетаются в сердце современной физики. Они должны бы находиться и в центре современной философии и религии, но этого пока нет. Во всех этих контекстах они иногда появляются в чуждых и абстрактных формах, которые могут сбить с толку. В такой ситуации вспомните о чудесном средстве – мысленно вернитесь к проективной геометрии, где вы сможете вновь увидеть их воплощенными в материальных, прекрасных художественных образах.

## Ньютон I: Метод и сумасшествие

Классическая научная революция была не единичным историческим событием, а насыщенным периодом, продолжающимся примерно с 1550-х по 1700-е гг. Этот период был отмечен огромным прогрессом во многих областях, но прежде всего – в физике, математике и астрономии. Энергия и любопытство, а также изобретения художников-инженеров, таких как Филиппо Брунеллески и Леонардо да Винчи, предвосхитили ее дух, но обычно историю научной революции отсчитывают от публикации сочинения «О вращении небесных сфер» (*De revolutionibus orbium coelestium*). В нем Коперник выдвинул серьезные аргументы, основанные на математическом анализе астрономических наблюдений и доказывающие, что Земля – не центр Вселенной и не неподвижна, а является вращающимся спутником Солнца. Это заключение казалось обывательскому сознанию грубым надругательством, не говоря уж о космологических доктринах церкви, которые испытывали на себе значительное влияние Платона и Аристотеля. Но от математики никуда не денешься. Радикальные мыслители, которые решились основываться на ее точности, а не отвергать ее влияние, в конце концов восторжествовали. Революционные работы Галилея, Кеплера и Рене Декарта достигли высшей точки в синтезе Исаака Ньютона – интеллектуальной самобытности, на которой сконцентрирована эта часть нашего размышления.

## Анализ и Синтез

Если не считать большого количества конкретных открытий, научная революция была революцией честолюбия и, если смотреть глубже в суть, вкуса. Новых мыслителей не удовлетворяло обобщенное описание реального мира с высоты птичьего полета в стиле Аристотеля. При всем уважении к птицам им, помимо этого, требовался и взгляд муравья. Ученые больше не отвергали никаких деталей, чтобы приспособить реальность под какие-нибудь построения возвышенного разума, как это было у Платона. Им требовалось наблюдение, измерение и точное описание с использованием геометрии, уравнений и систематического использования математики везде, где это возможно.

Ньютон изложил основу новых взглядов в следующих строках:

Как в математике, так и в натуральной философии изучение трудных вещей с помощью метода Анализа должно всегда предшествовать методу Построения... С помощью такого Анализа мы можем перейти от сложных веществ к отдельным ингредиентам и от движения к силам, производящим его... А Синтез состоит в предположениях о причинах открытого, выдвигании общих положений, с их помощью объяснении явлений, вызванных ими, и доказательстве объяснений.

Так давайте более полно разовьем это мощное положение и расширим его контекст.

## Требуемая точность

Муравью приходится заботиться о том, чтобы тщательно изучить топографию какой-либо местности, тогда как птица проносится по практически свободному небу. Муравей, глазеющий в небо, набредет на препятствие на дороге или упадет в яму, а птица, которая разглядывает детали поверхности, в конце концов наткнется на скалу. Подобно этому существует и противоречие между целями *точности* и *охвата* – между тем, чтобы, с одной стороны, говорить только правду и, с другой, иметь возможность сказать о многом.

Ранее мы обсудили сделанный Платоном выбор: отказаться

от точности и преследовать широту охвата. Для него это решение было осознанным, вызванным надеждой открыть с помощью интеллектуальных и духовных упражнений лучший мир, несовершенной копией которого является наша реальность. Пифагор открыл чудесные, но субъективно воспринимаемые, а следовательно, лишенные определенности законы музыкальной гармонии. В астрономии, как выяснилось, были зашифрованы ясные, но не совсем точные законы, о чем мы уже говорили. Только сами законы математики – наше окно в мир Идеалов – с точки зрения Платона, могли быть определенными и несомненно правильными одновременно.

Эти трения между Реальным и Идеальным достигло уровня оруэлловского двоемыслия<sup>[18]</sup> в работах предшественника Ньютона Иоганна Кеплера. Мы уже упоминали страстное увлечение молодого Кеплера моделью Солнечной системы, основанной на платоновых телах. Хотя она была в той же степени (полностью) неверна, как и размышления Платона в «Тимее», но с точки зрения науки концепция Кеплера достигла нового уровня. Ведь Кеплер, в отличие от Платона, пытается быть одновременно точным и мыслить конкретно. Сфера Меркурия поддерживает описанный вокруг нее октаэдр, который вписан в сферу Венеры. Потом идут икосаэдр, додекаэдр, тетраэдр и куб, вставленные, соответственно, между Венерой и Землей, Землей и Марсом, Марсом и Юпитером и, наконец, между Юпитером и Сатурном. Эта схема дает конкретные численные предсказания относительного размера орбит планет, которые Кеплер сравнивал с данными наблюдений. Согласие между ними не было точным, но достаточно близким, чтобы убедить Кеплера, что он на правильном пути. Воодушевленный этим, он смело взялся оттачивать свою модель и сравнивать ее с более точными данными, чтобы более ясно обозначить Музыку сфер.

Так модель Кеплера стала началом его воспетой в легендах карьеры астронома. Его тщательные вычисления привели к открытию закономерностей в орбитах планет – его знаменитых трех законов движения планет, которые на самом деле были точны. Законы движения планет Кеплера сыграли центральную роль в небесной механике Ньютона, что мы обсудим в главе «Ньютон III».

Кеплер наслаждался этими своими открытиями и просто гордился ими, хотя они неизбежно разрушали основание его собственной прекрасной системы небесных сфер, поддерживаемых платоновыми телами. Пытаясь отдать должное изысканно точным наблюдениям Тихо Браге, Кеплер открыл, что орбита Марса является вовсе не круговой, а эллиптической. Прощайте, небесные сферы!

Своей собственной работой Кеплер разрушил концептуальную основу своей модели, а ее приблизительное согласование с наблюдениями не выдержало проверки более точными данными. Но Кеплер так полностью и не отказался от своей идеальной системы. Позже, в 1621 г., он подготовил расширенное издание «Тайны мироздания». Там правильные законы появляются в сносках, сопровождая текст как холодный перекрестный допрос, который избличает свидетеля, склонного к фантазиям. Символ или модель? Амбиции или точность? Отказавшись выбрать что-то одно, Кеплер снова впал в платоновское искушение поставить свой теоретический Идеал выше противоречащей ему реальности.

Для Ньютона этот разрыв уже был однозначным. Теории, которые не описывают реальность, для него являются только гипотезами, и они находятся за пределами дозволенного.

Всё же, что не выводится из явлений, должно называться гипотезой; гипотезам же метафизическим, физическим, механическим или основанным на скрытых свойствах, не место в экспериментальной философии.

И описание, которое дает теория, должно быть точным. Историк и философ науки Александр Койре считал это *повышение стандартов* самым революционным достижением Ньютона, ставшим краеугольным камнем научной революции:

Чтобы положить конец миру «более или менее», миру качеств и чувственного восприятия, миру высокой оценки нашей повседневной жизни и заменить его (архимедовой) вселенной точности, тщательных измерений, строгой определенности.

Этих высоких стандартов реализма и точности не так просто добиться! Платон провозгласил, что они взаимно исключают друг друга, и на практике даже Кеплеру приходилось удовлетворяться или одним, или другим. Ньютон в своих работах по свету и механике показал, что таких стандартов можно достичь, – и таким путем создал модели, настолько совершенные теоретически, что мы, его последователи, вдохновляемся ими по сей день. Чтобы добиться этих стандартов, нужно сдерживать свои преждевременные амбиции, что признавал Ньютон:

Объяснить всю природу – слишком трудная задача для одного человека или даже для любой отдельной эпохи... Лучше сделать немного, но с уверенностью, и оставить остальное другим, тем, кто придет после тебя, чем объяснить всё, делая предположения и не будучи уверенным ни в чем.

## **Взращивание амбиций**

И все-таки сам Ньютон был в высшей степени честолюбив. Его любопытство распространялось во многих направлениях, и в огромном количестве его записей можно найти гипотезы, касающиеся всего на свете. Читать Ньютона – это опьяняющее и в то же время утомительное занятие, поскольку идеи – очень остроумные и яркие – появляются одна за другой. Он проводил обширные наблюдения, касающиеся действия ферментов, мышечных сокращений и трансформаций веществ, отмеченных в древних текстах по алхимии и в современных – по химии.

Чтобы согласовать свое честолюбие со своими требованиями строгости, Ньютон использовал два основных способа. Один из них был методом интеллектуальной работы, другой – уловкой в ее представлении.

Мне нравится думать о его методе как о процессе отбора – о чем-то вроде дарвиновской борьбы за выживание в мире идей. Ньютон всегда пытался задействовать свои предположения, выводя из них следствия, которые мог сравнить с наблюдениями. Некоторые проходили это испытание или оставляли жизнеспособное потомство, тогда как другие вымирали.

В записях Ньютона очень много идей, которые окончились крахом и никогда не были опубликованы. Его известное заявление:

Не знаю, чем я могу казаться миру, но сам себе я кажусь только мальчиком, играющим на морском берегу, развлекающимся тем, что от поры до времени отыскиваю камешек, более цветистый, чем обыкновенно, или красивую раковину, в то время как великий океан истины расстилается передо мной неисследованным<sup>[19]</sup>.

часто воспринимают как демонстрирующее подобающую ему скромность. Я так не думаю. Ньютон не был скромным человеком, но он был честным. Уж кто-кто, а он знал, сколько идей оставил на столе нетронутыми.

Другие его предположения выживали, но не были достаточно успешными, чтобы соответствовать стандартам, которые декларировал Ньютон. Их он тайно протаскивал на публичное обозрение с помощью одного трюка.

Этот трюк Ньютона очаровывает своей прозрачностью. Он просто ставит знак вопроса в конце положения. Таким образом они становятся не утверждениями, не гипотезами, а только вопросами. Последняя научная работа Ньютона – это на самом деле набор из 31 вопроса, который он присоединил к последнему изданию «Оптики».

Первые вопросы, короткие, провокационные, обычно сформулированы с отрицанием. Вот, например, первый из них:

Не действуют ли тела на свет на расстоянии и не изгибают ли этим действием его лучей; и не будет ли это действие сильнее всего на наименьшем расстоянии?<sup>[20]</sup>

Этот вопрос, как и многие другие, был на самом деле темой для исследования. И, как и многие другие, он оказался достаточно плодотворным. Мы можем прочитать в нем предвидение искривления солнечного света и света, исходящего от далеких галактик, – значительного открытия, сделанного физиками в XX в.

Хотя, кажется, сам он не разрабатывал эту проблему детально, несложно приложить закон всемирного тяготения Ньютона к свету, рассматривая свет, как это всегда делал Ньютон, как состоящий из материальных частиц. При таком рассмотрении орбиты частиц света приобретут такие же формы, как и орбиты планет, которые имеют ту же скорость. (Сила притяжения пропорциональна массе, а сила в общем равна массе, умноженной на ускорение. Таким образом, при расчете отношения ускорения вследствие гравитации масса в числителе и знаменателе сокращается.) Ньютон знал об астрономическом определении скорости света Оле Рёмером и ссылался на него в «Оптике», где упоминал, что свету требуется от семи до восьми минут, чтобы пройти путь от Солнца до Земли. Следовательно, Ньютон имел возможность оценить, насколько Солнце может своим притяжением искривлять путь света. Это очень небольшой эффект, который нельзя было измерить при помощи существовавшей во времена Ньютона техники. Эйнштейн вычислил это искривление лучей солнечного света – вначале упрощенно, как это мог бы сделать Ньютон, а затем, в 1915 г., используя свою новую общую теорию относительности, которая дала вдвое больший ответ. Его предсказания

были проверены международной экспедицией во время солнечного затмения 1919 г., когда удалось зарегистрировать сдвиг в расположении близлежащих к диску Солнца звезд. Успех этой экспедиции, которая ознаменовала собой возвращение к обычным европейским ценностям после катастрофы Первой мировой войны, был сенсационным и сделал Эйнштейна мировой знаменитостью.



Илл. 13. Гравитационные поля тел заставляют свет изгибаться, создавая космические линзы. Здесь вы можете видеть, как сильно искаженные изображения галактик появляются в виде тонких дуг.

Намного бóльшие массы и расстояния играют роль, когда свет от далеких галактик проходит мимо других галактик, лежащих ближе к нам, что приводит к эффектному явлению гравитационного линзирования. Изображения далеких галактик иногда искажаются из-за того, что их свет проходит через гравитационные поля «промежуточного» вещества. Это похоже на то, как преломляется изображение соломинки, если посмотреть на нее сквозь воду. На илл. 13, например, дуги – это искаженные изображения очень далекого скопления галактик, находящихся в 5–10 раз дальше, чем скопление, послужившее линзой.

Ньютону, безусловно, понравилось бы такое космическое доказательство справедливости его первого вопроса!

**Смотреть везде**

Последующие вопросы порождают обсуждения, которые становятся все шире и шире, а в последнем из них, 31-м, вопросительный знак уже только подразумевается. Здесь мы видим самую великую гипотезу Ньютона и его последние слова о свете и Природе.

Ибо, насколько мы можем познать при помощи натуральной философии, что такое первая причина, какую силу имеет она над нами и какие благодеяния мы от нее получаем, настолько же станет ясным в свете природы наш долг по отношению к первой причине, а также друг к другу. И нет сомнения, что, если бы поклонение ложным богам не затемнило язычников, их нравственная философия пошла бы далее четырех главных добродетелей и вместо учения о переселении душ, почитания Солнца и Луны и умерших героев они научили бы нас поклонению нашему истинному творцу и благодетелю, как это делали их предки<sup>[21]</sup>.

Кому-то может показаться странным, что величайший деятель научной революции отважился на такие вопросы теологии и этики. Но Ньютон смотрел на весь мир целиком.

Джон Мейнард Кейнс, энциклопедист, прославившийся своими работами в области экономики, положил начало изучению многочисленных неопубликованных бумаг Ньютона. Кейнс изложил в свои впечатления в замечательном эссе «Ньютон, Человек», с которым я очень рекомендую познакомиться (см. «Список рекомендованной литературы»). Согласно Кейнсу:

Он смотрел на Вселенную как на зашифрованное послание, созданное Всемогущим.

Для Ньютона Природа не была единственным источником ответов на загадки бытия:

Философия, как созерцательная, так и деятельная, может быть обнаружена не только в природе, но и в священных текстах, таких как Книга Бытия, Книга Иова, Псалтирь, Книга пророка Исаяи и других. Если смотреть на эту философию, то Бог сделал Соломона величайшим философом в мире.

Ньютон верил, что древние обладали обширными знаниями, которые они зашифровали в эзотерических текстах и символике, в том числе особенно в пророческих видениях Иезекииля и Откровении святого Иоанна Богослова, в измерениях Храма Соломона и обремененных огромным количеством символов работах алхимиков. Ньютон написал миллионы слов глубоких комментариев по этим темам, включая и одну опубликованную работу – блестящую «Исправленную хронологию древних царств», состоящую более чем из 80 000 слов, трудная для чтения гениальность которых предвосхитила «Поминки по Финнегану»<sup>[22]</sup>. В течение многих лет в Кембридже Ньютон вел интенсивную экспериментальную работу в специальной лаборатории, сконструированной им самим. Целью этой работы было понять и доработать алхимические трансформации.

Следует подчеркнуть, что, работая над изучением библейских текстов или алхимическими опытами, Исаак Ньютон оставался Исааком Ньютоном. Кейнс писал:

Все его неопубликованные работы по эзотерике и теологии отмечены тщательным изучением материала, строгим методом и чрезвычайной трезвостью положений... Почти все они были написаны в те же 25 лет, которые он посвятил изучению математики.

И здесь я добавлю один вопрос в стиле Ньютона от самого себя: не является ли неестественным разделять наше понимание мира на части, которые мы не пытаемся примирить?

Мне кажется, на этот вопрос отвечает данная книга.

## Наброски биографии

Достижения Исаака Ньютона представляют собой трудную задачу для сторонников евгеники и теоретиков воспитания детей. Его отец, которого тоже звали Исаак, был необразованным, неграмотным, но преуспевающим фермером-йоменом, которого описывали как «дикого и сумасбродного человека». Его мать Анна Эйску принадлежала к бедной ветви деревенской аристократии. Исаак был ребенком, рожденным после смерти отца, преждевременно появившимся на свет в рождественский день 1642 г. Он был таким маленьким, что, как говорила его мать, мог «поместиться в горшок емкостью в кварту<sup>[23]</sup>». Мать Ньютона снова вышла замуж, когда мальчику было три года, оставив его (по требованию своего нового мужа) на попечение бабушки, пока снова не овдовела и не забрала сына в 1659-м. Короче говоря, и происхождение Ньютона было низким, и рос он в непростых обстоятельствах.

Таким образом, в обширном любопытстве, творческих способностях и интеллектуальных авантюрах юного Ньютона была искра божественной милости.

Мальчиком он наблюдал за тенями от солнца, сконструировав тщательно откалиброванные солнечные часы, и записывал, как изменяются восходы и закаты солнца в зависимости от смены времен года, став местным доверенным повелителем времени а деревне, где ни у кого не было часов. Также он строил и запускал усовершенствованные воздушные змеи и однажды перепугал всех соседей, прицепив к нескольким змеям фонари и запустив их ночью (вызвав самую первую тревогу по поводу появления НЛО!).

От молодого Исаака ждали, что он станет фермером, но он ненавидел фермерство и выполнял эту работу плохо. В то же время он был прекрасным учеником в местной грамматической школе, и Генри Стокс, тамошний учитель, каким-то образом сумел убедить и Анну, и университетские власти, что Исаак должен поступить в Кембридж. Он был принят как «сабсайзер», т. е. получал финансовую помощь, и за это должен был прислуживать более обеспеченным студентам<sup>[24]</sup>.

В 1665–1666 гг. бубонная чума поразила Англию. Кембриджский университет прекратил свою работу, и 22-летнего студента отослали обратно на семейную ферму в Вулсторпе. В это время Ньютон совершил важные научные открытия в математике (бесконечные ряды

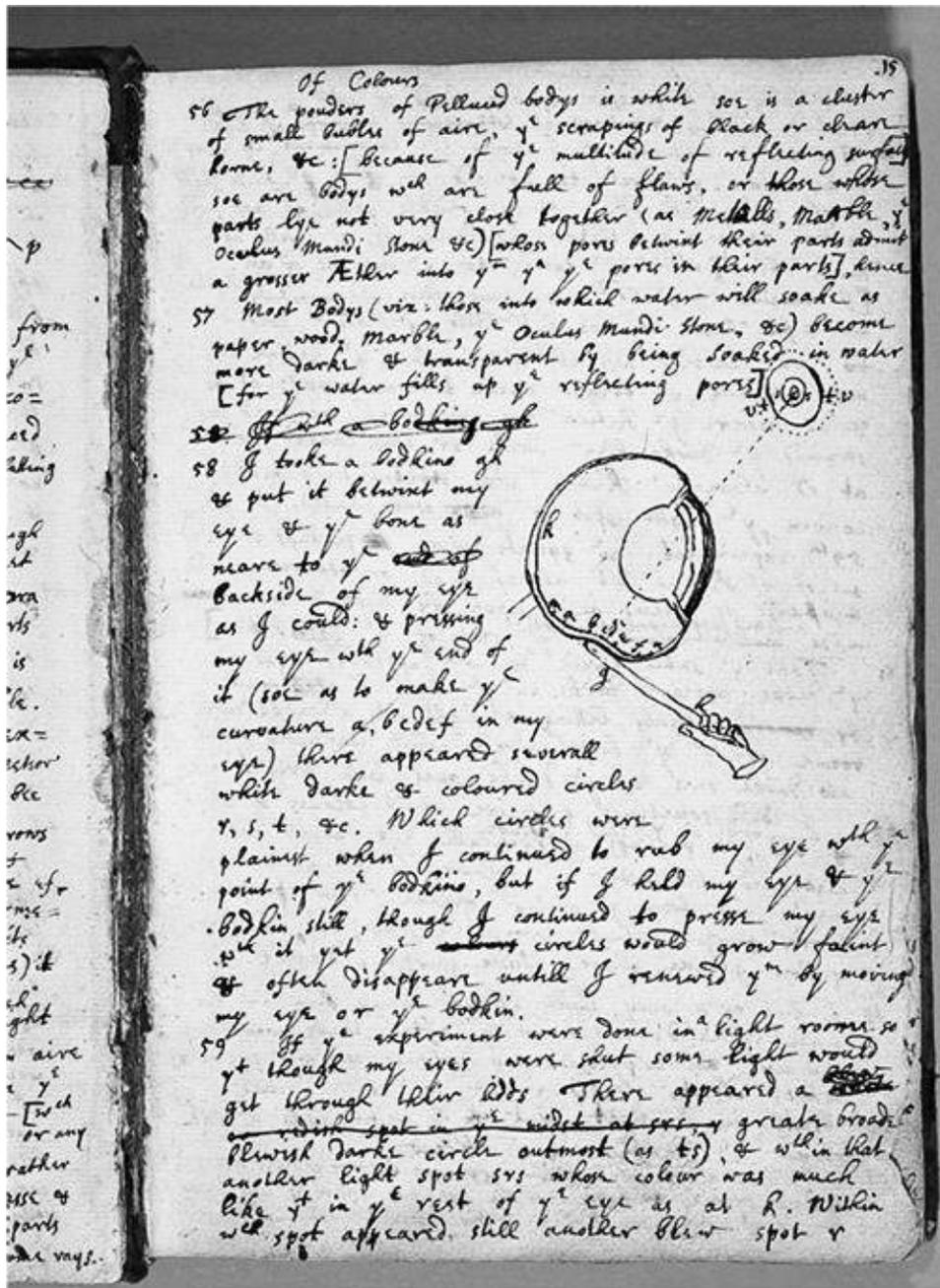
и математический анализ), механике (идея всеобщего притяжения) и оптике (теория цвета). Вот как он описывал это:

Все это произошло за два чумных года, 1665-й и 1666-й, поскольку в те дни я был в моей лучшей поре для изобретений и думал о математике и философии больше, чем в какое-либо другое время.

Пожалуй, ничто так не демонстрирует склонность Ньютона выходить за рамки привычного, как эксперимент, который он провел примерно в то время, чтобы выяснить соотношение между внешним миром и его внутренним восприятием с помощью зрения. Ниже я привожу описание этого эксперимента, состоящее из текста и рисунка (илл. 14):

Я брал шпильку [палочку с тупым концом] и вдавливал ее между глазом и костью, как можно ближе к боковой части глаза. Нажатие глаза концом ее (его место обозначено кривой abcdef) привело к появлению нескольких белых, темных и цветных кругов r, s, t & c. Эти круги стали более четкими, когда я продолжил тереть глаз концом шпильки, но если я держал шпильку прямо, то хотя и продолжал давить на глаз, но круги становились расплывчатыми и часто исчезали, пока я не возвращал их, двигая глазом или шпилькой.

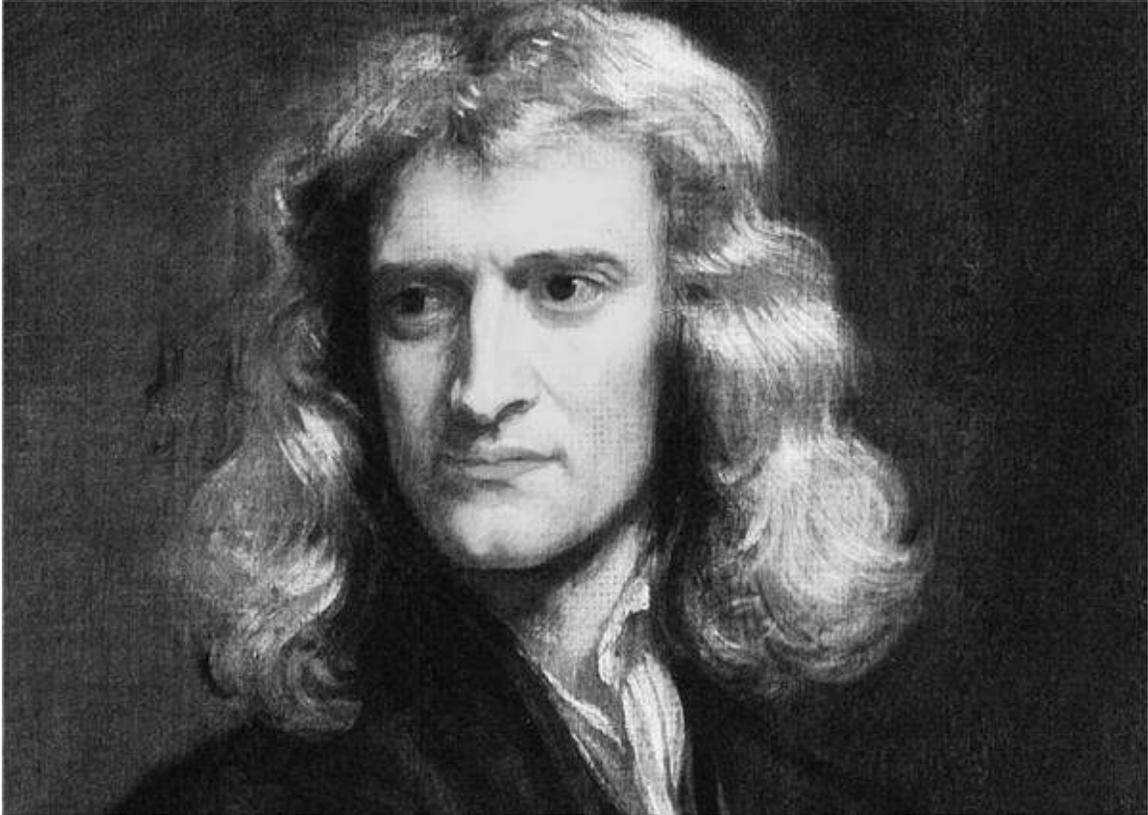
Ньютон работал с яростной энергией до середины 1693 г., когда после 25 лет такой сосредоточенной концентрации на работе, которая редко, если вообще когда-либо, встречалась в истории, он испытал то, что мы сегодня называем психозом. Он временами мог не спать по несколько суток, воображая, что его друзья плетут против него заговоры (и обращаясь к ним с едкими письмами), и страдал от дрожи, потери памяти и спутанности сознания. Ньютон писал, что «чрезвычайно взволнован путаницей, в которой нахожусь, не могу ни спать как следует последние 12 месяцев, ни вернуть мою прежнюю логичность ума». Эти симптомы продолжались несколько месяцев, затем постепенно сошли на нет. Возможно, отравление ртутью в результате работы с алхимическими материалами сыграло свою роль в болезни Ньютона.



Илл. 14. Хладнокровное описание Ньютоном опасного эксперимента, который он провел со своим собственным глазом, чтобы лучше понять восприятие света и определить, может ли оно иметь механическую природу

В 1694 г. он уехал из Кембриджа, чтобы занять должность в Королевском монетном дворе в Лондоне. Его обеспокоенные друзья организовали это место, которое, как они считали, станет для него sinecurой. Ньютон стал более «нормальным» человеком и в течение следующих 25 лет был очень хорошим государственным служащим, но дни

яростной научной работы канули в прошлое.



Илл. 15. Исаак Ньютон в свою лучшую пору

Западающий в душу образ на рисунке 23 – это единственный портрет Ньютона, который, как мне кажется, передает его дух и силу. Поседел он очень рано.

## НЬЮТОН II: Цвет

Природа улыбается в цвете.

*Ли Хант*

Из того, что сказано, очевидно, таким образом, что белизна солнечного света составлена из всех цветов, которыми различные сорта лучей, составляющих указанный свет, окрашивают бумагу, или какое-либо иное белое тело, на которое они падают, когда благодаря их различным преломляемостям они разделяются, ибо эти цвета... неизменяемы; и когда все такие лучи с их цветами снова смешиваются, то они вновь производят тот же белый свет, как и раньше.

*Исаак Ньютон*<sup>[25]</sup>

Первая из этих цитат в объяснениях не нуждается – мы, люди, радуемся цвету так же, как мы радуемся, видя улыбку, без явных причин. Объяснение второй цитаты, которое и составит содержание всей этой главы, служит началом более глубокого взгляда на природу цвета и ждет очереди, чтобы занять значительное место в наших рассуждениях и озарить тот Вопрос, на который мы с вами ищем ответ.

Самые чистые и самые глубокомысленные умы – те, что любят цвет больше всего.

*Джон Рёскин. Камни Венеции*

Это мы и есть – так давайте займемся цветом!

## Получение чистого света

Веками белый считался цветом, символизирующим чистоту. В Древнем Египте жрецы и жрицы Исиды одевались лишь в белые льняные одежды – так же, как и мумии, подготовленные к загробной жизни! Белый же – традиционный цвет для подвенечных платьев, используемых во время бракосочетания – заключения союза чистых сердец. В символике христианства этот же цвет – атрибут Агнца, а также сонмов ангелов и Христа торжествующего (вы можете это видеть на цветной вклейке I).

Кажется, что связывать белый свет с чистотой – правильно. Белый – это цвет главного источника естественного освещения, нашего солнца, когда оно стоит высоко в небе. Белыми мы видим наиболее яркие поверхности – такие как снег, который лучше всего отражает солнечный свет.

Но научный анализ говорит нам о другом.

Когда луч солнечного света проходит сквозь стеклянную призму, появляется цветная радуга или, как мы говорим, спектр. Похожий эффект, причиной которого является прохождение солнечного света сквозь мелкие капельки воды, служит причиной возникновения естественных радуг.

До работ Ньютона бытовало мнение, что цвета в свете, выходящем из призм или дождевых капель, возникают из-за того, что белый свет теряет свое качество, проходя сквозь эти объекты. Было общепринято думать, что различные цвета – это смеси черного цвета (темноты) и белого в различных пропорциях. В зависимости от того, насколько долгий путь свет проходит сквозь призму, он портится в большей или меньшей степени и поэтому выглядит имеющим тот или иной различный цвет. Эта идея подкупает своей простотой: зачем вводить множество ингредиентов, когда достаточно иметь два (или даже один)?

Ньютон же заявил, что белый свет – в том числе и белый, приходящий к нам от солнца, – это смесь множества основополагающих ингредиентов. Согласно его идее, призма вовсе не портит белый свет. Вместо этого она разделяет солнечный свет на его собственные ингредиенты – которые в нем и так присутствовали.

Простой, но полный глубокого смысла эксперимент, который сам Ньютон выделял как *experimentum crucis* (критический эксперимент) для подтверждения своей идеи, делает эту схему очевидной – его изображение есть на цветной вклейке J. Цвета спектра, в которые белый

свет предварительно разложен при помощи призмы, могут быть вновь собраны в белый свет с использованием второй призмы. Если собирается не весь спектр, а только его часть, то на выходе получится не белый свет, а смесь тех цветов, которые прошли через всю оптическую систему. В случае, когда источником света служит естественный свет солнца и экспериментатор отсекает синюю часть спектра, то в выходящем свете преобладает зеленый. Если позволить достигать второй призмы лишь узкому диапазону спектральных лучей, – например, как показано на цветной вклейке, только лучам красного цвета, – то на выходе получится тот же самый цвет.

Суть эксперимента в том, что с помощью второй призмы можно обратить разделение лучей и вернуться к белому свету, неотличимому по своим свойствам от того солнечного света, который был изначально. Как видно на картинке, можно поступить и иначе, скомбинировав вновь только часть спектра. Тогда мы получаем лучи промежуточных цветов, но не белого цвета. Таким образом, призма выполняет анализ входящего в нее белого света.

Этот эксперимент легко интерпретировать, предположив, что свет состоит из фотонов (правда, этот термин возник лишь века спустя, но, чтобы не запутать читателя, я буду называть атомы света фотонами).

Фотоны могут быть различных сортов – например, разных форм или, скажем, разной массы, – и за счет этого на них по-разному влияет стекло призмы. В этом случае призма, искривляя по-разному траектории различных типов таких атомов, будет разделять и, по сути, сортировать их. То есть она работает как современный торговый автомат, который самостоятельно разделяет различные виды брошенных в него монеток. Различные виды фотонов также по-разному воздействуют на наши глаза, производя ощущения различных цветов.

Ньютон не заявлял о своей приверженности ни этой, ни какой-либо другой конкретной модели. Это была бы лишь гипотеза! Но примерно так он мыслил, планируя свою дальнейшую экспериментальную программу.

Как далеко можно зайти в этой сортировке световых лучей? Мы можем позволить лишь маленькой части спектра беспрепятственно идти дальше, таким образом получая лучи чистых спектральных цветов. Составные части таких отфильтрованных лучей, чем бы они ни были, при прохождении сквозь призму были развернуты на один и тот же угол. Действительно ли этот процесс выделил одинаковые, фундаментальные составляющие света? Или в них кроется еще какая-то новая структура, которую можно иным способом обнаружить и произвести их дальнейшую

очистку?

Ньютон подвергал свои очищенные цвета, лучи спектральных цветов, всевозможным издевательствам. Он отражал их от различных поверхностей, пропускал сквозь линзы и призмы из всяческих прозрачных (или частично прозрачных) материалов, не только лишь из обычного стекла. И обнаружил, что все эти процессы оставляют неизменным результат изначальной спектральной сортировки при помощи призмы.

Спектрально желтый, будучи отраженным, остается желтым; спектрально синий остается синим – и т. д. Часто свет поглощается теми предметами, которые мы воспринимаем как цветные. Например, какой-либо синий предмет может поглощать все спектральные цвета, кроме близких к синему, который он отражает, – и именно поэтому он и представляется синим. Но никогда не бывает так, чтобы спектрально желтый отразился бы как спектрально синий или какой-либо другой цвет, кроме того же желтого.

То же правило справедливо и для прохождения света сквозь материалы (преломление). Спектральные цвета и тут сохраняют свою целостность. Разные цвета, как правило, преломляются под различными углами, разумеется – ведь прежде всего именно таким образом призма их и разделяет, – но любой данный материал будет преломлять лучи любого данного спектрального цвета определенным образом.

При помощи экспериментов наподобие этого Ньютон установил, что лучи света, полученные при помощи спектрального разложения, – чистые субстанции с постоянными, воспроизводимыми свойствами. И белого цвета в спектре нет. Лучи белого света всегда можно подвергнуть анализу на составляющие спектральные цвета, и они всегда оказываются смесью различных компонентов. Забавно, но, несмотря на связанную с ним символику, белый свет никогда не чист.

(Во имя точности я должен упомянуть о том, что не все так просто. То, что лучи чистого спектрального цвета нельзя дальше раскладывать на составляющие, не совсем правда. На самом деле можно – на составляющие различной поляризации. Естественно будет обсудить этот вопрос дальше, в связи с работами Максвелла. Хотя это и возможно, не так просто разделить луч единого спектрального цвета на две поляризованные компоненты, поэтому для большинства задач различиями между ними можно пренебречь. Похожая ситуация и с составляющими веществ – химическими элементами. Образец чистого элемента может оказаться смесью изотопов, которые непросто, но возможно отделить друг от друга.)

И хотя я ни разу не слышал, чтобы работу Ньютона описывали таким

образом, я думаю, что уместно отметить: то, что сделал Ньютон в этих экспериментах и создавая свой труд «Оптика», стало отправной точкой химии света. Анализ или очистка – первый шаг в химии.

## **Химия света**

Теперь, когда мы очистили свет, мы можем дальше заниматься его химией.

До сих пор наш анализ не противоречил путеводной идее о том, что свет состоит из фотонов и что различные виды фотонов по-разному отклоняются стеклом и за счет этого можно добиться их разделения, пропуская поток фотонов сквозь призму. Каждый спектральный цвет после этого – выделенная и очищенная фракция фотонов определенного вида. Таким путем мы определили элементы света.

Давайте сравним и найдем общие и отличительные черты химии света и более знакомой, хотя и развившейся позже, гораздо более сложной науки – химии вещества, начиная с сопоставления их периодических таблиц.

- В периодической таблице света есть лишь одна строчка – радуга из спектральных цветов. Спектрально чистые цвета – это ее элементы. В периодической системе вещества несколько строк, и элементы в ней расположены в столбцах, каждый из которых означает, что входящие в него элементы имеют в чем-то схожие, хотя и отличающиеся химические свойства. Также в ней имеются два несообразных протяженных выступа – последовательности лантаноидов (редкоземельных элементов) и актиноидов, – в пределах которых химические свойства веществ почти не меняются.

- Периодическую таблицу света можно получить в осязаемой, физической форме. И в самом деле, достаточно лишь взять луч от солнца или от другого светящегося раскаленного предмета, пропустить сквозь призму и спроектировать на экран – и вот вы ее видите. Периодическая таблица химических элементов, напротив, лишь мысленная абстракция. В природе нет соответствующего ей объекта.

- Периодическая система света – непрерывная последовательность, а периодическая система вещества дискретна.

- Элементы света лишь очень слабо взаимодействуют друг с другом. Отметим, что, если перекрестить два световых луча, они свободно пройдут друг сквозь друга, не взаимодействуя (т. е. от этого не полетят искры,

к примеру, и в пространстве не останутся висеть отвалившиеся молекулы света). В этом смысле каждый элемент света похож по своим свойствам на «благородные» или «инертные» газы из химии вещества.

Обобщая, естественно рассматривать оба вида химии в единой связке, как науку об атомах и их взаимодействиях, причем не важно, идет ли речь об атомах света или об атомах вещества. В этом, более общем видении атомы света уже не ведут себя как инертные. Хотя и не взаимодействуют так просто друг с другом, они вступают по определенным правилам в сочетания с атомами вещества. Этот вопрос мы как следует разберем ниже и углубимся в него, когда станем рассматривать главу «Квантовая красота I: музыка сфер».

Великой целью алхимиков было получение философского камня, который, как они верили, обладает способностью превращать один вид атомов в другой – например, свинец в гораздо более ценное золото. Для атомов света философский камень существует – это движение! Если мы двигаемся навстречу лучу спектрально чистого цвета, то он будет видеться нам тоже как спектральный цвет, но другой. Цвета сдвигаются прочь от красного цвета в сторону синего, и мы говорим, что такой свет испытывает синее смещение. Точно так же, двигаясь вдоль луча прочь от источника света или глядя на удаляющийся от нас источник света, мы увидим красное смещение. Размеры этих смещений пропорциональны скорости относительного движения и очень малы, если только эта скорость не сопоставима со скоростью света. Они были заведомо малы для того, чтобы Ньютон имел возможность их заметить. Для большинства практических целей ими можно пренебречь. Но красное смещение света, исходящего от далеких галактик, – в особенности те изменения, которое красное смещение оказывает на расположение темных и светлых линий спектра, – несет в себе информацию о том, как быстро каждая из таких галактик удаляется от нас, и позволяет составить карту расширения Вселенной.

Идея о том, что свет состоит из отдельных частиц или, как мы называли их, фотонов, прошла в своем развитии несколько периодов расцвета и упадка. Как мы уже сказали, хотя Ньютону и нравилась эта идея, но решительно связываться с ней узами брака он не стал (хотя, так сказать, пофлиртовал с нею слегка, но она так и не стала для него единственно верной). Однако его авторитет был столь велик, что основанная на представлении о свете как о потоке частиц теория доминировала в науке почти до середины XIX в., когда волновые теории света взяли над нею

верх. После того как Максвелл объяснил природу света электромагнитными колебаниями, о чем мы в подробностях поговорим позже, триумф волновой теории света казался неоспоримым. Но в XX в., с возникновением квантовой механики, корпускулярная (основанная на частицах) теория света вернулась вновь – и теперь атомы света были официально наречены фотонами. Привычка Ньютона не выводить из игры множество возможных альтернатив и при этом не отдавать исключительное предпочтение какой-либо одной гипотезе стала провозвестием современного принципа дополнительности.

## Выгода от анализа

Для своего фундаментального понимания природы цвета Ньютон нашел отличное практическое применение – он усовершенствовал конструкцию телескопа. До него во всех телескопах использовали пару линз, обычно размещавшихся на противоположных концах длинной трубы. Принцип их действия был таков: свет, исходящий от удаленных объектов, вначале собирался, а затем фокусировался, чтобы создать увеличенные изображения этих объектов. Поскольку лучи разных цветов проходят сквозь линзы по различным траекториям, не все лучи различного цвета получалось точно сфокусировать одновременно, и изображение в телескопе выходило размытым. Эта проблема называется хроматической аберрацией. Ньютон предложил вместо линзы использовать для сбора лучей света вогнутое зеркало и создал телескопы, в которых реализовал эту идею. Его отражающие телескопы (рефлекторы) уменьшали хроматическую аберрацию, а также были проще в изготовлении<sup>[26]</sup>. По сути, все современные телескопы являются рефлекторами.

Анализ света послужил плодотворным источником научных открытий. Среди всех таких открытий, которые можно перечислять, сейчас я остановлюсь на одном, которое несложно описать, но при этом оно имело огромное значение и не было чуждо поэзии. (Некоторых других мы коснемся позже.)

Когда рассматриваешь спектр солнечного света, то остается впечатление, что он представляет собой сплошную полосу плавно изменяющейся яркости. Но если в опыте используется высококачественная призма, которая разделяет свет очень точно, то в нем можно заметить множество мелких подробностей. Йозеф фон Фраунгофер, занявшийся изучением солнечного спектра в начале XIX в., обнаружил не менее 574

темных полос в спектре, казавшемся до того непрерывным. Причина появления этих полос оставалась непонятой до середины XIX в., когда Роберт Бунзен и Густав Кирхгоф продемонстрировали, как такие же полосы можно получить и в земных условиях. Если некий объем холодного газа помещается перед раскаленным источником света, этот газ будет поглощать часть света. Газ, как правило, поглощает свет очень выборочно, удаляя из него компоненты в пределах узких спектральных полос. Когда делают спектральный анализ пропущенного через него света, поглощенные цвета в нем отсутствуют, за счет чего в спектре образуются темные полосы.

Различные виды газов (к примеру, газов, состоящих из разных химических элементов) поглощают разные цвета спектра. Поэтому, если мы не знаем, из чего состоит какой-то газ, мы можем понять это, наблюдая, какой именно свет он поглощает! На языке нашей обобщенной химии в переводе Бунзена и Кирхгофа темные линии Фраунгофера говорят нам, что данный атом вещества сочетается только с определенными элементами света, т. е. поглощает определенные цвета, а остальные не трогает. Также есть и обратный эффект, когда нагретый газ излучает свет своих особенных цветов, создавая яркие линии в спектре. В совокупности эти темные и яркие линии похожи на отпечатки пальцев, по которым можно опознать оставившее их вещество.

Таким образом, анализируя свет какой-либо звезды и сравнивая яркие и темные полосы в нем с полученными от разных газов в лаборатории, астрономы могут определить, из чего сделана эта звезда (и узнать много других подробностей об ее атмосфере, откуда и исходит видимый нами свет). Этот метод быстро стал хлебом насущным для физической астрономии и остается таковым по сей день. С фундаментальной точки зрения он позволил нам выяснить, что звезды состоят из тех же самых веществ и подчиняются тем же самым физическим законам, которые мы наблюдаем здесь, на Земле.

Норман Локьер и Пьер Жанссен выполнили ряд наблюдений солнечной короны, загадочные результаты которых сперва поставили под сомнение этот вывод, но в конце концов лишь подкрепили его. В 1868 г. во время солнечного затмения они наблюдали в спектре света от короны яркую линию, неизвестную по наблюдениям какого-либо из газов на Земле<sup>[27]</sup>. Было решено, что источник этой линии – новый элемент, названный «короний», который посчитали существующим только во внеземных условиях. Но в 1895-м двое химиков из Швеции, Пер Клеве и Нильс Абрахам Ланглет, а также, независимо от них, Уильям Рамзай обнаружили, что ту же самую линию излучает и газ, истекающий

из урановых руд. Так восстановилось утраченное было родство между небом и землей. А новый элемент был назван или, точнее говоря, вновь назван гелием – в честь Гелиоса, древнегреческого бога Солнца.

## Ньютон III: динамическая красота

Основные законы ньютоновской механики – это динамические законы, т. е. законы, определяющие, как происходит изменение окружающего нас мира во времени. Динамические законы отличаются от правил геометрии или от тех законов, которые мы обсуждали в главах, посвященных Пифагору или Платону, и которые описывают отдельные объекты или отношения.

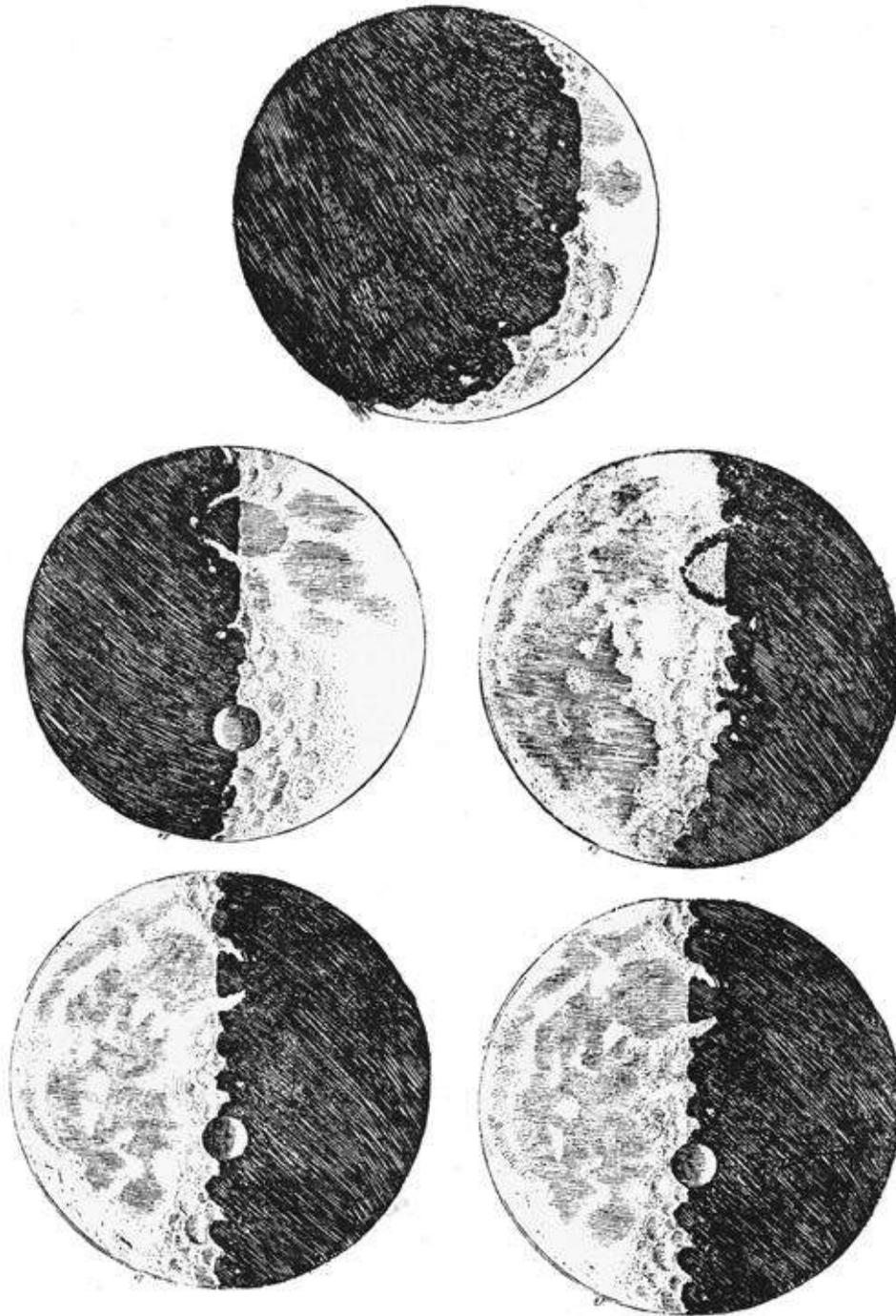
Динамические законы побуждают нас расширить наш поиск красоты. Мы должны думать не только о том мире, который *есть*, но также – главным образом – о более обширном, воображаемом мире того, что *может быть*. Мир ньютоновской механики – это мир *возможностей*.

Этот расширенный поиск красоты открывает золото на горе Ньютона (илл. 28). Но необходима небольшая подготовка перед тем, как мы отправимся туда с визитом.

## Противопоставление Земли и космоса

Непосредственные предшественники Ньютона оставили натуральной философии большую нерешенную задачу.

В «Звездном вестнике» (*Sidereus Nuncius*) Галилея была дюжина его зарисовок Луны, такой, какой он увидел ее через первый астрономический телескоп с 20-кратным увеличением, который сам сконструировал. Пятна света и тени ясно указывали на то, что у Луны весьма неровная поверхность (илл. 16).



Илл. 16. Некоторые из поразительных рисунков Галилея, на которых он изобразил увиденную в телескоп Луну

В то время как Галилей опустил небесные сферы до разряда земных, Коперник заставил Землю двигаться как одну из планет среди таких же небесных тел, а Кеплер нашел точные закономерности в движении планет. Хотя их детали нам не слишком необходимы, я приведу три закона Кеплера,

что поможет мне выделить две важные вещи.

- Орбита планеты является эллипсом, в одном из фокусов которого находится Солнце.
- Линия, соединяющая Солнце и планету, заметает равные площади за равные промежутки времени.
- Квадрат периода каждой планеты (продолжительность планетарного «года») пропорционален кубу длинной оси эллипса.

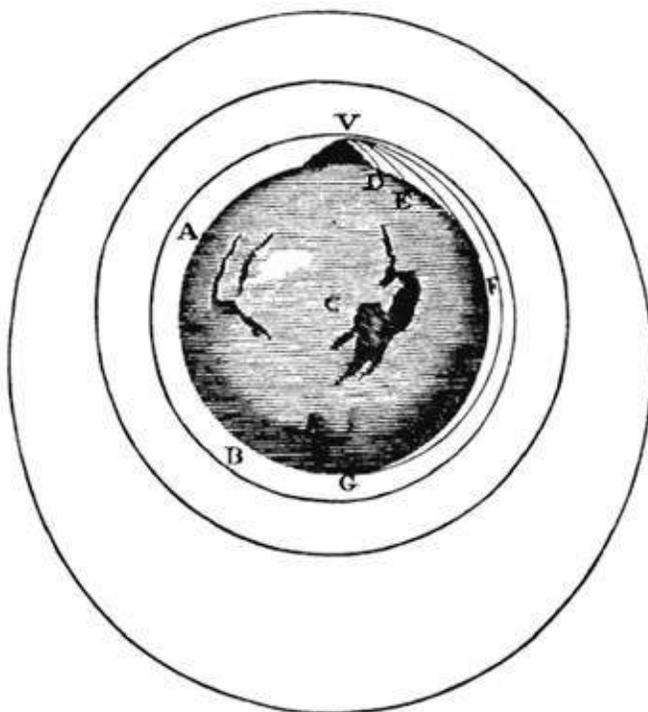
Первое важное обстоятельство – эти законы не являются динамическими. Они описывают установившиеся соотношения, а не правила изменения. Второе – это правила движения планет. Они ничего не говорят о движении, которое мы наблюдаем ближе к дому, по опыту земных явлений. Это чуждые сообщения из иной концептуальной вселенной – при том что сама Земля является планетой!

Таким образом, великая незавершенная задача состояла в том, чтобы объединить Землю и космос. Какие общие законы управляют этими двумя схожими на вид королевствами?

## Гора Ньютона

В «Началах» Ньютона<sup>[28]</sup> есть множество геометрических чертежей и несколько численных таблиц, но только один рисунок (илл. 17). На мой взгляд, это самый красивый рисунок во всей научной литературе.

Очевидно, что если рассматривать его просто как произведение живописи, то этот рисунок является скромным достижением. Красивым его делают идеи, которые открывают дорогу нашему воображению. Это приглашение к мысленному эксперименту, который предполагает, что падающие на Землю объекты и двигающиеся по орбитам в космосе небесные тела ведут себя одинаково, т. е. указывает на возможность существования всеобщей силы притяжения.



Илл. 17. Гора Ньютона – великий мысленный эксперимент

Вы стоите на вершине горы и горизонтально – параллельно поверхности Земли – бросаете камень. Если при броске вы придадите ему небольшую скорость, то до того, как упасть, он пролетит небольшое расстояние. Если вы бросите камень с большой скоростью, то он пролетит дальше. На практике ни один смертный не может бросить камень

достаточно сильно, чтобы он пролетел какую-либо значительную часть длины окружности Земли. Не важно – это мысленный эксперимент, и вам позволено заменить физическую силу умственной. Бросайте сильнее. Своим внутренним взглядом вы видите, что конец траектории начинает приближаться к ее началу, как показано на рисунке.

И тогда, если вы бросите камень еще сильнее, вам придется пригнуться – или камень ударит вас по затылку! Уклонившись от него, вы сможете увидеть, как камень повторит свое движение, поскольку он вышел на круговую орбиту. (Соппротивление воздуха? Помилуйте, это мысленный эксперимент!) Вы можете мысленно располагать себя на вершинах воображаемых гор и проходить тот же логический путь, чтобы увидеть возможность тел обращаться по орбите Земли на любом расстоянии от поверхности под воздействием ее тяготения.

Вы можете представить себе действительно высокую гору и действительно большой камень... И, когда камень выйдет на орбиту, назвать его Луной.

Я называю изображенное на рисунке тело Землей, но оно нарисовано обобщенно, с едва намеченными деталями поверхности, а гора находится в нереалистичной пропорции к планете. Дело тут именно в том, что этому телу не обязательно быть Землей. Тот же самый мысленный эксперимент может быть приложен к Солнцу и объяснять, каким образом притяжение Солнца удерживает планеты на своих орбитах. Или к Юпитеру, объясняя, как его притяжение удерживает на орбитах галилеевы луны.

Идея всеобщего притяжения, действующего между самыми разными телами, уводит этот эксперимент далеко от того, насколько мы (или Ньютон) имеем право расширить подобный повседневный опыт – падающий на Землю камень, – который запускает работу нашего воображения. Мысленные эксперименты ничего не доказывают! Но они могут предложить плодотворные пути, по которым можно провести более тщательное исследование. Если воображаемый вывод мысленного эксперимента кажется логичным, это хорошо. Лучше, если он прекрасен. Ну а если же вы получили больше, чем имели на входе, то это совсем замечательно. Гора Ньютона дает это все.

Существует знаменитая легенда, видимо, берущая свое начало в каких-то написанных на скорую руку воспоминаниях пожилого Ньютона, что он начал размышлять о возможности наличия всемирного тяготения, увидев, как яблоко упало на землю неподалеку от его дома в Вулсторпе. В его собственноручных записях никакого яблока нет, а есть только эти строки:

...Я начал размышлять о притяжении, простирающемся до орбиты Луны и дальше (обнаружив, как оценить силу, с которой шар вращается внутри сферы и оказывает давление на поверхность сферы). Из закона периодов обращения планет Кеплера... я вывел, что сила, удерживающая планеты на их орбитах, должна аналогично соотноситься с квадратами расстояний от центра, вокруг которого они вращаются, с помощью этого сравнил Луну на ее орбите с силой притяжения на поверхности Земли и нашел, что они подходят очень хорошо.

Действительно ли падающее яблоко навело Ньютона на эти размышления или нет, но в самом явлении его падения пищи для размышлений немного. Я думаю, что что-то подобное Горé Ньютона стало тем пониманием, которое сделало силу всемирного тяготения убедительным для Ньютона образом.

Я также считаю, что существует вполне возможный путь от мысли о яблоке, как вспышке внутреннего озарения, который ведет к Горе как к ее развитию. Эта мысль проста, но очень красива. Если мы подумаем о влиянии Земли, «простирающемся до орбиты Луны и дальше» как о тяготении, которое объясняет нахождение Луны на орбите, мы предположим связь между двумя видами движения, которые кажутся очень разными. Сила притяжения, как ее можно наблюдать на Земле, – скажем, глядя на яблоки, – это процесс падения, направленный к центру Земли. Движение Луны по орбите Земли – это, на первый взгляд, что-то совершенно иное. Суть мысленного эксперимента с Горой тем не менее состоит в том, чтобы показать, что движение по орбите – это процесс постоянного падения, но (с точки зрения камня) направленного к постоянно движущейся мишени! И вы можете видеть на рисунке, что в каждой точке круговой орбиты направление скорости камня параллельно поверхности Земли (т. е. в данном конкретном месте оно «горизонтально»), в то время как орбиты, лежащие внутри круговой, загибаются к поверхности. Увидев с нашей точки зрения, т. е. с вершины Горы Ньютона, что движение по орбите – это форма падения, мы можем связать Луну с яблоком.

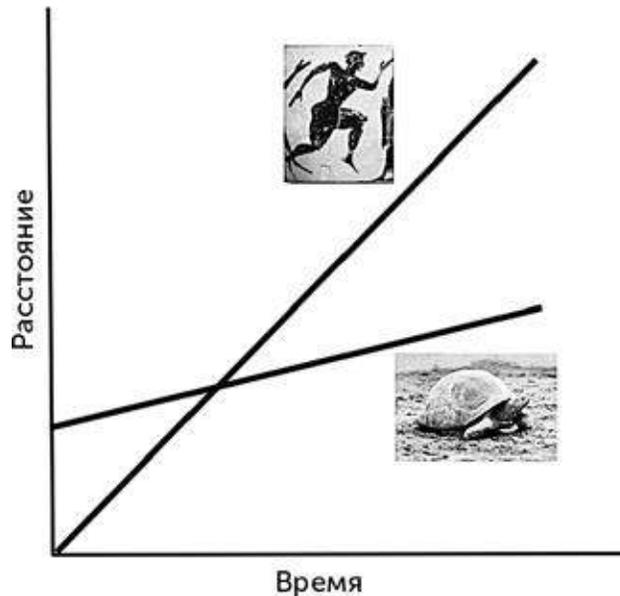
## **Время как измерение**

Даже самые лучшие мысленные эксперименты не доказывают ничего. Перед нами открывается путь от вида, открывшегося с Горы Ньютона, к точной математической теории, к которой он стремился. Это путь через

новое измерение – через время, понимаемое по-новому.

Кривые на рисунке с Горой Ньютона – это траектории. Каждая является совокупностью точек, которые занимает тело (наш камень) в последовательные моменты времени. Конечно, сами по себе они не являются ни телами в пространстве, ни физическими объектами в прямом смысле слова. Тем не менее траектории определяют геометрические объекты и являются – как мы увидим далее – основанием для понимания физики движения. Чтобы правильно понять их, давайте посмотрим, где они живут.

Отдельно взятая траектория несет в себе некоторую информацию о движении отдельного тела, но из одной только кривой мы не сможем выяснить, когда именно тело прошло по различным частям этой кривой. Мы можем расположить на точках кривой отметки о времени, восстанавливая недостающую информацию. Но это становится неудобным, если мы хотим рассмотреть сразу несколько траекторий, потому что любой промежуток времени соответствует целому винегрету точек, по одной на каждой территории, и их рисунок с течением времени меняется. Гораздо лучше рассматривать время как еще одно измерение. Траектории чувствуют себя как дома в расширенной концептуальной вселенной пространства-времени. Чтобы выявить существенно важную природу этого принципиального нововведения, давайте возьмем более простую ситуацию, чем Гора Ньютона, а именно – парадокс Зенона о гонке между Ахиллом и черепахой. Во-первых, отметим, что здесь траектории в пространстве представлены как две частично перекрывающиеся друг друга прямые линии – не очень информативно! Поднявшись на наблюдательный пункт пространства-времени, мы можем еще раз представить себе гонку между Ахиллом и черепахой таким образом, чтобы об их состязании и, если уж на то пошло, о самом движении в целом было легче судить.



Илл. 18. По мере того, как время идет (направо), и Ахилл, и черепаха продвигаются вдоль беговой дорожки (прямые, изображающие это движение, на рисунке направлены под углом вверх). Траектория Ахилла уходит вверх круче, потому что за заданный интервал времени он покрывает большее расстояние. Здесь время стало полноценным измерением на равных основаниях с расстоянием (иными словами, с пространством).

Если мы хотим синхронизировать описаниях двух наших траекторий, имеет смысл представить время как отдельную величину – новое измерение – и расставить точки, обозначающие положения обоих действующих лиц в каждый момент времени. Это сделано на илл. 18.

На этом рисунке логическая структура аргументов Зенона выставлена на обозрение, и парадокс исчезает. В пространстве-времени есть две линии-траектории, одна более крутая, чем другая, и им ничего не остается, как пересечься! (Вы можете немного позабавиться, обозначив время, когда Ахилл достигает точки старта черепахи, потом – время, когда Ахилл достигает точки, куда черепаха продвинулась с того времени, когда Ахилл был на ее старте... Таким образом вы пройдете по каждому пункту рассуждения Зенона и обезвредите одну за другой заложенные им логические мины.)

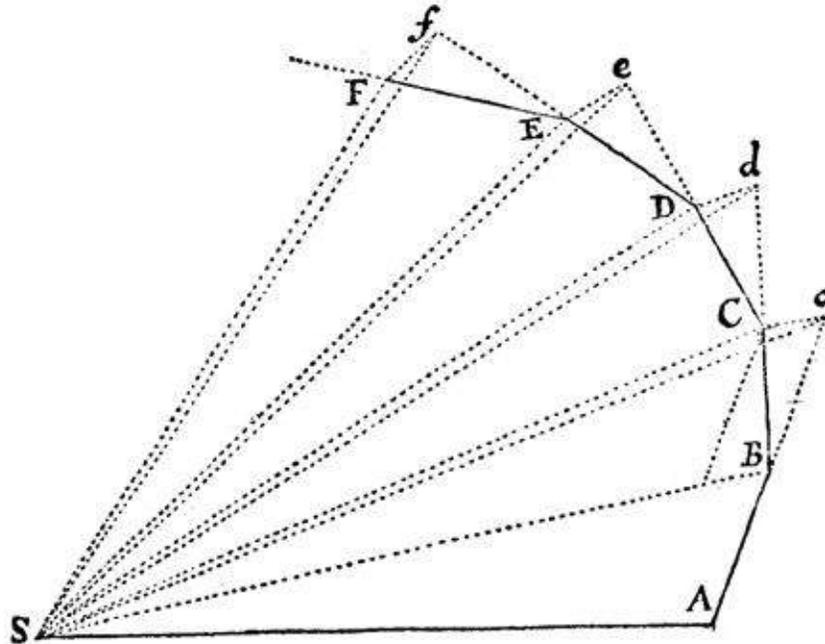
Мы можем вернуться к траекториям в первоначальном смысле, спроецировав траектории пространства-времени горизонтально на координатную ось расстояния, таким образом скрыв всю информацию о времени.

Траектории полета с Горы Ньютона уже были нарисованы в двумерном пространстве, поэтому их пространственно-временная версия должна существовать в трех измерениях. В этом трехмерном пространстве-времени круговые орбиты разворачиваются в спирали.

Вы также можете, пользуясь математическим воображением, заставить вещи работать по-другому: возьмите обычное двумерное (или трехмерное) пространство и представьте, что это пространство-время! При этом обычные геометрические графики превращаются в динамические траектории. Или, иначе говоря, мы рассматриваем их как *движения* точки через пространство. Ньютон детально развил эту основную мысль. Для него это было принципиальной сущностью того, что мы сегодня называем математическим анализом. Ньютон, который изобрел этот анализ, называл его *методом флюксий*. В соответствии с этим методом такие кривые (и другие геометрические объекты) рассматриваются не как законченные построения, а как сущности, плавно изменяющиеся во времени согласно имеющимся связям между их бесконечно малыми компонентами.

## **Анализ движения**

Иллюстрация 19 – это ключевая диаграмма из «Начал» Ньютона, показывающая, как анализируется движение. Кеплер нашел математические законы, описывающие движение планет, но он не выводил сами эти законы из более глубоких физических принципов. На этом рисунке, используя свой специфический метод анализа – разбиение на мелкие части, Ньютон торжественно открывает внутреннее значение законов Кеплера.



Илл. 19. Ньютоновский анализ движения. Отклонения от движения по прямой линии обязаны действию силы.

Орбита разбивается на очень большое количество шагов, каждый из которых проходится за небольшой интервал времени. Поскольку это не физическое, а математическое обобщение, мы можем сделать эти шаги настолько малыми, насколько хотим. В течение достаточно малого интервала времени орбита может аппроксимироваться прямой линией, а скорость объекта, грубо говоря, постоянна. Один из ньютоновских законов движения говорит, что тело, не испытывающее воздействие каких-либо сил, будет оставаться в состоянии движения<sup>[29]</sup>, т. е. продолжать двигаться в том же направлении и с той же скоростью. На рисунке мы видим пунктирные линии продолжений орбитальных сегментов, показывающие тот путь, по которому бы следовало тело, если бы сила внезапно исчезла. Настоящая орбита отличается от этих экстраполяций именно потому, что существует действующая на тело сила.

Путем детального математического рассмотрения этой проблемы мы можем определить, сила какого рода требуется, чтобы поддерживать заданную орбиту. Ньютон сделал это для орбит планет, используя открытые Кеплером зависимости (три закона, которые мы привели выше). С помощью такого анализа Ньютон пришел к выводу, что эта сила направлена непосредственно к Солнцу и убывает пропорционально квадрату расстояния от него.

Мы не можем не отметить, что этот анализ по сути своей является

математической реализацией основных понятий, которые мы видели в мысленном эксперименте с Горой Ньютона.

## Анаграмма Ньютона

Разложение движения на бесконечно малые части с учетом сил, определяющих любое отклонение от «естественного» движения (движения с постоянной скоростью), – это сущность механики Ньютона. Не желая делиться своими секретами, но страстно стремясь обозначить свое первенство, Ньютон опубликовал эту анаграмму:

6a cc d æ 13e ff 7i 3l 9n 4o 4q rr  
4s 8t 12u x

Ее решением<sup>[30]</sup> является фраза на латыни:

Data æquatione quotcunque fluentes quantitates involvente,  
fluxiones invenire; et vice versa.

Владимир Арнольд, выдающийся математик XX в., основательно изучивший работы Ньютона, любезно перевел ее так:

Полезно решать дифференциальные уравнения.

Вот более пространный перевод, который подводит итог нашему разговору:

Анализ движения путем рассмотрения его мельчайших частей – это хорошо. Он позволит вам определить силы из траекторий или траектории из сил.

## Система мира

Выведя всемирный закон тяготения из законов движения планет Кеплера, Ньютон использовал его, чтобы предсказать впечатляющее количество следствий. Это был синтез, вытекающий из его анализа. Вот неполный список этих следствий:

- Общую природу силы притяжения мы ощущаем на Земле. Анализируя движение Луны – ее величину. Как она меняется в зависимости

от положения – на Земле.

- Движение спутников Юпитера и Сатурна и нашей Луны.
- Движение комет.
- Причины приливов (которые связаны с притяжением Луны и Солнца)

и их основные характеристики.

- Форма Земли: слегка сплюснутая.
- Медленное периодическое смещение направления земной оси, примерно на  $1^\circ$  за 72 года. Эффекты «прецессии равноденствий» были замечены еще древнегреческими астрономами, но ранее ни они, ни кто-либо еще не подходил даже близко к их объяснению.

Все эти приложения были количественными, и некоторые из них можно было проверить с большой точностью. Все они могли быть подтверждены наблюдениями и более сложными расчетами без каких-либо принципиальных изменений.

Ньютон назвал третью книгу своих «Начал», где изложил свой синтез, «Системой мира». Раньше ничего подобного не было. Ньютон взял некоторые величайшие задачи космологии и решил их в соответствии с математическими принципами с неслыханной до него и теоретически неограниченной точностью.

Реальной и идеальной.

## **Динамическая красота**

Динамические законы Ньютона показывают красоту физического мира, но это красота очень отличается от той красоты, к которой стремились Пифагор и Платон. Динамическая красота менее очевидна и требует больше воображения, чтобы принять ее. Это красота законов, а не объектов или эффектов восприятия.

Мы можем понять разницу, сравнив модель Солнечной системы Кеплера, основанную на платоновых телах, с Системой мира Ньютона. В модели Кеплера Солнечная система сама по себе – красивый объект, воплощающий идеальную симметрию. Ее элементами являются сферы, разделенные пятью идеальными платоновыми телами. В Системе Ньютона реальные орбиты планет отражают первоначальный замысел Господа, возможно, слегка искаженный временем. (Подробнее об этом ниже.) Бог мог иметь и, возможно, имел в виду другие соображения, а вовсе не математическую мистику, поэтому от реальных орбит красоты никто не ждет и не находит ее. Красивы не орбиты сами по себе, а общие принципы, которые лежат в основе всех возможных орбит, и вся совокупность орбит. Это красота Горы Ньютона, усиленная ее тщательной проработкой.

## **Упрощение способствует росту**

Ньютоновский метод анализа и синтеза имеет и другое название – редукционизм (упрощение). При этом сложный объект или предмет «упрощается» до чего-то более простого, если было показано или считается оправданным, что более сложные объекты можно анализировать через их составные части, а затем синтезировать их поведение из поведения этих частей.

Редукционизм имеет дурную славу, и не только потому, что «редукционизм» – так себе словечко. Самое очевидное значение этого слова наводит на мысль, что, когда вы что-то поняли с помощью метода анализа и синтеза, вы каким-то образом упростили его. Ваш насыщенный и сложный объект теперь «не более чем» сумма его частей. Если уж на то пошло – и здесь, когда дело близко касается человека, это начинает раздражать, – возможно, что и вы сами, и те, кого вы любите, являются «не более чем» собранием молекул, просто делающих свое дело и ведущих

себя в соответствии с математическими правилами.

Поэты и художники романтической эпохи в ответ на триумф ньютоновской «редукционистской» науки выражали свое волнение по поводу присущего ей мотива «не более чем». Джон Китс, самый лирический из всех лирических поэтов, писал:

...Любое диво  
От философии бежит пугливо!  
Вот радугу в лазури зиждет Бог –  
Но семь волшебных красок в каталог  
Внесли и волшебство сожгли дотла.  
Философ свяжет ангелу крыла,  
Определит размер чудес и вес,  
Очистит от видений грот и лес,  
Погубит радугу... [\[31\]](#)

Уильям Блейк протестовал против ограниченного кругозора редукционизма (цветная вклейка К). На этой картине изображен Исаак Ньютон за работой и отражаются противоречивые чувства Блейка по его поводу. Его Ньютон – это фигура, преисполненная чрезвычайной сосредоточенности и целеустремленности, не говоря уже о сверхчеловеческом строении тела. В то же время он изображен с потупленным взором, потерянный в абстракциях и буквально повернутый спиной к необычному красочному пейзажу. Тем не менее Блейк (как и Китс) признавал, что миром правит математический порядок (вклейка L). В сложной мифологии Блейка изображенный здесь Уризен [\[32\]](#) – это двойственная фигура Отца, который одновременно несет жизнь и ограничивает ее. Трудно не заметить некоторое сходство с предыдущей картиной. Не является ли Ньютон толкователем Уризена или его реинкарнацией?

Хорошая картина действительно вызывает эмоциональный отклик, чем назидательные разглагольствования. Перед нами в самом деле «картина, стоящая тысячи слов». Пожалуйста, на секунду не обращайтесь внимания на подпись, когда вы откроете вклейку М, а просто рассмотрите поразительно красивый шедевр абстрактного искусства.

Хорошо, а теперь прочтите подпись (если вы этого еще не сделали). Разве знание того, что эта картина может быть «редуцирована» до чистой математики, умаляет ее красоту? Для меня и, надеюсь, для вас открытие

того, что простая математика может закодировать эту структуру, только *прибавляет* ей красоты. Конечно, она по-прежнему выглядит картиной. Но теперь вы также можете своим мысленным взором увидеть ее с другой точки зрения, как воплощение концепций. Она и Реальна, и Идеальна.

И наоборот, красота картины увеличивает красоту математических построений. Проследить логику создания программы, не видя, что можно получить, – это не очень увлекательное упражнение. Когда вы видите, что должно получиться на выходе, тот же самый процесс становится интеллектуальной загадкой, позволяющей достичь совершенства.

Реальное более стремится быть Идеальным, а Идеальное – Реальным.

Что касается этого фрактального изображения, то – более обобщенно – понимание не принижает опыт, скорее оно добавляет альтернативные точки зрения. В духе дополнительности мы можем наслаждаться любой из альтернатив по очереди, если не можем наслаждаться сразу всеми.

Кстати, могу побиться об заклад, что Китс не одолел научную теорию радуги. Если бы он справился с ней, мы бы прочитали стихи, воспевающие ее красоту. Потому что Джон Китс также написал эти строки:

Пусть старость поколения сменяет!  
Другому скажешь на пути бескрайнем:  
В прекрасном – правда, в правде – красота.  
И это – мудрость высшая земная<sup>[33]</sup>.

## **Начиная действовать**

В динамической точке зрения на мир существует еще один аспект, который привел Ньютона к Богу и поставил вопросы, до сих пор еще не разрешенные.

Динамические законы – это законы движения. Они связывают состояние мира в один момент времени с его состояниями во все остальные моменты. Если мы знаем состояние в один момент времени, мы можем предсказать будущее или сделать экстраполяцию в прошлое. Говоря конкретно, в механике Ньютона, если нам известны положения, скорости и массы всех частиц в один момент времени и силы, которые действуют среди них, мы можем вывести их положения и скорости (и массы, которые не меняются) в любые другие моменты в результате расчета. Эти величины

определяют состояние мира, потому что в механике Ньютона они обеспечивают полное описание материи.

Существуют серьезные практические трудности, которые мешают реальному представлению этих расчетов, что мог испытать на себе любой, кто изучает погоду. На свете есть великое множество частиц, и совершенно нереально определить все их координаты и все их скорости. Даже если бы вы могли это сделать и знали бы точно все законы сил, действующих на них, требуемые расчеты заставили бы ужаснуться любой мозг, который только можно себе представить. Вдобавок ко всему главный результат теории хаоса состоит в том, что маленькие ошибки по всей линии – в изначальных условиях, в законах действия сил или в численных расчетах – имеют тенденцию со временем превращаться в большие ошибки.

Если не принимать во внимание практические трудности, то главная мысль состоит в том, что вам нужна точка отсчета! Динамические уравнения не самодостаточны. На нашем профессиональном жаргоне мы говорим, что они требуют *начальных условий*. Чтобы начать обсчитывать поведение мира с помощью динамических уравнений, вы должны вначале определить состояние мира в один момент времени, как информацию на входе.

(Конечно, если вас интересует что-то более маленькое, чем весь мир, и вы действительно можете изолировать предмет изучения от всего остального, вам нужно только знать состояние вашей подсистемы. Для простоты я продолжу говорить о «мире».)

Описание мира можно разделить на две части:

1. Динамические уравнения.
2. Начальные условия.

Из регулярности и порядка Солнечной системы, где все планеты обращаются вокруг Солнца по орбитам, очень близким к круговым, все примерно в одной плоскости, все в одном направлении, Ньютон в «Общем поучении», которое завершает «Начала», предположил, что первоначальные условия были разумно упорядочены:

Такое изящнейшее соединение Солнца, планет и комет не могло произойти иначе, как по намерению и власти могущественного и премудрого существа<sup>[34]</sup>.

Сегодня у нас есть более земные, физические основополагающие идеи

о происхождении Солнечной системы, но более серьезные вопросы остаются. Хотя механика Ньютона как фундаментальная теория была вытеснена иными теориями, эта ее черта так и сохранилась. У нас все еще есть динамические уравнения, и они по-прежнему требуют начальных условий. Наше описание мира делится на две части: динамика и начальные условия. Для первого у нас есть великолепная теория, но для второго – только эмпирические наблюдения и неполные, более или менее достоверные спекуляции.

Если мы окинем Вселенную, всю реальность, в пространстве-времени, развернутом как под взглядом Бога, то мы придем к современной форме неизменного единства Парменида. Великий математик и физик XX в. Герман Вейль, чьи книги очень много значили для моего образования, сформулировал это таким образом, что я считаю эти строки достойными занять свое место среди самых прекрасных и самых глубоких высказываний в мировой литературе:

Объективный мир просто *есть*, он не *случается*. Лишь для взора моего сознания, карабкающегося по мировой линии жизни моего тела, порождается часть мира как образ, плывущий в пространстве и непрерывно меняющийся во времени<sup>[35]</sup>.

Если Парменид и Вейль правы и пространство-время в целом является первичной реальностью, то мы должны стремиться к фундаментальному описанию их в целостности. И в этом описании не будет места для начальных условий.

## Максвелл I: Эстетика Бога

Настоящая современная физика началась в 1864 г. со статьи Джеймса Клерка Максвелла «Динамическая теория электромагнитного поля». В ней впервые можно найти уравнения, которые появляются и в сегодняшней Главной теории.

Эти уравнения – уравнения Максвелла – изменили многое.

Они превратили пространство из хранилища в материальную среду – нечто вроде космического океана. Перестав быть просто вакуумом, пространство наполнилось потоками энергии, которые управляют миром.

Уравнения Максвелла дали нам совершенно новое понимание того, что представляет из себя свет, и предсказали существование неожиданных форм излучения, которые являются новыми видами «света». Они прямо привели к изобретению радио и вдохновили на создание нескольких других важных технологий.

Уравнения Максвелла также знаменуют собой большой прогресс в поисках ответа на наш Вопрос, поскольку они демонстрируют красивые идеи, глубоко воплощенные в мире. Эта красота проистекает из множества источников: из способа, которым они были открыты, из их формы и из их силы, породившей другие отличные идеи.

- Красота как инструмент: для Максвелла воображение и игра, ведомые ощущением математической красоты, были главными инструментами открытия, и он доказал, что эти инструменты работают хорошо!

- Красота как опыт: уравнения Максвелла могут быть представлены наглядно, на языке потоков. В таком виде они выглядят как некий танец. Я часто мысленно представляю их как танец понятий сквозь пространство и время, и это настоящее удовольствие. Даже при первом взгляде на них уравнения Максвелла оставляют ощущение красоты и равновесия. Как и воздействие более общепринятых форм искусства, это впечатление легче воспринять, чем объяснить. Как ни парадоксально, но существует слово, описывающее красоту, которую невозможно выразить словами, – «непередаваемо». Испытав непередаваемую красоту уравнений Максвелла, любой был бы разочарован, если бы они оказались неправильными. Примерно в такой же ситуации оказался Эйнштейн, когда его спросили, может ли его общая теория относительности оказаться ошибочной, причем с надежными тому доказательствами. «Тогда мне будет жаль милостивого Бога!» –

ответил Эйнштейн.

- Красота и симметрия: глубокое понимание уравнений Максвелла, для которого потребовалось несколько десятилетий после того, как открытие было сделано, привело к дополнительному, более интеллектуально точному взгляду на их красоту. Это очень симметричная система уравнений – в точном математическом смысле этого слова, как мы обсудим далее. Уроки, которые можно извлечь из уравнений Максвелла, – что уравнения могут демонстрировать симметрию и что Природа любит использовать такие уравнения – ведет нас к Главной теории, и, возможно, дальше.

Так давайте откроем наше сознание их духу!

## Атомы и пустота

Физика Ньютона оставляла пространство пустым, и этим он был недоволен. Его закон всемирного притяжения постулировал существование сил притяжения, которые действуют немедленно, без какой-либо задержки во времени, между телами, разделенными пространством. Более того, величина этих сил зависит от удаления тел и падает пропорционально квадрату расстояния между ними. Но если пространство, где нет тел, – это просто ничто, то каким образом сила передается? Как она перепрыгивает эту пустоту? И почему величина силы зависит от того, сколько именно «ничего» между телами?

Ньютон чувствовал, что его собственная теория ведет к этим вопросам, но ответов он не нашел. Не потому, что мало пытался, – в своих неопубликованных записных книжках Ньютон исписал множество страниц, размышляя над альтернативными идеями притяжения, но ничто не могло сравниться с законом, который он сам в частной переписке называл абсурдом:

Предполагать... что тело может действовать на другое на любом расстоянии в пустом пространстве, без посредства чего-либо передавая действие и силу, это, по-моему, такой абсурд, который немислим ни для кого, умеющего достаточно разбираться в философских предметах<sup>[36]</sup>.

Ньютону пришлось также хоть и с опаской, но использовать пустоту в своих работах по свету. Его частицы света двигаются по прямым линиям через пространство, в отсутствие какой-либо материи, что очень напоминает доктрину античного атомизма, которую поэтически выразил Лукреций:

Всю, самоё по себе, составляют природу две вещи:  
Это, во-первых, тела, во-вторых же, пустое пространство...<sup>[37]</sup>

При этом в самом конце «Начал» мы находим это выражение веры или тоски, которое кажется принадлежащим другой книге:

Теперь следовало бы кое-что добавить о некотором

тончайшем эфире, проникающем все сплошные тела и в них содержащемся, коего силою и действиями частицы тел при весьма малых расстояниях взаимно притягиваются, а при соприкосновении сцепляются, наэлектризованные тела действуют на бóльшие расстояния, как отталкивая, так и притягивая близкие малые тела, свет испускается, отражается, преломляется, уклоняется и нагревает тела, возбуждается всякое чувство, заставляющее члены животных двигаться по желанию, передаваясь именно колебаниями этого эфира от внешних органов чувств и от мозга мускулам. Но это не может быть изложено вкратце, к тому же нет и достаточного запаса опытов, коими законы действия этого эфира были бы точно определены и показаны<sup>[38]</sup>.

В последующие десятилетия физика, основанная на идее пустоты, шла от одного научного триумфа к другому. Более точные наблюдения движения Луны, приливов и движения комет идеально согласовывались с более точными расчетами, основанными на законах Ньютона. Удивительно, но измерения и электрических сил (между заряженными телами), и магнитных сил (между магнитными полюсами) выявили, что они следуют той же самой схеме, что и гравитационное притяжение: они взаимодействуют через пустое пространство и уменьшаются пропорционально квадрату расстояния. (Сила становится слабее в четыре раза, когда расстояние увеличивается вдвое, а когда расстояние увеличивается втрое – слабее в девять раз и т. д.)

Последователи Ньютона вскоре забыли о его сомнениях. Они стали «более ньютонианцами», чем сам Ньютон. Его резко отрицательное отношение к пустоте было сведено к философским или, по сути, теологическим предрассудкам и в смущенном молчании обходилось. Новые ортодоксы ставили своей целью описать все силы в физике и в перспективе – в химии таким же образом, как Ньютон описал притяжение, т. е. как силы, действующие на расстоянии, с интенсивностью, зависящей от расстояния. Физики, связанные с математикой, изобретали тщательно разработанные математические инструменты, чтобы с успехом пользоваться полезными следствиями такого рода законов. Казалось, надо лишь сформулировать еще несколько связанных с силами законов – и со всей этой историей будет покончено.

## Не пустить пустоту

Майкл Фарадей родился в Англии. Он был третьим ребенком в христианской сектантской семье. Отец его был кузнецом. Майкл так и не получил формального образования. В течение семи лет в подростковом возрасте Фарадей был учеником лондонского переплетчика. Тогда его стали завораживать некоторые книги, которые проходили через его руки, особенно те, в которых говорилось о самосовершенствовании и о науке. Посещая публичные лекции популярного химика Хамфри Дэви и ведя тщательные записи, Фарадей привлек внимание Дэви и был принят на работу в качестве его ассистента. Вскоре он сделал свои собственные открытия... И вошел в историю.

Фарадей так и не продвинулся далеко в математике. Он знал кое-что из алгебры и немного из тригонометрии, не более того. Фарадей не был готов воспринимать существующие («ньютоновские») математические теории электричества и магнетизма, он разработал свои собственные понятия и представления. Вот как Максвелл описывает его результаты:

Фарадей своим мысленным оком видел силовые линии, пронизывающие все пространство. Там, где математики видели центры напряжения сил дальнего действия, Фарадей видел промежуточный агент. Где они не видели ничего, кроме расстояния, удовлетворяясь тем, что находили закон распределения сил, действующих на электрические флюиды, Фарадей искал сущность реальных явлений, протекающих в среде<sup>[39]</sup>.

Ключевое понятие здесь – это силовые линии. Их значение более понятно, если представить его не в словах, а в образах – смотрите илл. 20.

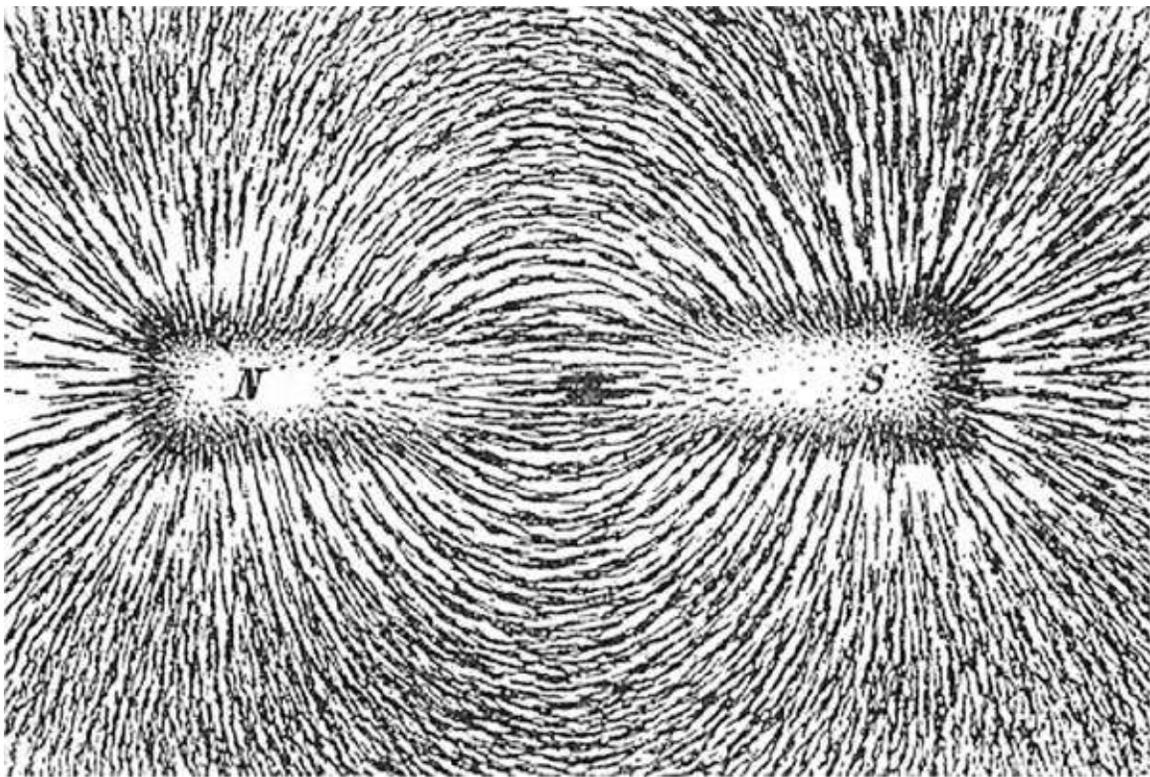
Металлические опилки, свободно двигающиеся на тонком листе бумаги, под воздействием стержневого магнита ведут себя поразительным образом. Они выстраиваются в линии и превращаются в заполняющую все пространство систему кривых. Это и есть силовые (магнитные) линии Фарадея.

Основанная на пустоте теория сил, действующих на расстоянии (дальнего действия), без проблем объясняет этот опыт: частички железа испытывают на себе силу, исходящую от двух полюсов магнита и воздействующую через пустое пространство, и выстраиваются соответственно. Силовые линии – это неожиданно появляющийся,

практически случайный побочный результат действия более глубоких и более простых базовых принципов.

Но объяснение Фарадея было другим, более интуитивным. Согласно Фарадею, металлические опилки просто принимают форму заполняющей пространство среды, которая существует независимо от того, помещены ли в нее сами опилки. Эти линии и представляют суть магнетизма.

Магнит вносит возмущение в эту среду или, как мы должны сказать, следуя за Фарадеем и Максвеллом, в этот флюид, и опилки ощущают это возбужденное состояние среды посредством давления, которое тянет и толкает их.



Илл. 20. Силовые линии Фарадея становятся видимыми

Мы можем провести параллель с более знакомым флюидом – нашей атмосферой около поверхности Земли. Она окружает нас, заполняет пространство. Если атмосфера приходит в движение, мы говорим, что дует ветер. Ветра невидимы сами по себе, но действуют своей силой на куда более видимые материальные тела, такие как флюгеры, птицы или облака. Если мы представим себе, что воздух приводится в движение вентилятором, и используем систему флюгеров, чтобы определить, как именно, то ориентация отдельных флюгеров покажет нам атмосферные

«силовые линии» почти так же, как и металлические опилки Фарадея. В этом случае, конечно, флюгеры будут выстраиваться в соответствии с направлением местного воздушного потока (или ветра).

Продолжив эту аналогию, мы можем в воображении снабдить наши флюгеры устройствами, измеряющими скорость движения воздуха (анемометрами), чтобы определить одновременно направление и скорость ветра. Мы можем сделать это в любой точке пространства и в любое время. Таким образом мы определим поле скоростей, которое заполняет и пространство, и время.

Поле скоростей ветра есть зашифрованное представление возбужденного состояния флюида, а именно – воздуха.

Фарадей предположил, что та же самая логика применима к магнетизму, а также – к электричеству. Согласно Фарадею, электрически заряженное пробное тело во время опыта ведет себя так же, как и комбинация флюгера с анемометром, позволяя определить состояние электрического поля. Пробное тело испытывает на себе действие силы, зависящей от возбужденного состояния электрического флюида – «электрического ветра», так сказать, – в определенном месте и времени. Разделив силу, которую испытывает пробное тело, на его электрический заряд, мы получаем значение, которое не зависит от того, какое именно пробное тело мы возьмем, чтобы измерить его. Мы называем это отношение напряженностью электрического поля.

Здесь, чтобы избежать дальнейшей путаницы, я должен ненадолго отклониться от рассказа, чтобы описать и разрешить надоедливую двусмысленность, которую физики в течение десятилетий навязывали сами себе, своим ученикам и всему остальному миру. А именно: существует обычная практика использовать термин «электрическое поле» для двух отчетливо различающихся вещей. Одно из них – это поле значений силы, деленной на заряд. Как мы только что обсудили, это аналог скорости ветра. К сожалению, также термин «электрическое поле» используют, когда речь идет о лежащей в основе среде (о самом электрическом флюиде) в противоположность его возмущенному состоянию. Все равно как если бы кто-то использовал одно и то же слово для обозначения ветра и для обозначения воздуха. В этой книге я буду использовать термины «электрический флюид» и «магнитный флюид» (и позже – «глюоновый флюид»...) для флюидов во всех случаях, где разница важна. Это решение привело меня к употреблению некоторых несколько странноватых выражений, таких как «квантовая теория флюида», там, где в любом другом месте вы бы увидели «квантовую теорию поля». Я думаю, что моя цель –

добиться ясности – стоит некоторой видимой эксцентричности. (Конец отступления.)

Подход Фарадея привел его к нескольким значительным открытиям, одно из которых – самое значительное – мы обсудим прямо сейчас. Тем не менее *теоретические* идеи Фарадея не производили особого впечатления на его современников. Должно быть, им они казались не революционными, а скорее контрреволюционными. До небесной механики Ньютона самыми влиятельными были воззрения Декарта, который считал, что планеты движутся под влиянием наполняющих пространство вихрей, дуновение которых несет их. Ньютон заменил эти расплывчатые представления простыми, математически выверенными законами движения и притяжения, которые работали исключительно хорошо. Те же основные принципы – действие на расстоянии, спадание силы пропорционально его квадрату – также неплохо описывали электричество и магнетизм. Променять эту солидную схему, которую поддерживают точные расчеты и количественные измерения, на не подкрепленные никаким авторитетом мечты какого-то мечтателя-самоучки? Это едва ли похоже на научную стратегию!

Но Максвелл по-другому воспринял размышления Фарадея. На страницах 196–198 я опишу самого Максвелла как личность. (Совершенно откровенно: он мой любимый физик.) Пока скажу лишь, что и в науке, и в жизни в целом он встречал проблемы с шутливым настроением. Я думаю, он увидел в новых флюидах Фарадея чудесные игрушки и был счастлив терпеливо играть с ними.

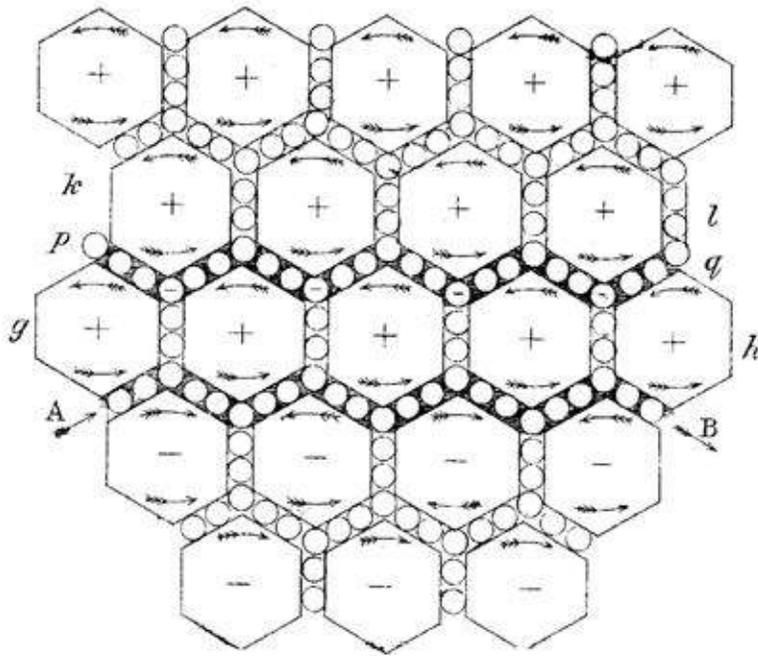
## Дорога к уравнениям Максвелла

Первая значительная работа Максвелла по электричеству и магнетизму (электромагнетизму) была написана в 1856 г., почти на 10 лет раньше «Динамической теории». Она называлась «О силовых линиях Фарадея». Максвелл писал:

Мой замысел – показать, как с помощью строгого приложения идей и методов Фарадея открытая им связь между явлениями самого различного порядка может быть ясно изложена на языке математического мышления.

На 75 страницах своей содержательной работы Максвелл развивал воображаемые образы Фарадея в точные геометрические понятия, а затем – в математические уравнения.

Его вторая большая работа последовала в 1861 г.; она была озаглавлена «О физических силовых линиях». Предыдущая работа самого Максвелла и работы Фарадея облекали наблюдаемые явления электромагнетизма в новую форму. Последние интерпретировались как законы, управляющие возмущениями наполняющей пространство среды, электромагнитного флюида (состоящего, естественно, из электрического и магнитного флюидов). Теперь Максвелл был готов представить механическую модель самих флюидов. Вот так он изобразил ее (илл. 21).



Илл. 21. Представленная Максвеллом механическая модель пространства, заполненного материальной средой, движение которой вызывает электромагнитные поля и силы

Модель Максвелла включает магнитные вихревые атомы (шестиугольники), между которыми расположены проводящие электричество сферы. Эти сферы служат как бы смазкой, заполняющей пространство. Магнитные поля описывают скорость и направление магнитных вихревых движений, а электрические поля – поле скорости или «ветер», связанный с потоком сфер. Хотя эта модель была полностью умозрительной, она давала достоверное представление известных тогда законов электричества и магнетизма и предполагала существование новых.

Можно очень повеселиться и размять мозг, поиграв с моделью Максвелла, но это непростое развлечение, которое далеко не всем по вкусу, поэтому здесь я не буду превращать текст в руководство по нему. В любом случае детали этой модели были хорошо продуманы, хотя и не внушали доверия, что сам Максвелл понимал и охотно признавал.

Но огромное достоинство любой работающей модели – или раздумий над нею – в том, что она заставляет одновременно быть точным и последовательным. Написание уравнений или компьютерной программы требует дисциплины того же рода. Тому, кто это делает, приходится уравнивать свои амбиции и точность.

В модели Максвелла, когда атомы магнитных вихрей вращаются, они становятся сплюснутыми – сжатыми на полюсах и расширенными у экватора, как вращающаяся Земля у Ньютона! – и расталкивают проводящие электричество сферы. И наоборот, потоки проводящих сфер действуют с определенной силой на вихревые атомы и могут заставлять их раскручиваться. Возбуждение любого из флюидов может привести к возбуждению другого. Значит, эта модель предсказывает, что магнитные поля специфическим образом порождают электрические поля, и наоборот.

Здесь-то в дополнение к известным явлениям электромагнетизма модель Максвелла предсказала нечто новое.

Фарадей экспериментально открыл, что, когда магнитные поля меняются во времени, они создают электрические поля. Закон индукции Фарадея, как его называют, лежит в основе конструкции электромоторов и генераторов. Он стал огромным стимулом к развитию техники. Также он был оправданием внутреннего ощущения Фарадея о том, что поля сами по себе являются независимыми элементами физической реальности. Ведь вот он, закон, который почти невозможно сформулировать, не сославшись на них! Модель Максвелла, построенная, чтобы дать место закону Фарадея, принесла дуальный эффект, при котором электрические и магнитные поля менялись ролями. Закон Максвелла, как я его называю, гласил, что электрические поля, которые меняются во времени, создают магнитные поля.

Комбинация этих двух эффектов вела, как увидел Максвелл, к новым потрясающим возможностям. Имея меняющиеся во времени магнитные поля, Фарадей приходил к полям электрическим, которые тоже менялись во времени. Максвелл начинал с меняющихся во времени электрических полей и приходил к полям магнитным, которые тоже менялись во времени. И этот ритм продолжался все дальше:

**... → Фарадей → Максвелл → Фарадей → Максвелл → ...**

Итак, возмущение электрических и магнитных полей может вести свою собственную жизнь: поля в ней танцуют парами и каждое из них порождает другое.

Из своей модели Максвелл смог высчитать, как быстро такие возмущения будут передаваться через пространство. Он определил, что они двигаются со скоростью, которая совпадает с известной по измерениям скоростью света. И именно тут мы видим самое обширное использование

курсива среди всех работ Максвелла:

*Скорость поперечных волновых колебаний в нашей гипотетической среде... столь точно совпадает со скоростью света... что мы едва ли можем отказаться от вывода, что свет состоит из поперечных колебаний той же самой среды, которая является причиной электрических и электромагнитных явлений*<sup>[40]</sup>.

Для Максвелла было очевидно, что это совпадение скоростей не было случайным. Его электромагнитные возмущения – это *и есть* свет, а свет – это, в сущности, не что иное, как возмущение в электрических и магнитных полях.

Когда я читал этот отрывок, я обнаружил, что пытаюсь представить себе, что чувствовал Максвелл, и затем вспомнил несколько эпизодов из моей собственной работы, когда все неожиданно сходится, а потом мне в голову пришли строки Китса:

Я счастлив. Так ликует звездочет,  
Когда, вглядевшись в звездные глубины,  
Он вдруг светило новое найдет.  
Так счастлив Кортес был, чей взор орлиный  
Однажды различил над гладью вод  
Безмолвных Андов снежные вершины<sup>[41]</sup>.

Эти строки мне хочется перечитывать снова и снова!

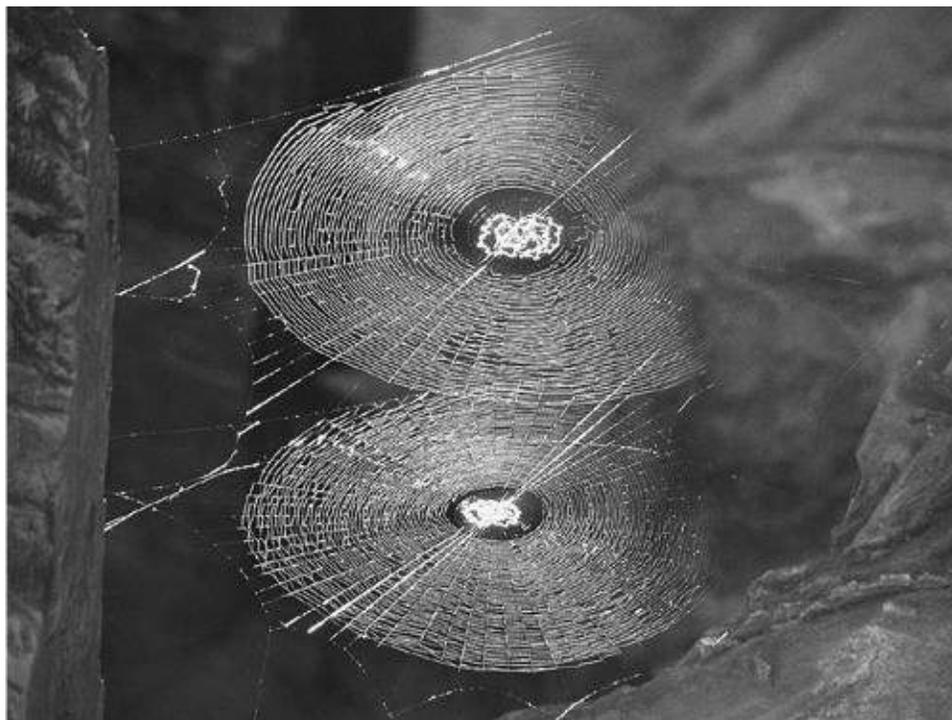
Умозаключение Максвелла, если оно верно, давало фантастическое объединение электромагнетизма и оптики. Кроме того, оно обеспечивало новый, потрясающий взгляд на сам свет. Оно «упрощало» свет до электромагнетизма – экспансивное упрощение, если такое когда-нибудь бывало!

Но казавшееся диким предположение Максвелла, пока оно оставалось соединенным с абсурдной моделью, было как искра золота в грязи – обещанием красоты, которой еще нет. Лишь дикое предположение. Следующим шагом следовало избавиться от шлака.

**Человек-паук**

Прежде чем мы перейдем к самим уравнениям Максвелла, я бы хотел поделиться с вами фантазией, которая пришла мне в голову, когда я писал эту главу.

Представьте себе, что появилась раса пауков настолько умных, чтобы начать создавать паучью физику. На что это будет похоже?



Илл. 22. Интеллектуальные пауки ломают голову над зачатками теории поля. Сравните это паучье представление с илл. 20 и 21

У пауков плохое зрение, поэтому для них не станет отправной точкой взгляд, который преподносит нам наше визуальное восприятие: мир несвязанных объектов, свободно перемещающихся внутри своего хранилища – пространства. Вместо этого паучья сенсорная вселенная основана на прикосновении. Если говорить более точно, пауки чувствуют вибрацию нитей своей паутины, и из этой вибрации они делают вывод о существовании объектов, которые побуждают их на действие (в особенности о потенциальной пище). Для интеллектуальных пауков ввести понятие силовых линий не потребовало бы большого напряжения воображения. Передающие силу, наполняющие пространство сети – это их обычный способ существования. Их мир – это мир связей и колебаний.

Пауки, так сказать, до мозга костей знали бы, что силы передаются через наполняющую пространство среду и проходят через нее с конечной

скоростью. Они инстинктивно избегали бы пустоты. Они все были бы Фарадеями и скорее, чем мы, породили бы идею Всемирной паутины (илл. 22).

## Уравнения Максвелла

В «Динамической теории электродинамического поля» Максвелл начинает все заново. Работа «О физических силовых линиях» напоминала огромный Вопрос, касающийся выводов из одной спекулятивной Гипотезы, нуждающейся в поддержке от Природы. «Динамическая теория» следовала традиции «Начал», переходя от наблюдаемых фактов к системе основных уравнений.

В то время как Ньютон опирался на законы планетарного движения Кеплера, Максвелл в качестве основы взял четыре закона, открытые несколькими учеными ранее: два закона Гаусса, закон Ампера и закон индукции Фарадея. (Они описываются ниже, а также в разделе «Термины».) Максвелл выразил эти законы на языке электрического и магнитного флюидов Фарадея, который он сделал точным и математическим в своих более ранних работах.

Также Максвелл добавил свой собственный закон, дуальный закону Фарадея. Это дополнение *не было* основано на экспериментах<sup>[42]</sup>. Как мы уже говорили, Максвелл первоначально пришел к постулированию этого закона, работая со следствиями из своей абсурдной модели. В новой трактовке он показал, что новый закон необходим, чтобы сделать старые законы согласованными!

На цветной вклейке N воспроизведены уравнения Максвелла. То, что они могут быть представлены в рисунках, является важным аспектом их красоты! Эта система из четырех уравнений, объединяющих четыре уже известных закона с новым дополнением, сейчас всем известна как уравнения Максвелла. (В четырех уравнениях скрыто пять законов, поскольку одно из уравнений суммирует два физических явления.) Вплоть до настоящего времени они остаются лучшим фундаментальным описанием электромагнетизма и света.

Здесь я не могу устоять от того, чтобы воспроизвести действительное содержание уравнений Максвелла. После того как я их так разрекламировал, вам, возможно, будет любопытно *в точности* узнать, из-за чего весь этот шум!

Я пытался сделать это способом, который достаточно краток, точен и понятен. Но существует некоторое противоречие между этими целями, и в результате этот отрывок может показаться вам сложным. Я советую вам подходить к нему так, как вы, может быть, подходите к незнакомому

произведению искусства – как к возможности, а не как к бремени. Вы можете вначале прочитать его бегло и рассмотреть картинки, чтобы получить общее представление. Затем вы сможете решить, хочется ли вам читать его более внимательно. И я надеюсь, что вы это сделаете, – в конце концов, уравнения Максвелла являются *великим* произведением искусства. Вы можете сделать это на досуге, поскольку в нашей дальнейшей медитации не будет отсылок к этим деталям. Также вы можете справиться в «Терминах», где то же самое рассматривается с немного иных точек зрения. В комментариях я также указал несколько великолепных бесплатных веб-сайтов, где вы можете интерактивно изучать уравнения Максвелла.

Вначале я приведу неформальную версию, затем – более точную, в описаниях и рисунках для каждого из пяти физических законов, приводящих к четырем уравнениям Максвелла. Чтобы следовать за ходом мысли, обратитесь к цветной вклейке N, поскольку мы прочтем ее всю, строчка за строчкой.

Вначале разрешите дать пояснения к обозначениям на рисунках:  $\vec{E}$  обозначает электрическое поле,  $\vec{B}$  – магнитное поле,  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  – скорости изменения этих величин во времени,  $Q$  – это электрический заряд, а  $\vec{I}$  – электрический ток. (Маленькие стрелки напоминают о том, что все эти величины векторные – они имеют направление, так же как и величину.)

Теперь перейдем к законам:

- *Электрический закон Гаусса* выражает равенство между потоком электрического поля, уходящим из некоторого объема, и электрическим зарядом внутри этого объема. Он говорит о том, что электрические заряды – это точки зарождения электрических силовых линий (или точки их завершения). Они находятся там, где электрические силовые линии могут начаться или закончиться.

Определение потока проще всего понять по ассоциации с течением жидкости. Электрическое поле, как мы уже обсудили, это величина, которая в каждой точке имеет численное значение и направление. Поле скоростей в текущей жидкости имеет такой же характер. Если у нас есть некий объем и поле скоростей, мы можем рассчитать, насколько быстро жидкость покидает этот объем. Это, по определению, и есть поток жидкости, покидающей данный объем. Если мы произведем над электрическим полем те же самые математические операции, которые мы только что провели над полем скорости жидкости, чтобы высчитать его поток, мы получим

(по определению) поток электрического поля.

- *Магнитный закон Гаусса* гласит, что поток магнитного поля, исходящего из любого объема, равен нулю. Магнитный закон Гаусса, конечно, очень похож на электрический закон Гаусса, но с дополнительным упрощением – ведь магнитного заряда не может быть! Он говорит, что у магнитных полей нет источников – магнитные силовые линии никогда не могут завершиться, но должны вместо этого продолжаться вечно или замыкаться сами на себя.

- *Закон Фарадея* особенно интересен, потому что он включает время. Закон устанавливает соотношение между электрическими полями и темпом изменения магнитных полей. Закон гласит, что, когда магнитные поля изменяются во времени, они порождают электрические поля, закручивающиеся вокруг магнитных.

Чтобы точно сформулировать закон Фарадея, рассмотрим кривую, которая образует границу поверхности. Закон Фарадея утверждает равенство циркуляции электрического поля по этому контуру (с отрицательным знаком) скорости изменения магнитного потока через поверхность. Циркуляцию, как и поток, проще всего понять через ассоциацию с полем скоростей в течении жидкости. Мысленно расширим нашу кривую, превратив ее в узкую трубку, и рассчитаем количество жидкости, проходящей по этой трубке в единицу времени. Это и будет циркуляция потока жидкости. Если мы проведем над электрическим полем те же математические операции, которые мы провели над полем скоростей жидкости, то получим (по определению) циркуляцию электрического поля.

Наконец, чтобы быть совершенно точными, мы должны разрешить неоднозначность с направлением: определяя циркуляцию, в каком направлении мы должны двигаться вокруг кривой? Определяя поток, в каком направлении мы должны двигаться сквозь поверхность? Чтобы получить определенное соотношение, мы должны установить соответствие между существующими вариантами выбора. Стандартным способом является так называемое правило правой руки: если мы двигаемся по кривой в направлении, указанном четырьмя пальцами правой руки, тогда мы должны считать поток направленным в сторону большого пальца.

- *Закон Ампера* устанавливает соотношение между магнитными полями и электрическими токами. Он гласит, что электрические токи порождают магнитные поля, закручивающиеся вокруг них.

Чтобы точно сформулировать закон Ампера, рассмотрим кривую, образующую границу поверхности. Закон Ампера утверждает равенство между циркуляцией магнитного поля вдоль кривой и потоком

электрического тока сквозь поверхность.

Стоит отметить, что одни и те же понятия потока и циркуляции повторяются в этих законах несколько раз. Поток и циркуляция – это самые основные способы для мысленного восприятия полей. Они заключают в себе соответственно силовые линии, устремляющиеся прочь по прямой и завивающиеся в петли. Их выдающееся положение в физических законах – это дар Материи Уму.

Но когда Максвелл собрал все эти четыре закона вместе, он нашел... противоречие! (Но пятый закон Максвелла исправляет его.) Чтобы увидеть это, обратимся к цветной вклейке О.

Проблема возникает в том случае, если вы пытаетесь применить закон Ампера в ситуации, когда электрический ток прерывается. На иллюстрации на вклейке О показан электрический ток, втекающий в и вытекающий из пары пластин, разделенных промежутком. (Специалисты могут узнать модель конденсатора.) Согласно Амперу, магнитная циркуляция вдоль контура равна потоку тока, проходящему сквозь любую поверхность, которую он ограничивает. Но здесь мы получим различные значения для потока в зависимости от того, какую поверхность возьмем! Если мы берем диск внутри промежутка между пластинами (на иллюстрации он обозначен синим), мы получаем нуль. Если мы возьмем полусферу, которая пересекает провод (на иллюстрации показана желтым), мы получим полный поток.

Ой-й!

Чтобы справиться с этим противоречием, нам нужно что-то новое. Благодаря более ранней работе со своей моделью у Максвелла был готов

- *Закон Максвелла*, нечто вроде обратного утверждения к закону Фарадея с заменой ролей электрического и магнитного полей. Он гласит, что, когда электрические поля меняются со временем, они порождают магнитные поля, закручивающиеся вокруг них.

Диск, поставленный в промежуток между пластинами, не перехватывает поток тока, но он перекрывает изменяющееся электрическое поле. Желтая полусфера дает магнитную циркуляцию в соответствии с законом Ампера, тогда как голубой диск дает магнитную циркуляцию в соответствии с законом Максвелла, но оба они приводят к одному и тому же результату! Тем самым противоречие уходит. После добавления закона Максвелла полная система уравнений Максвелла становится согласованной.

В этом качестве – как приводящий в порядок версию «Динамической

теории электродинамического поля» – закон Максвелла приобрел новый статус. Он потерял свои связи с механическими моделями, вихревыми атомами и смазкой из перекатывающихся сфер. Теперь мы видим, что он был логически необходим для согласования всех остальных законов, которые были выведены из экспериментов.

## **Вознесение Максвелла**

Максвелл был верующим христианином и воспринимал свою веру очень серьезно. Размышляя о своей работе, провозглашающей мировые флюиды электричества и магнетизма, он был полностью вознагражден:

Огромные межпланетные и межзвездные пространства больше не будут рассматриваться как пустыни во вселенной, которые Создатель не посчитал подходящими, чтобы наполнить символами многообразного порядка Своего царствия. Теперь мы видим, что они полны чудесной средой; так полны, что никакая человеческая сила не может удалить ее из малейшей частички пространства или создать малейший изъян в этой бесконечной непрерывности.

## **«Умнее нас»**

Джеймс Клерк Максвелл умер в 1879 г. в возрасте 48 лет. В то время его теория электромагнитных полей рассматривалась как интересная, но неубедительная. Продолжалась серьезная работа над конкурирующими теориями дальнего действия. Самое важное предсказание теории Максвелла о том, что электрические и магнитные поля могут давать жизнь друг другу и распространяться как самообновляющиеся волны, не было подтверждено.

Это сделал Генрих Герц, который первым разработал и в 1886 г. начал проводить эксперименты, способные подтвердить идею Максвелла. Задним числом мы должны признать, что именно Герц создал первое поколение радиопередатчиков и приемников.

Казавшаяся магической возможность вести связь на огромных расстояниях через пустое пространство с помощью радио появилась из представления о том, что это пустое пространство вовсе *не является* пустотой. Оно наполнено флюидами и беременно нерожденными

возможностями.

Генрих Герц умер в 1894 г. в возрасте 36 лет. Но до своей смерти он написал эту прекрасную оду уравнениям Максвелла, которое нацелено прямо в суть нашего Вопроса:

Нельзя изучать эту удивительную теорию, не испытывая по временам такого чувства, будто математические формулы живут собственной жизнью, обладают собственным разумом, – кажется, что эти формулы умнее нас, умнее даже самого автора, как будто они дают нам больше, чем в свое время в них было заложено.

Мы рассмотрели уравнения Максвелла и восхитились их мудростью. В этом отрывке Герц говорит об уравнениях такие вещи, которые часто говорят о великих произведениях искусства – о том, что их значение простирается гораздо дальше, чем замышлял их творец.

Что же это за «дальше», о котором говорит Герц?

Это, по крайней мере, три вещи:

- сила;
- созидательная красота;
- зарождение новой идеи – симметрии уравнений.

## Сила

Исходя из своих уравнений, Максвелл предположил, что свет – это электромагнитная волна. Но видимый свет – всего лишь вершина огромного айсберга, невидимого для нас и почти неизвестного во времена Максвелла. Можно получить электромагнитные волны любой заданной длины<sup>[43]</sup>, и спектр видимого света Ньютона – всего лишь крохотная песчинка в этой бесконечности, как мы можем видеть на цветной вклейке Р. Решение уравнений Максвелла описывает гораздо больше, чем один лишь видимый свет. Существуют решения, где колебания между электрическими и магнитными полями проходят на различных расстояниях (длинах волн). Видимый спектр соответствует узкому диапазону внутри бесконечного континуума чисто электромагнитных волн.

Я уже упоминал новаторскую работу Герца, которая предоставила в наше распоряжение радиоволны и стала основой для радиотехники. Радиоволны – это «свет» с гораздо большей длиной волны и более низкой частотой по сравнению с видимым светом. Другими словами,

в радиоволнах колебания между электрическими и магнитными полями происходят в пространстве более плавно и протекают более медленно во времени. Переходя от радиоволн к волнам с более короткой длиной, мы получим микроволновое излучение, инфракрасные лучи, видимый свет, ультрафиолет, рентгеновские лучи и гамма-излучение. Каждая из этих многочисленных форм «света» берет свое начало в чисто теоретической конструкции – другими словами, мечта породила фонтан современных технологий. Они все – в уравнениях Максвелла. Разве это не сила?

## **Созидательная красота**

Решая уравнения Максвелла, часто находишь, что они открывают прекрасные и удивительные структуры.

На вклейке Q, например, показана тень, которую отбрасывает лезвие бритвы или какой-то другой предмет с острым прямым краем, если осветить его «очищенным» светом. Если увеличить изображение тени, получившейся благодаря очищенному свету, мы обнаружим богатый и красивый узор.

Геометрические соображения, основанные на грубой идее о том, что свет распространяется лишь вдоль прямых линий, говорят нам, что тень – это четкое деление между светом и темнотой. Но когда мы рассчитываем волновые возмущения электрического и магнитного полей, у нас получается гораздо более замысловатая структура. Свет проникает в области темноты (в зону геометрической тени), а темнота появляется и там, где должен быть свет. Вид этой структуры можно точно рассчитать при помощи уравнений Максвелла. И теперь, когда у нас есть яркие монохроматические лазеры, можно напрямую сравнивать эти предсказания с реальностью. Теперь, глядя на эту фотографию, нам остается только воскликнуть: «Разве это не прекрасно?!»

## **Симметрия уравнений**

Изучение уравнений Максвелла открыло нам совершенно новую идею, которая ранее не играла большой роли в науке. Это идея о том, что уравнения, как и предметы, могут быть симметричными и что уравнения, которые Природа любит использовать в своих фундаментальных законах, чрезвычайно симметричны. Сам Максвелл и не догадывался об этой идее; великолепный пример того,

как из физической теории можно получить гораздо больше, чем было заложено автором!

Что означает, когда говорят, что уравнения симметричны? Хотя слово «симметрия» имеет различные, часто расплывчатые значения в повседневной жизни, в математике и физике оно определяется достаточно точно. Здесь симметрия означает Изменение без изменения. Это определение может звучать таинственно или даже парадоксально, но означает нечто совершенно конкретное.

Давайте вначале посмотрим, как это странное определение симметрии прилагается к предметам. Мы говорим, что предмет симметричен, если мы можем произвести над ним действие, которое могло бы изменить его – но в действительности не изменяет. Так, например, окружность очень симметрична, потому что вы можете повернуть ее вокруг центра и, хотя каждая ее точка сдвинется, в целом она останется той же самой окружностью, тогда как, если вы возьмете какую-то менее правильную форму и станете поворачивать ее, вы будете получать нечто совершенно иное. Правильный шестиугольник менее симметричен, потому что вы должны повернуть его на  $60^\circ$  (1/6 часть окружности), чтобы получить ту же самую форму, а в равностороннем треугольнике симметрии еще меньше, потому что вы должны повернуть его на  $120^\circ$  (1/3 часть окружности). Произвольная неправильная фигура не имеет симметрии вообще.

Можно пойти и в противоположном направлении. Мы можем начать с симметрии и прийти к объектам. Например, мы можем искать кривые, которые не меняются при вращении вокруг какой-либо точки, а затем открыть, что окружности являются уникальным воплощением такой симметрии.

Та же самая идея может быть приложена к уравнениям. Вот простое уравнение:

$$X = Y$$

...которое, как вы видите, идеально уравновешено между X и Y. Появляется искушение сказать, что оно симметрично. И, в самом деле, так и есть, согласно математическому определению. Ведь если вы замените X на Y, а Y на X, вы получите другое уравнение, а именно

$$Y = X$$

Это новое уравнение отличается по форме, но имеет точно то же самое содержание, что и старое. Мы получаем Изменение без изменения, т. е. симметрию.

А вот если мы поменяем местами  $X$  и  $Y$ , уравнение  $X = Y + 2$  изменится на  $Y = X + 2$ , что вовсе не означает то же самое. Таким образом, это уравнение несимметрично.

Симметрия – это свойство, которым одни уравнения и системы уравнений обладают, а другие – нет.

Уравнения Максвелла, как выясняется, обладают огромным количеством симметрии. Существует множество преобразований, которые вы можете провести с уравнениями Максвелла, и они изменяют их форму, но не содержание в целом. Интересные симметрии уравнений Максвелла значительно более сложны, чем тот несерьезный пример, который мы только что рассмотрели, но принцип – тот же самый.

Как в случае с предметами, так и с уравнениями мы можем пойти противоположным путем. Вместо того, чтобы составлять уравнения и затем искать, какую симметрию они позволяют отразить, т. е. идти по пути

***уравнения → симметрия,***

...мы можем начать с симметрии и искать уравнения, которые позволяют ее выразить:

***симметрия → уравнения***

Замечательно, что этот путь возвращает нас к уравнениям Максвелла! Другими словами, уравнения Максвелла – это, по существу, единственные уравнения, которые имеют симметрию, которую сами же создают. Они подобны окружностям, которые определяются своей собственной высокой симметрией вращения. Таким образом, уравнения Максвелла воплощают идеальное соответствие:

***уравнения ↔ симметрия***

Не будет большой натяжкой увидеть в этом соотношении пример нашего желаемого соответствия:

В современной физике мы выучили этот урок досконально. Мы научились переходить от симметрии к истине. Вместо того, чтобы, используя эксперименты, создавать уравнения и потом находить (к нашему восторгу и изумлению), что в этих уравнениях много симметрии, мы предлагаем уравнения, в которых заложена изначальная обширная симметрия, а затем проверяем, использует ли их Природа. Это оказалось удивительно успешной стратегией.

Темы связи, симметрии и света, затронутые в этой главе, сходятся вместе в искусстве мандалы<sup>[44]</sup>. Мандалы – это символическое представление Вселенной. Они используются как инструменты для медитации и транса. Обычно мандалы отображают высокую степень симметрии между связанными замысловатыми частями. Часто они являются цветными. Я думаю, что мандала, изображенная на вклейке R, – подходящее заключение к этой главе.

## Максвелл II: Двери восприятия

Если б врата познания были открыты, людям открылась бы бесконечность.

Но люди укрылись от мира и видят его лишь в узкие щели своих пещер.

Уильям Блейк. Бракосочетание Рая и Ада<sup>[45]</sup>

В этой главе мы уделим отдельное внимание особой составляющей нашего вопроса – красивой идее о том, что, лучше понимая, как мы воспринимаем мир, мы можем расширить наш опыт познания мира.

Фантастическая «мультимедийная» поэма Уильяма Блейка «Бракосочетание Рая и Ада» стремится к тому, чтобы объединить, как заявляет автор, «то, что в религии называется Добром и Злом» (см. вклейку S). Согласно Блейку, «Добро пассивно и подчиняется Мысли. Зло активно и порождается Действием. Добро – это Рай, Зло – это Ад». Цели нашей медитации – найти гармонию Идеального и Реального и увидеть вещи целиком – говорят о том же стремлении.

Блейк обращается к образу пещеры, и эта отсылка заставляет вспомнить платонову Пещеру. Узники платоновой Пещеры видели мир черно-белым, им была неведома красота цвета. Хотя в нашем случае мы не дошли до такой крайности, мы тоже ощущаем только маленькую часть из всего, что может предложить свет.

Мы сопоставим полностью реальность света, которую призвано воспринимать зрение, с той проекцией реальности, которую человеческое зрение получает в действительности. Эту проблему любил Максвелл и многое сделал для того, чтобы ее прояснить.

В этом контексте мы подкрепим доказательствами провидческую интуицию Блейка, отвечая на два вопроса, которые он поднимает:

- *Существуют ли бесконечности, которые закрыты от нас?* Да. Мир физического света – это вдвойне бесконечномерное пространство, из которого мы воспринимаем только его трехмерную проекцию.

- *Сможем ли мы снять с них покрывало неизвестности?* Да. Вопрос не в том, *возможно ли это*, поскольку, разумеется, возможно, но в том, *как это сделать* на практике.

Наше исследование восприятия света также станет прекрасной

подготовкой к пониманию глубокой сущности проекта, по которому построена сама Природа, в следующих главах.

## Два вида желтого

Желтый – один из тех цветов, которые появляются в радуге и в спектре, получающемся при прохождении солнечного света сквозь призму. Спектральный желтый является одним из чистых цветов Ньютона, так же как и красный, зеленый и синий.

Но есть и другая, очень отличающаяся форма света, который выглядит желтым. Мы можем соединить спектральный красный и спектральный зеленый, чтобы получить не спектральный, но вполне убедительный цвет, который мы воспринимаем как желтый (см. вклейку Т). Полученный таким образом желтый очень отличается от спектрального желтого как физическая сущность, хотя оба этих цвета воспринимаются как идентичные.

Точно так же вовсе не нужно добавлять все цвета спектра солнечного света в той же самой пропорции, в которой они присутствуют в нем, чтобы получить белый, который выглядит как солнечный свет. Как вы можете видеть на цветной вклейке Т, можно получить вполне убедительный для восприятия белый, смешав только три спектральных цвета, а именно – красный, зеленый и синий. Если вы пропустите такой «белый» луч сквозь призму, вы получите не полную радугу, а только три линии. Как физическая сущность этот луч значительно отличается от солнечного света, но человеческое зрение воспринимает и то и другое одинаково.

Отметим, что результаты, которые вы получите, смешивая несколько разноцветных лучей света, как показано на вклейке Т, полностью отличаются от результатов, которые получаются при смешении пигментов тех же цветов, как вы делаете, когда перемешиваете краски или накладываете друг на друга карандашные штрихи. Когда вы соединяете цветные лучи света, вы просто складываете свет, который они содержат. С красками все по-другому. Мы обычно видим краски, скажем, во время рисования, в отраженном солнечном свете (или каком-то близком искусственном заместителе). Цвет, который мы видим в отраженном свете, зависит от того, какие спектральные цвета отбирают, или поглощают, пигменты во время отражения лучей света. Когда вы во время рисования смешиваете две краски, вы складываете способности поглощения обеих этих красок. Добавление цветов в качестве лучей и добавление цветовой абсорбции (за которую отвечают пигменты) – очень разные вещи. Например, вы достаточно легко получите черный – отсутствие

отражения, – смешав достаточное количество различных пигментов, но никогда не сможете добиться этого, комбинируя лучи света различных цветов. Поэтому не должно быть ничего удивительного в том, что существуют совершенно разные правила для комбинации лучей света и для смешивания пигментов различных цветов. Сложение лучей в принципе проще и физически более фундаментально, чем смешивание пигментов, и именно это мы обсудим далее.

## Цветные волчки и цветные коробки

Существенное наблюдение о том, что разные комбинации спектральных цветов могут выглядеть одинаково, естественным образом ведет к более широкому вопросу: какие именно комбинации выглядят одинаково? Какого рода пространство, которому принадлежат воспринимаемые цвета?

До, во время и после написания своей эпохальной теоретической работы, утверждающей электромагнитную природу света, Максвелл проделал огромное количество экспериментов именно по этим вопросам. Его результаты в этой области при ближайшем рассмотрении воистину фундаментальны. Как мы обсудим далее, они привели к зарождению важных технологий и могут дать нам еще больше.

На илл. 23 изображен молодой Максвелл. Как вы можете заметить, он держит в руке круглый предмет необычного вида. То, что вы видите, это волчок, разработанный им специально для того, чтобы изучать цветовое восприятие. Вы заметите, что фотография черно-белая. Цветная фотография еще не была изобретена – сам Максвелл сделает это немного позже!

Цветной волчок кажется игрушкой, и в чем-то это так и есть, но также он является и кое-чем более значительным. Простая, но глубокая идея превращает цветной волчок в мощный инструмент изучения цветового восприятия.



Илл. 23. Максвелл держит в руке один из первых цветных волчков

Хотя мы пребываем в уверенности, что наше зрение открывает нам «мгновенное», относящееся к данному моменту состояние мира и демонстрирует нам постоянное и непрерывное отражение происходящих во времени событий, в реальности дело обстоит совсем по-другому. Наше зрение – это всего лишь чуть больше, чем серия моментальных снимков, каждый из которых делается со временем выдержки примерно в  $1/25$  секунды. Наш мозг заполняет промежутки между этими моментальными снимками, чтобы создать иллюзию непрерывности. Этот факт используется в кино и телевидении: если изображение обновляется достаточно быстро, то мы не чувствуем, что оно является последовательностью кадров или серией быстрых обновлений пикселей. Цветной волчок действует, как описано ниже, благодаря тому же самому эффекту инерционности зрения.

На своих цветных волчках Максвелл располагал вдоль окружности две полосы цветной бумаги, как это показано на вклейке U. Благодаря инерционности зрения, когда мы быстро раскручиваем этот диск с двумя полосками вокруг их центра, мы воспринимаем смешение цветов, которое

создает цветная часть каждой полоски, так, как мы воспринимали бы цветные лучи света. В этом гениальность цветного волчка Максвелла: когда мы смотрим на волчок, наши глаза складывают отраженные лучи. Цветные волчки, сконструированные Максвеллом, позволяют нам узнать вполне систематическим и количественным образом, какие комбинации цветов выглядят одинаково.

Конечно, мы должны еще проверить, сообщают ли разные люди, смотрящие на волчки, об одинаковых совпадениях. В основном это так, хотя среди вполне обычных людей встречаются небольшие вариации. Также мы должны допустить исключения для нескольких видов дальтонизма и учитывать возможность того, что некоторая часть населения обладает особой, более сильной способностью к различению цветов. Мы обсудим эти отклонения от нормы позже. По большей части, однако, большинство людей дают одинаковые ответы. Так появляется неисчерпаемая тема для маловразумительных философских дебатов – имеют ли разные люди одинаковое субъективное восприятие, скажем, красного цвета. Что мы можем сказать точно, так это то, что мое отображение, или проекция физического света в воспринимаемые цвета очень близко совпадает с вашим. Я тоже вижу многие соединения спектральных цветов как желтый, а многие другие – как пурпурный. Что еще важнее, мы приходим к согласию по поводу того, из каких цветов составлено каждое сочетание. Если бы это было не так, рассуждения людей о том, где какой цвет, были бы чересчур запутанными.

Главный результат, полученный из этих исследований, – это то, что, используя всего три цвета на внутренней полоске, мы можем получить совпадение с любым цветом на внешней. Так, например, мы можем использовать спектральный красный, зеленый и синий в правильной пропорции, чтобы получить оранжевый, розовато-лиловый, зеленовато-желтый, красновато-коричневый, небесно-голубой, цвет темного пиона или любой другой желаемый цвет. Тримя основными цветами не обязательно должны быть красный, зеленый и синий (RGB<sup>[46]</sup>) – вполне подойдут любые три, в том числе и комбинации цветов, при условии, что они независимы. (Если один из выбранных вами основных цветов может быть представлен как комбинация двух других, он не дает никаких новых возможностей.) В то же время три основных цвета нам необходимы. Если вы ограничите себя двумя основными цветами – не важно какими, – тогда, смешивая их, вы не сможете получить большую часть цветов.

Иначе говоря, мы можем обозначить любой воспринимаемый цвет, сказав, сколько красного, зеленого и синего взято для того, чтобы получить

его. Это полностью аналогично тому, как мы можем определить место, сказав, насколько далеко от нас оно находится в направлениях север – юг, восток – запад и по вертикали. Обычное пространство – это трехмерный континуум, и таким же является пространство воспринимаемых цветов.

Возвращаясь к вклейке T, мы можем видеть, что наш основной результат состоит в том, что, регулируя относительную интенсивность различных лучей, мы можем заставить появиться в середине, где свет от всех трех лучей перекрывается, любой воспринимаемый цвет, а не только белый.

В последующей работе Максвелл придумал, как соединить лучи света напрямую, используя приспособления, которые он называл цветными коробками. Главная идея такого приспособления проста – извлечь цвета из призматической радуги в тех местах и пропорциях, которые вам нужны, затем собрать их заново, используя зеркала и линзы. Конкретная реализация в силу ограничений технологий того времени была очень хитроумной. По сути, единственным доступным источником света было солнце, а единственным доступным датчиком – человеческий глаз. Цветные коробки Максвелла были огромными – шести футов<sup>[47]</sup> в длину и более – и наполнены зеркалами, призмами и линзами. Хотя они были громоздкими, цветные коробки обеспечивали гораздо большую точность измерений, чем могли дать цветные волчки.

Идея Максвелла – подвергнуть свет разделению, преобразованию и снова соединению – опережала свое время. Современные технологии должны дать нам возможности попытаться произвести со светом гораздо более смелые манипуляции, о чем я расскажу далее.

## Реализация идей

Тот факт, что можно синтезировать все воспринимаемые глазом цвета, смешивая только три цвета, широко применяется в современной цветной фотографии, телевидении и компьютерной графике. Например, в цветной фотографии используется три вида светочувствительных красителей. На компьютерных мониторах три вида источников цветного света. Когда вам обещают «миллионы цветов» на экране, это относится к миллионам различных способов совместить относительную интенсивность этих источников. Другими словами, берутся миллионы различных точек, но все – внутри трехмерного пространства.

Для художников возможность получить один и тот же

воспринимаемый цвет многими различными способами открывает творческие перспективы. Вы можете добавить местную текстуру, сохраняя в то же время общий (усредненный) цвет. Это, по существу, другой вид цветного волчка, который использует инерционность зрения в пространстве, а не во времени. Пространственное усреднение менее грубо и потому обеспечивает более широкую палитру вариантов. В особенности часто подобными возможностями пользовались импрессионисты, создавая шедевры, как на картине на вклейке V – это Клод Моне «Сток (закат солнца)» из его цикла «Стога».

Добавляя различные пигменты отдельно, на различных (хотя и расположенных очень близко) частях холста, а не накладывая их друг на друга, импрессионисты следовали стратегии, похожей на ту, которая используется в цветных волчках Максвелла, но перенесенной из времени в пространство. В обоих случаях свет из различных мест комбинируется согласно правилам сложения лучей, поскольку художник смешивает не краски, а отражаемый ими свет.

## Утерянные бесконечности

Максвелл дал нам новую концепцию того, чем же является свет и каково наше восприятие света. А это совершенно разные вещи! Как предугадал Блейк, они бесконечно различны.

Сравнивая полную информацию о мире вокруг с информацией, которую мы улавливаем, мы можем достаточно точно определить то, что теряется. Затем мы можем как следует поразмыслить о том, как восстановить хотя бы часть этих потерь.

## Сырье: электромагнитные волны

Я упомянул о появлении света из уравнений Максвелла в предыдущей главе. Теперь мне бы хотелось исследовать этот вопрос немного глубже. В качестве вознаграждения мы сможем прочно ухватить утерянные бесконечности.

Максвелл описывает свой фундаментальный подход к свету таким образом:

Чем же тогда является свет в соответствии с электромагнитной теорией? Он состоит из знакопеременных быстро повторяющихся поперечно направленных магнитных возмущений, сопровождаемых электрическими смещениями. При этом направление электрического смещения находится под прямым углом к магнитному возмущению, и оба они – под прямыми углами к направлению луча.

Вклейка W расшифровывает это описание.

Электрические и магнитные поля в любой точке имеют и величину, и направление, поэтому мы можем изобразить их цветными стрелками, исходящими из этой точки. Но если мы сделаем это в каждой точке пространства, у нас получится путаница из перекрывающихся друг друга стрелок, поэтому на иллюстрации показаны только поля вдоль одной линии.

Если вы представите себе всю структуру, двигающуюся в направлении черной стрелки, вы увидите, что в каждой точке изменяется электрическое поле (показано красным), так же как и магнитное поле (показано синим).

Как мы уже обсудили в предыдущей главе, изменения электрических полей производят магнитные поля, а изменения магнитных полей – электрические. Вы можете видеть, что, если всё подобрано правильно, движущееся колебание может быть самовоспроизводящимся – это значит, что изменения в электрических полях вызывают изменения в магнитных полях таким образом, чтобы создать электрические поля, которые создают магнитные поля, и весь этот процесс начинает жить собственной жизнью. Это трюк, достойный барона Мюнхгаузена, который – если верить самому барону Мюнхгаузену – вытянул сам себя из болота за уши от своих же ботфорт<sup>[48]</sup>. Но для электромагнетизма это – не сказка и не «магический» реализм, а *реальная магия*.

В любой конкретной точке с течением времени стрелка электрического поля идет то вверх, то вниз, как поверхность воды при волнении. Обычно мы называем движущиеся, самовоспроизводящиеся электромагнитные колебания электромагнитными волнами.

На иллюстрации показана достаточно простая электромагнитная волна, где рисунок электрических и магнитных колебаний повторяется через определенные промежутки (и практически следует графику синусоиды). Я называю это чистой волной, а почему, вот-вот станет понятно. В этом случае мы называем длину промежутков между повторяющимися колебаниями длиной волны. Их последовательность также повторяется во времени; темп этих повторений мы называем частотой волны.

Очень важным свойством электромагнитных волн является то, что вы можете усиливать и складывать их. Это означает, что, если у вас есть решение уравнения Максвелла для электромагнитной волны и вы умножите значения электрического и магнитного поля на один и тот же коэффициент, вы по-прежнему будете иметь решение уравнения Максвелла. Таким образом, если вы увеличите все значения полей в решении, например, в два раза, вы получите колебания другого вида, которые тем не менее являются решением уравнения. Это то же самое, что сложить вместе два исходных решения. Вы также можете сложить одно решение с другим, и результат все равно будет решением. Эти математические возможности соответствуют физическим возможностям изменения яркости луча (усиление) или совмещения одного луча с другим (сложение).

Из опыта мы знаем, что изменение яркости и сложение – это то, что мы можем сделать с лучами света. Таким образом, если бы мы не могли сделать то же самое с электромагнитными волнами, у нас были бы

проблемы с попыткой объяснить свет как форму электромагнитной волны. К счастью, мы можем это сделать.

Наконец, давайте сравним детали словесного описания Максвелла, приведенного выше, с нашей рисованной версией. На иллюстрации вы видите, что электрические и магнитные поля перпендикулярны (или, другими словами, находятся под прямым углом) друг к другу и что направление движения перпендикулярно к ним обоим. Это в точности та самая геометрия, которую Максвелл описал словами. И быстро повторяющиеся знакопеременные (вверх-вниз) колебания, которые он упоминает, – это именно то, что вы наблюдаете в любой отдельной точке в то время, как волна продвигается вперед.

## **И снова очищенный свет**

У нас есть решения уравнений Максвелла для чистых электромагнитных волн любой длины, двигающихся в любом направлении.

Чистые электромагнитные волны с длиной волны в определенном узком диапазоне – примерно от 370 до 740 нанометров – это и есть исходный материал для человеческого зрения. Они соответствуют чистому свету, выявленному Ньютоном в спектре при помощи призмы. В музыкальных терминах человеческое зрение занимает одну октаву (длина волны удваивается один раз). Каждый спектральный цвет соотносится с определенной длиной волны, как показано на цветной вклейке Р.

Но огромная часть электромагнитных излучений полностью ускользает от нашего зрения. Например, мы не видим радиоволны, и без радиоприемников так и не догадывались бы об их существовании. С другой стороны, почти все солнечное электромагнитное излучение, которое проникает сквозь атмосферу Земли, сконцентрировано вблизи видимой части спектра; таким образом, это самая полезная часть, с точки зрения населяющих Землю существ, и поэтому они приспособились воспринимать именно ее. Это то место в спектре, где сигнал сильнее всего, если так можно выразиться.

Пока что давайте сконцентрируемся на том ресурсе, который солнечное освещение в изобилии дает нам, и рассмотрим только видимую часть спектра.

Дает ли наше восприятие возможность в полной мере пользоваться этим ресурсом? Нет. никоим образом.

Из каких частей состоит сигнал, поступающий в наши глаза? Ответ

на этот вопрос имеет два аспекта, которые достаточно сильно отличаются. Первый – пространственный. Сигнал содержит информацию о направлении лучей света, идущих от различных предметов. Мы используем эту информацию, чтобы формировать изображения. Другой – цветовой аспект. Он содержит информацию иного рода. Мы можем воспринимать черно-белые изображения, а можем иметь цветные образы (в крайних случаях – просто сплошные цвета, застилающие глаза), которые не создают изображений.

## Цвет, время и скрытые измерения

Во время нашего разговора об электромагнитных волнах и диапазоне их возможностей мы провели подготовительную работу, чтобы подойти к сложному и очень красивому вопросу о том, что же такое цвет. В то время как само изображение содержит информацию о том, что происходит в пространстве, цвет говорит о том, что происходит во времени. Говоря определенно, цвет дает нам информацию о быстрых изменениях в электромагнитных полях, которые достигают наших глаз.

Чтобы избежать возможной путаницы, позвольте мне подчеркнуть, что информация о времени, которую несет цвет, очень отличается (и в то же время дополняет) ту информацию о времени, которой мы пользуемся, когда в повседневной жизни воссоздаем порядок событий. Грубо говоря, наши глаза 25 раз в секунду делают моментальный кадр, а наш мозг создает из них иллюзию непрерывного кино. Эта конструкция лежит в основе нашего повседневного чувства потока времени. В процессе получения света для этих снимков – как говорят фотографы, за время экспозиции – свет просто накапливается, или интегрируется. Поскольку свет, поступающий в разное время в течение одного временного интервала, смешивается, информация о времени прибытия конкретной порции света внутри каждого интервала теряется.

Цвет, который мы ощущаем, – это способ сохранения очень полезной информации о временной микроструктуре сигнала, которая не теряется в процессе усреднения. Цвета дают нам информацию об изменении электромагнитных полей в куда меньшие временные интервалы, порядка 10–14...10–15с, т. е. за несколько миллионных долей от миллиардных долей – секунды! Поскольку предметы в повседневной жизни не могут двигаться так быстро или делать что-то заметное в такие крошечные интервалы времени, два вида временной информации – тот, который зашифрован в переходах от одного моментального снимка к другому, и тот, который зашифрован в цветах, – действуют независимо.

Например, когда мы воспринимаем чистый спектральный желтый, наши глаза говорят нам, что входящие электромагнитные волны – это чистые волны, которые повторяют себя примерно 520 000 000 000 000 (520 триллионов) раз в секунду. Когда мы воспринимаем спектральный красный, сообщение гласит, что повторения происходят 450 000 000 000 000 (450 триллионов) раз в секунду.

Вернее, наши глаза могли бы сказать нам такие вещи, если бы они не объединяли предполагаемое сообщение «спектрального желтого» с большим числом других возможных комбинаций, которые также *выглядят* желтыми, а предполагаемое сообщение «спектрального красного» с (другим) большим количеством комбинаций, которые выглядят красными. Реальное сообщение, которое они передают, остается неопределенным, потому что множество возможных входных данных имеют один и тот же выход.

Настоящий анализ входного сигнала в части цвета должен извлекать ту же информацию, что и ньютоновский анализ света при помощи призмы. Другими словами, такой анализ разделил бы входной сигнал на чистые спектральные компоненты, каждая из которых обладает своей собственной независимой интенсивностью. Чтобы представить результат такого анализа, нам понадобилось бы задать непрерывную бесконечную последовательность чисел, по одному на вклад каждой чистой спектральной компоненты. Такое пространство потенциальной информации, которую несет свет, не просто бесконечно, но имеет бесконечное количество измерений. Однако проекция этой информации, которую воспринимают наши глаза, содержит, как открыл Максвелл, всего три числа.

Коротко говоря: пространство цветовой информации бесконечномерно, но мы воспринимаем как цвет лишь трехмерную поверхность, на которую проецируются эти бесконечные измерения.

Чтобы закончить этот рассказ, я должен также упомянуть об еще одном виде электромагнитной информации, которая имеется в наличии, но тоже игнорируется, когда сигнал достигает нашего глаза. Обратившись снова к вклейке W, вы заметите, что электрические поля (показаны красным) колеблются в вертикальном направлении, тогда как магнитные поля (показаны синим) – в горизонтальном направлении. Также существует другое решение: если вы развернете всю систему на  $90^\circ$ , то электрические поля станут горизонтальными, а магнитные – вертикальными. Это повернутое решение колеблется в том же темпе, что и оригинальное, таким образом, оно представляет тот же самый спектральный цвет. Но физически оно отличается. Новая особенность, которая характеризует это отличие, называется поляризацией волны. Следовательно, электромагнитная информация, входящая в наш глаз, в каждой точке изображения имеет бесконечное количество измерений дважды, потому что для каждого спектрального цвета существуют две возможные поляризации, каждая из которых может быть сильнее или слабее независимо от другой.

Человеческое зрение не замечает этого удваивания, потому что человеческий глаз не видит разницы между различными поляризациями света.

## Рецепторы света

Главный результат экспериментов Максвелла с комбинированием и сравнением цветов – то, что при смешении трех основных цветов можно получить любой воспринимаемый цвет, – не только вскрыл глубинный факт о том, что такое человеческое восприятие, но также и поднял вопрос «как?», Красивый и информативный ответ на этот вопрос появился в середине XX в., когда биологи исследовали молекулярную природу человеческого зрения. (Забавно отметить, что физики решали задачи биологии, а биологи – физики.)

Главный результат всей этой молекулярной истории со зрением – это то, что информацию о цвете извлекают три вида белковых молекул (родопсины). Когда свет натывается на одну из этих молекул, есть определенная вероятность того, что молекула поглотит единицу света – фотон – и изменит форму. Изменение формы вызывает небольшой импульс электричества, который является информацией, которую, в свою очередь, наш мозг использует, чтобы конструировать наше чувство зрения.

Далее, вероятность того, что отдельная единица света будет поглощена, зависит и от его спектрального цвета, и от свойств молекулы-рецептора. Один вид рецепторов охотнее поглощает свет из красной части спектра, другой выходит на пик формы на зеленой, а третий – на синей, хотя эта их настройка не является узкой (см. вклейку Y). При обычном уровне освещенности имеется множество фотонов и случается много поглощений. Поэтому названные вероятности переводятся в три точные меры мощности, которую содержит падающий свет, усредненные по трем различным спектральным диапазонам.

Так мы оказываемся чувствительными не только к общему количеству поступающего света, но также к его составу. Если это спектральный красный свет, он будет стимулировать действие чувствительных к красному рецепторов сильнее, чем других, и в результате получится совершенно иной сигнал, нежели от спектрального синего света (который, разумеется, больше всего стимулирует чувствительные к синему рецепторы).

В то же время любой вид падающего света, у которого есть одна и та же способность стимулировать каждый из трех видов рецепторов, –

другими словами, который дает те же самые три средневзвешенных значения, – будет «увиден» любым цветовым рецептором точно так же и, следовательно, приведет к точно такому же зрительному восприятию. Нужно взять три числа, чтобы получилось совпадение: в этом молекулы согласны с цветными волчками!

## Разновидности цветового зрения

Теперь, когда мы знаем, что искать – содержимое входного сигнала, – мы можем планомерно исследовать биологический мир, подсчитывая рецепторы и измеряя их способности к поглощению, чтобы увидеть новые перспективы цветового восприятия.

У млекопитающих, как правило, слабое цветовое зрение. Красный цвет плаща тореадора нужен для зрителей-людей, а не для быка, потому что быки воспринимают только оттенки серого. У собак с этим получше – они видят двумерное пространство цветов. Мы можем воспроизвести собачье восприятие мира, основанное на двух цветовых рецепторах, как показано на вклейке X.

Страдающие цветовой слепотой (дальтонизмом) люди видят только двумерное пространство воспринимаемых цветов. У них отсутствует один вид белковых рецепторов или имеются мутировавшие белки, которые плохо различают цвета. Цветовая слепота реже поражает женщин, но среди мужчин она достаточно широко распространена – примерно каждый двенадцатый мужчина в северной Европе имеет ее. Страдающий цветовой слепотой человек способен совместить любой цвет из внешнего круга цветного волчка с всего лишь двумя основными цветами – скажем, красным и зеленым – во внутреннем круге (см. вклейку U). Также существуют женщины, которые видят четырехмерное цветовое пространство – тетрахроматы. У них есть дополнительный цветовой белок, который является мутацией обычного. Они могут различать комбинации спектральных цветов, которые большинство людей воспринимают как неотличимые. Кажется, эта способность встречается очень редко и не очень хорошо изучена.

При низкой освещенности все мы начинаем страдать цветовой слепотой. Цвет входит в наш мир восприятия с восходом солнца и уходит, когда оно садится. Это, конечно, общеизвестное наблюдение. Мы делаем его буквально каждый день. Но я обнаружил, что в длинные летние вечера оно превращается в интереснейший опыт, когда я настороженно жду этого

явления.

Между тем многие виды насекомых и птиц имеют по четыре и даже по пять цветовых рецепторов, в том числе чувствительных к ультрафиолету и даже к поляризации. Многие цветы украшены узором и ярко раскрашены в ультрафиолетовом спектре, чтобы привлечь своих опылителей. Внутри сенсорной вселенной цвета эти существа открывают измерения, которые ускользают от нас.

И есть еще ротоногие ракообразные, или раки-богомолы. Это не отдельный вид, а группа из нескольких сотен отдельных видов, которые имеют свои характерные особенности и ведут похожий образ жизни. Эти существа замечательны во многих отношениях. Вырастая примерно до длины один фут (30 см), они являются одинокими морскими охотниками. Раков-богомолов делят на две группы: «сокрушители» и «протыкатели». Оба вида нападают с потрясающей быстротой и силой. Ротоногих трудно содержать в аквариумах, поскольку они способны разбить стеклянные стены.

Но самой удивительной характеристикой ротоногих является их зрение. В зависимости от вида они могут видеть от 12 до 16 цветовых измерений. Диапазон их чувствительности доходит до восприятия инфракрасных и ультрафиолетовых лучей (см. вклейку Y) и до расшифровки некоторой информации о поляризации.

Почему ротоногие развили свою исключительную одаренность в восприятии цветов – вопрос, вызывающий глубокий интерес. Один из приемлемых ответов – это то, что они используют ее для обмена тайными посланиями с другими раками-богомолы. Лично мне кажется, что они используют свои собственные тела, чтобы создать впечатляющие цветные изображения, практически недоступные для нас, и продемонстрировать свои формы потенциальным партнерам. Это как павлиний хвост, но намного мощнее в воплощении. В поддержку этой идеи мы можем заметить, что некоторые виды ротоногих на самом деле очень ярко окрашены – даже для нас, как вы видите на вклейке Z! – и именно те виды, которые имеют наиболее продвинутое цветовое зрение, раскрашены особенно богато.

Но как же такой маленький мозг ракообразного справляется с таким избытком сенсорной информации? Этот вопрос является предметом исследований, которые еще продолжаются. Мне кажется вероятным, что раки-богомолы используют технику, которая известна программистам как «векторное квантование» – выражение из профессионального жаргона, которое я сейчас разъясню. Люди очень высококачественно заполняют свое

трехмерное цветовое пространство. Мы способны различать соседние точки в этом пространстве и таким образом испытывать миллионы отдельных цветовых ощущений. Ротоногие, возможно, используют куда более грубое представление, когда входная информация из больших областей их 16-мерного пространства имеет один и тот же выход. Там, где мы можем различать точки на достаточно маленьком пространстве, раки-богомолы определяют лишь положение крупных «пузырей», каждый из которых занимает значительно большее пространство. Мы создаем очень грубую (трехмерную) проекцию бесконечномерной входной электромагнитной информации, но скрупулезно обследуем ее, тогда как ротоногие создают более сложную проекцию, но исследуют ее грубо [49].

## Восприятие пространства и восприятие времени

Изучив «что» и «как» в цветовом зрении, мы готовы перейти к вопросу «почему?». Естественным образом возникает два «почему»:

*Почему люди и многие другие существа питают такой сильный интерес к сверхбыстрым колебаниям в электромагнитном поле?*

Если бы я поставил вопрос в форме «Почему люди и многие другие создания питают интерес к свету?», в голову пришло бы столько ответов, что вопрос показался бы смешным.

Но если мы зададим его именно так, как я сформулировал в первый раз (а по существу это тот же самый вопрос), он коснется глубинной сути. Информация о быстрых колебаниях в электромагнитном поле важна для нас как для биологических созданий, потому что это важно для электронов в веществе. Эти электроны часто отвечают на электромагнитные колебания различных частот самыми разными способами, что зависит от их материального окружения. Поэтому свет, излученный Солнцем и дошедший до нас после взаимодействия с веществом, содержит информацию об этом веществе, закодированную в нем электронами последнего.

Если говорить простым языком, цвет предметов зашифровывает в себе информацию о том, из чего они сделаны. Конечно, вы знаете об этом из опыта. Но теперь вы также знаете в понятиях фундаментальной науки то, что сами изучали лишь опытным путем!

Почему зрение так отличается от слуха? В конце концов оба чувства связаны с получением информации, доходящей до нас в колебаниях, прибывающих в виде волн. Зрение имеет дело с колебаниями электромагнитного поля, слух – с колебаниями воздуха. Но способы, которыми мы воспринимаем аккорды света и аккорды звука, кардинально, качественно отличаются.

Позвольте мне уточнить этот вопрос. Когда мы воспринимаем несколько чистых тонов, звучащих вместе, мы слышим аккорд, в котором каждый тон сохраняет свою собственную индивидуальность. В аккорде до мажор вы можете услышать до, ми и соль отдельно, и вы, конечно, заметите качественную разницу, если один из тонов будет отсутствовать или будет звучать заметно громче, чем другие. Аккорды могут быть более сложными, с большим количеством отдельных тонов, каждый из которых звучит по-разному, и так практически без ограничений (в конце концов, они начинают звучать отстойно, но это всегда отстой с членораздельными составляющими).

С другой стороны, как мы уже обсуждали, когда мы принимаем несколько чистых световых тонов – иначе говоря, спектральные цвета – вместе, мы видим новый цвет, в котором индивидуальность его компонент теряется. Например, смешение зеленого и красного даст в восприятии желтый, который по ощущениям неотличим от спектрального желтого. Это как если бы вы сыграли вместе до и ми и в результате получили ре!

Ясно, что слух лучше обрабатывает свой основанный на времени материал.

Физика слуха – это физика резонансных колебаний, как мы уже говорили ранее. Существует четкая физическая причина, почему со светом нужно обращаться по-другому. Колебания электромагнитных полей в видимом свете для любой реальной механической системы слишком быстры, чтобы она могла им следовать. Поэтому стратегия, которая используется для слуха, где колебания воздуха вызывают резонансные колебания в наших головах, не будет работать. Чтобы попасть в лад с колебаниями света, нам нужно использовать гораздо меньшие размером и более шустрые ответчики.

Для света подходящими рецепторами являются отдельные электроны. Но в субатомном мире электронов вступает в силу квантовая механика, и правила игры меняются. Передача информации от света к электронам может происходить только за счет передачи части энергии света. Однако в соответствии с квантовыми правилами такие передачи энергии происходят в виде отдельных событий типа «все или ничего» –

при поглощении фотонов – и в непредсказуемые моменты времени. Эти эффекты делают передачу информации менее надежной, и ее сложнее контролировать.

И это – если излагать вопрос еще более строго – объясняет, почему наше восприятие временной структуры света, зашифрованной в цвете, грубее, чем наше восприятие временной структуры звука, зашифрованной в музыкальной гармонии. Виновата квантовая механика. Имея несколько рецепторов различных видов, настроенных на различные характеристики, мы извлекаем лишь часть временной информации света. Ведь для зрения нет никаких аналогов вибрирующей мембраны внутреннего уха, где звук целиком раскладывается «по полочкам», как по клавишам фортепиано.

А вот для переноса информации о пространственной структуре предметов у света по сравнению со звуком есть значительное преимущество. У звуковых волн как носителей пространственной информации имеется недостаток – они просто очень велики. Не случайно длины этих волн сравнимы с размером таких музыкальных инструментов, как гитара, пианино или трубы церковного органа. Поэтому они не могут дать нам представление об объектах, намного меньших этого размера. Для света такой проблемы нет – длины волн видимого света немного меньше, чем одна миллионная доля метра.

Зрение – в основном пространственное чувство, тогда как слух – в основном временное, и, как мы видели, на это имеются глубокие физические основания.

## Открывая двери

А теперь давайте используем чуточку воображения, поднимаясь от твердой почвы вопросов «что», «как» и «почему» в фантастический пейзаж «что, если», «как бы» и «почему нет».

Наши глаза – это чудесные органы чувств, но они многого не замечают. Основываясь на пространственной информации в поступающем свете – в основном на направлении приходящих лучей света, – они производят последовательность образов внешнего мира. Однако, как мы только что обсудили в деталях, они сохраняют только небольшую часть входной временной информации и полностью игнорируют поляризацию. Каждый пиксель нашего поля зрения потенциально содержит двойную бесконечность аккордов, но мы видим только цвет – трехмерную проекцию.

Человеческий мозг – это наш высший орган чувств. Мозг определил, что существуют невидимые бесконечности, скрытые в свете. Наше восприятие цвета проецирует дважды бесконечномерное пространство физического цвета на трехмерную стену нашей внутренней Пещеры. Можем ли мы бежать из Пещеры, чтобы открыть дополнительные измерения?

Думаю, можем, и сейчас я кратко расскажу как. (Моя философская идея: если раки-богомолы могут делать это, значит, и мы можем.)

## Время и цветовая слепота

Для начала давайте рассмотрим упрощенную версию проблемы, которая все же имеет практическое значение. Мы достаточно точно знаем, какую информацию не получают люди, страдающие цветовой слепотой, а именно – одну из средних величин спектральной интенсивности, за которую отвечают отсутствующие у них белковые рецепторы. Как мы можем восстановить эту информацию?

Делая это, мы хотим поместить цветовую информацию туда, где она должна быть, – внутрь визуального образа. Таким образом мы должны извлечь пользу из доступных рецепторов, чтобы синтезировать новые. А еще мы хотим, чтобы новая информация оказалась на правильном месте внутри образа. Если говорить конкретно, давайте назовем то, восприятие чего отсутствующий рецептор обеспечивает в норме, «зеленым», а наш

искусственный заменяющий сигнал – «зеленым». Далее мы хотим гарантировать, что части нашего изображения, которые содержат много настоящего зеленого, будут обеспечены *зеленым* в нужной пропорции.

Чтобы удовлетворить этим требованиям – добавлять информацию в нужное место, используя существующие рецепторы, – нам нужно ввести в сигнал новую структуру, которую существующие рецепторы могут распознать. Элегантный способ сделать это – модулировать сигнал во времени. Например, мы можем закодировать *зеленый* как дополнительные *переливы, пульсацию*, или, говоря в общем, *временную модуляцию* – изменяющиеся во времени текстуры воспринимаемых цветов, локальная интенсивность которых пропорциональна зеленому в исходном образе.

Давайте поразмыслим над тем, что мы сейчас делаем. Отсутствующая информация (*зеленый*) что-то говорила о структуре света как электромагнитного сигнала во времени. Мы возвращаем ее из небытия как *зеленый*. Это снова временной сигнал, но замедленный в соответствии с возможностями обработки информации человеком. Мы используем время и мозг, чтобы отворить двери восприятия.

Для людей с нормальным цветовым зрением мы обычно кодируем изображения в трехцветном формате и декодируем их с помощью проекционных приборов, имеющих три цвета. Где бы это ни делалось – на мониторах компьютеров (в том числе и на крошечных дисплеях, встроенных в очки!), на смартфонах или, например, на цифровых проекторах, наше решение для цветовой слепоты можно реализовать в программном обеспечении как измененную схему перехода информации от входа к выходу.

Мы также можем поразмыслить над тем, как применить тот же самый общий подход к «железу». Например, существуют материалы, которые называют электрохромными. Их способность поглощать свет определенного спектра может модулироваться с помощью электрического напряжения. Если мы снабдим обычные очки электрохромным покрытием и подадим на них переменное по времени электрическое напряжение, мы откроем новые цветовые каналы.

## Пути и средства

Те же основные идеи позволят нам открыть совершенно новые измерения цветового зрения, как показано на вклейке АА. Конечно, до того,

как сделать новую информацию доступной, мы сперва должны собрать ее. Тот факт, что цифровая фотография и компьютерная графика основаны на трех, а не на большем количестве основных цветов, не связан ни с какими фундаментальными физическими положениями. Как мы уже видели, существует двойная бесконечность цветов, ждущая нашего обогащенного восприятия. Причины, по которым техника в основном остановилась на трех цветах, следующие:

1. Три основных цвета позволяют нам, как учил Максвелл, синтезировать любой воспринимаемый цвет.

2. Два основных цвета не позволяют этого сделать.

3. Проще и дешевле использовать самое минимальное количество, которое является достаточным.

Но если мы решили расширить восприятие дополнительными измерениями цветового пространства, появление нужных технических приспособлений вполне возможно (и они уже используются в исследовательских целях). Незамысловатая разработка для четырех измерений, пригодная как для цифрового приема, так и для цифровой передачи, показана на вклейке ВВ.

Мы можем создать четыре (или пять...) различных видов цветковых рецепторов в виде плотных матриц по тем же принципам, на базе которых мы сейчас создаем три. На выходе мы можем либо позволить трехцветным передатчикам выполнять двойную работу с помощью наложенных переливов или – как на вклейке ВВ – установить особый класс пикселей для нового канала. При любом способе дополнительные каналы становятся доступными, когда мы открываем возможность искусственных изменений во времени, место и сила которых контролируются сигналами от новых рецепторов.

Думаю, будет очень увлекательно увидеть таким образом новые цвета.

## «Для чего это?»

Для меня всегда было радостью общаться с Максвеллом через его сочинения и через свидетельства его друзей. Он стал моим любимым физиком. Поэтому именно сейчас приведу его маленький импрессионистский портрет. По словам его друга и биографа Льюиса Кэмпбелла:

В детстве он все время спрашивал: «А для чего это? Что оно делает?» И никогда не удовлетворялся расплывчатым ответом, а переспрашивал: «Но для чего именно оно?»

Переписка Максвелла с его семьей и друзьями напоминает письма Моцарта. В ней много игры слов, комических рисунков и человеческого тепла. Вот отрывок из письма к его молодому двоюродному брату Чарльзу Кею. В одной строчке он упоминает о «Динамической теории», своем шедевре, который мы обсудили ранее; в следующей, без всякой паузы, описывает наблюдения за своей новой собакой:

У меня работа над одной статьей в полном разгаре, об электромагнитной теории света, благодаря которой, хотя я убежден в обратном, я буду отмечен как очень важная персона.

Спайс становится хоть куда: она главный пациент моего офтальмоскопа и поворачивает глаза по команде, как будто бы, чтобы показать тапетум, оптический нерв или другую нужную часть.

Всю свою жизнь Максвелл писал стихи. Одно из его лучших стихотворений – это песня «Твердое тело», которую он сам исполнял, сопровождая себя на гитаре. В каждом четверостишии Максвелл жалуется на то, как трудно рассчитать движение твердых тел; затем само твердое тело отвечает по сути: «Я просто делаю свое дело». Это стихотворение стало переложением произведения Роберта Бёрнса «Пробираясь у калитки»<sup>[50]</sup> и пестрит шотландизмами:

Джин однажды встретил тело  
В полной пустоте.  
Джин легонько стукнул тело:

Как оно? И где?  
Все свое имеет меру,  
Можно все решить,  
Можно, скажем, для примера,  
Путь определить.  
Джин однажды встретил тело  
В полной пустоте.  
Куда оба отлетели –  
Видели не все.  
Всем проблемам есть решение  
Точное вполне.  
Жаль, что это приключенье  
Безразлично мне<sup>[51]</sup>.

## Смерть и жизнь

Весной 1877 г., когда ему еще не было 46 лет, Максвелл начал чувствовать недомогание: несварение желудка, боль, усталость. В течение нескольких следующих месяцев ему становилось хуже, и вскоре стало ясно, что у него рак брюшной полости, болезнь, которая унесла жизнь его матери примерно в том же возрасте, когда Джеймсу было девять лет. Максвелл знал, что жить ему оставалось недолго. Кэмпбелл писал:

В последние несколько недель он очень страдал, но он никогда не жаловался... Даже близость смерти не лишила его самообладания... Единственная вещь, о которой он беспокоился и к которой постоянно возвращался, – это будущее благосостояние и покой миссис Максвелл.

Максвелл умер в 1879 г., в возрасте 48 лет.

Еще молодым человеком 23 лет Максвелл сделал очень содержательную запись в своем личном дневнике, предугадавшую жизнь, которую он должен был прожить:

Счастлив тот человек, который в деле сегодняшнего дня видит закономерную часть дела всей жизни и воплощение дела Вечности. Основания для его уверенности не меняются, поэтому

он разделяет Бесконечность. Он усиленно работает над своими ежедневными делами, потому что настоящее дано ему в собственность.

Итак, человек должен быть воплощением божественных процессов в природе и продвигать вперед союз бесконечного с конечным, не пренебрегая временностью своего существования, помня, что в нем возможно только отдельное действие, и не игнорируя со своей точки зрения вечное, зная, что Время – это тайна, созерцания которой человек не сможет терпеть, пока вечная Истина не осветит ее.

## Прелюдия к симметрии

Симметрия – в широком или узком смысле в зависимости от того, как вы определите это понятие, – является той идеей, посредством которой человек на протяжении веков пытался постичь и создать порядок, красоту и совершенство.

*Герман Вейль* <sup>[52]</sup>

Кажется, что природа использует преимущество простоты математического представления законов симметрии. Чувство глубочайшего уважения к мощи законов симметрии никогда не ослабевает у того, кто обдумывал изящество и красоту безупречных математических доказательств и сопоставлял это со сложными и далеко идущими физическими следствиями.

*Янг Чжэньнин* <sup>[53]</sup>

Но хотя симметрии скрыты от нас, мы можем чувствовать, что они присутствуют в природе, управляя всем вокруг нас. Эта самая потрясающая мысль среди мне известных – Природа гораздо проще, чем она выглядит.

*Стивен Вайнберг*

Начиная с XX в. симметрия все больше господствует в наших лучших представлениях о фундаментальных законах Природы. Так говорят мастера. Заключительные части нашей медитации, которые ведут нас к переднему краю неведомого и за его пределы, чествуют великие триумфы симметрии и сулят еще большие успехи.

Изменение без изменений. Какая странная, нечеловеческая мантра для существа из мира, каким его создал Бог! Тем не менее сама ее оторванность от жизни дает возможность развить наше, одаренное богатым воображением видение так, чтобы ее мудрость стала нашей собственной.

Наш Вопрос требует поиска красоты в основе физического мира. Чтобы решить эту сложную и интереснейшую задачу, мы должны действовать в двух направлениях. По мере того, как мы расширяем наше понимание реальности, мы должны также расширять и наше чувство

прекрасного. Ведь красота глубочайших замыслов Природы, которую мы должны найти, так же необычна, как ее необычность прекрасна.

Поэтому, пока мы будем докапываться до глубинных корней физического мира, у нас будет несколько пауз с обсуждением вопросов симметрии – легких интерлюдий, открывающих особую форму красоты: симметрию, развивающуюся и набирающую силу.

## Путешествие с Галилеем

Для начала нам пойдет на пользу присоединиться к Галилею в его воображаемом путешествии.

Запритесь с каким-нибудь другом в главной рубке под палубой какого-нибудь корабля. Запаситесь мухами, бабочками и другими подобными мелкими летающими насекомыми; пусть будет у вас там также большой сосуд с водой и плавающими в нем маленькими рыбками; подвесьте, далее, наверху ведро, из которого вода будет падать капля за каплей в другой сосуд с узким горлышком, подставленный внизу. Пока корабль стоит неподвижно, наблюдайте прилежно, как мелкие летающие животные с одной и той же скоростью движутся во все стороны помещения; рыбы, как вы увидите, будут плавать безразлично во всех направлениях; все падающие капли попадут в подставленный сосуд... Если вы захотите что-нибудь перебросить своему другу, вам не надо будет делать более сильный бросок в одном направлении по сравнению с другим, и расстояние будет одинаково. Если вы прыгнете, сложив ноги вместе, вы переместитесь на одно и то же расстояние в любом направлении. Когда вы внимательно пронаблюдаете за всеми этими явлениями (хотя они несомненны: когда корабль не движется, все должно происходить именно таким образом), заставьте корабль двигаться с малой скоростью, и тогда (если только движение будет равномерным и без качки в ту и другую сторону) во всех названных явлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения и ни по одному из них не сможете установить, движется ли корабль или стоит неподвижно.

Причина этого в том, что корабль передает свое движение всем предметам, находящимся внутри него, в том числе и воздуху. Именно поэтому я сказал, что вы должны находиться под палубой, потому что, если вы разместитесь на ней на открытом воздухе, который не следует курсу корабля, вы заметите более или менее заметные отличия в этих явлениях<sup>[54]</sup>.

Галилей здесь борется, несомненно, с самым большим психологическим барьером на пути к принятию астрономии Коперника. Коперник заставил Землю (и все, что находится на ней) быстро двигаться, делая суточное вращение вокруг своей оси и годичное обращение вокруг Солнца. Скорости этих движений по меркам каждодневной жизни были огромными. Для вращения – чуть больше 1000 миль или 1600 километров в час. Для обращения – чуть больше 67 000 миль или 108 000 километров в час. Но мы вообще не чувствуем, что движемся, тем более – так быстро!

Галилей отвечал, что неизменное движение – т. е. движение с постоянной скоростью по прямой – неощутимо, потому что не изменяет ни одного аспекта в физическом поведении. И в замкнутой системе – такой, как каюта корабля Галилея или космический корабль Земля, – для тех, кто находится внутри, движение с постоянной скоростью, какой бы большой она ни была, ощущается точно так же, как отсутствие движения вообще. (Конечно, вращение и обращение Земли является круговым, а не прямолинейным, но эти окружности так велики, что даже на длинных отрезках они все еще похожи на прямые.)

Наблюдение Галилея легко выразить как симметрию. Мы *изменяем* мир – или его большую часть, такую как внутренний объем большого корабля, – двигая все с общей скоростью, при этом *не меняя* поведение вещей.

Такой вид трансформации в честь Галилея называется *преобразованием Галилея*. Соответственно мы назовем предложенную им симметрию *симметрией Галилея* или *галилеевой инвариантностью*.

Согласно симметрии Галилея, мы можем изменить состояние движения Вселенной, придав ей постоянную общую скорость – так сказать, дав ей пинок, – не изменив при этом физических законов, которым она подчиняется. Преобразования Галилея двигают физический мир с постоянной скоростью, и симметрия утверждает, что содержание физических законов от такой трансформации не меняется.

## Квантовая красота I: Музыка сфер

Классическая наука Ньютона и Максвелла внесла в нашу медитацию новые темы, которые, *казалось бы*, находятся в противоречии с более ранним видением и предсказаниями Пифагора и Платона, с которых мы начали. Но в квантовом мире атомов, странном мире, в котором, так получилось, мы тоже обитаем, происходит чудо. Старые идеи воскресают к жизни, одевшись в новые роскошные формы. В своих возрожденных формах эти идеи достигают новых уровней точности, истинности и, что удивительно, музыкальности.

Вот как новое включает в себя старое:

- *Из сути строения материи – музыка.* Не было никакой логической причины ожидать, что математика, разработанная для понимания музыки, должна иметь что-то общее с атомной физикой. Тем не менее оказалось, что одни и те же понятия и уравнения управляют обоими царствами. Атомы – это музыкальные инструменты, и свет, который они испускают, делает их звучание видимым.

- *Из прекрасных законов – прекрасные объекты.* Основные законы не постулируют существование атомов. Атомы *появляются как следствие* из них и при этом – как прекрасные объекты (см. вклейку СС). Описанные математически физические атомы – это трехмерные объекты, которые под влиянием одухотворенного таланта художника порождают образы исключительной красоты.

- *Из динамики – постоянство.* Основные законы – это уравнения, описывающие, как окружающий нас мир меняется во времени. Но у этих уравнений есть некоторые важные решения, которые *не меняются* во времени. Эти решения, и только они, описывают атомы, из которых состоит наш повседневный мир и мы сами.

- *От непрерывности – к дискретности.* Волновые функции, которые описывают электроны в атомах, – это поля вероятности (распределения вероятностей), которые наполняют пространство. Они непрерывны и напоминают облака. Но устойчивые формы облаков различимы по отдельности и несут на себе отметины Чисел.

## Назад к Пифагору

Во время зарождения современной квантовой теории, конечно, никакого учебника по ней еще не было. Так называемые практики, жаждущие воспользоваться новой атомной теорией, вместо учебника обратились к другому предмету – книге лорда Рэля «Теория звука». Именно там они нашли математику, необходимую для описания того, как работают атомы. Она была разработана ранее – для описания работы музыкальных инструментов! Хотя символы здесь обозначают другие вещи, в сущности появляются те же самые уравнения, для решения которых используются те же самые приемы. Пифагор был бы доволен.

## Система йоги музыкальных инструментов

Физика музыкальных инструментов есть физика *стоячих волн*. Стоячие волны – это волны, существующие в конечных объектах или в ограниченном пространстве. Так, колебания струн музыкальных инструментов или звуковых дек и резонаторов в них – это стоячие волны, которые должны быть противопоставлены *бегущим волнам*. Например, когда мы говорим о звуковых волнах, мы обычно имеем в виду бегущие волны, которые распространяются или *разбегаются* от источника. Колебания крышки рояля, являющиеся стоячими волнами, толкают окружающий воздух в разные стороны. Движение части воздуха оказывает давление на другие части воздуха вокруг, которые оказывают давление на следующий слой воздуха, и т. д. В результате возникает возмущение, живущее своей собственной жизнью.

Стоячие волны – это вид движения, который вы создаете в налитой в ванну воду, когда шлепаете по ней или который наблюдается в колебаниях гонга или камертона после того, как их задели. В каждом из этих случаев – в шлепке по воде в ванне, ударе по гонгу или камертону – после шумного старта движение будет стабилизироваться, пока не станет регулярным в пространстве и периодическим по времени. В этом состоит суть камертона: он «хочет» вибрировать с определенной частотой и, таким образом, производит верный чистый звук. Обычный гонг производит более сложную и интересную комбинацию звуковых тонов. Мы скоро вернемся к этому вопросу.

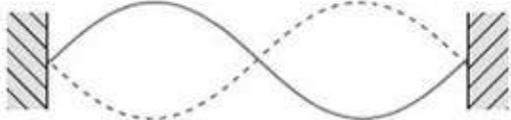
Мы можем осветить йогу музыкальных инструментов более ясно,

рассмотрев предельно простой инструмент, который на самом деле является пифагоровым, – туго натянутую струну, зажатую с двух концов (илл. 24). В простой одномерной геометрии отрезка конечной длины мы можем с первого взгляда отыскать естественный образец стоячей волны.

На иллюстрации сплошные и пунктирные линии показывают форму струны в различные моменты времени, демонстрируя четыре различных состояния стоячей волны (амплитуда, т. е. размер отклонения струны от средней линии, на иллюстрации сильно преувеличена, чтобы можно было ясно видеть саму волну). В промежуточные моменты точки на струне перемещаются вверх и вниз; составленная из них сплошная линия последовательно переходит в пунктирную, и наоборот, циклически.

Простые требования геометрии приносят целые числа и дискретность в описание этих непрерывных по сути фигур. Последние должны уместиться на длине струны! Идя сверху вниз и сравнивая картины, мы видим, что темпы изменений при движении вдоль струны слева направо отличаются по скорости в два, три, четыре раза.

Можно получить естественные колебания, которые соответствуют трем циклам, или двум, или четырем, или любому целому числу, но ничего между целыми числами быть *не может*. В результате естественные частоты нашего инструмента дискретны или, как мы говорим, *квантованы*.

	мода	длина волны	частота
	первая	$2L$	$v/2L$
	вторая	$L$	$v/L$
	третья	$2L/3$	$3v/2L$
	четвертая	$L/2$	$2v/L$

Илл. 24. В простой одномерной геометрии отрезков конечной длины мы можем с первого взгляда отыскать естественные образцы стоячей волны. Они должны уместиться на длине отрезка! Эти простые геометрические правила требуют целых чисел и дискретности в описании поведения непрерывного объекта.

В отличие от ставшей притчей во языцех сферической коровы<sup>[55]</sup>, наш пифагоров музыкальный инструмент не так оторван от реальности. Куда важнее, что урок, который мы извлекли из этого простого инструмента, – о том, что *геометрические ограничения для конечных объектов ведут к дискретности (квантованию) их естественных форм колебаний* и, следовательно, их естественных частот, – является идеально всеобъемлющим. Как мы вскоре увидим, в квантовой механике этот урок становится стержнем атомной физики.

## Естественные колебания и резонансные частоты

Вы также можете получить стоячие волны деки гитары, когда дергаете

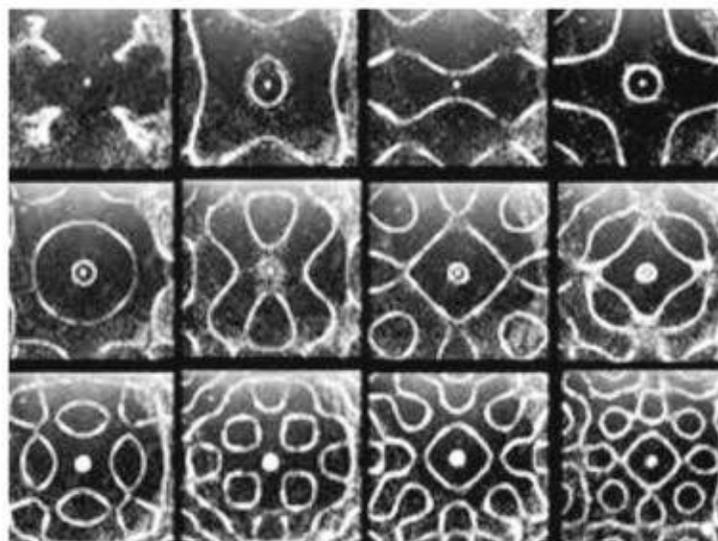
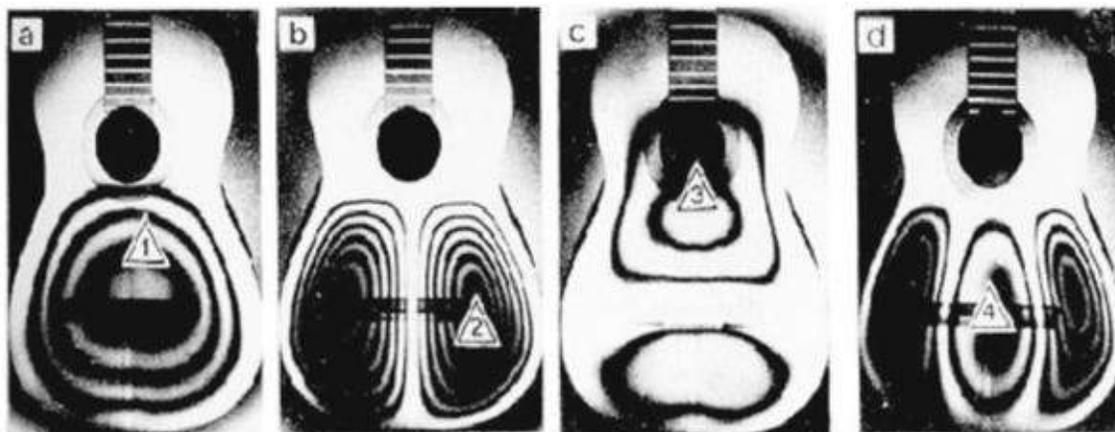
ее струну, или квадратной пластины, когда ударяете по ней (илл. 25), причем волны можно сделать видимыми. Основная идея остается той же, что и та, которую мы обсуждали в случае с закрепленной струной. Стоячая волна – это движение вверх-вниз, которое в одних местах выше (или, на нашем жаргоне, имеет большую амплитуду), чем в других. Существуют линии, вдоль которых отклонение исчезает и движение отсутствует. Точки этих линий называются узлами, а сами линии – узловыми линиями. Если вы насыплете на пластину немного песка, то он соберется вдоль узловых линий – именно это вы видите на рисунке.

Для этих двумерных вибраторов<sup>[56]</sup> геометрия оказывается сложнее, чем для одной струны. Это отражается в формах собственных колебаний, которые становятся более сложными.

В этих примерах для того, чтобы выделить тот или иной простой рисунок колебаний, а не смешивать несколько, мы вводим силы, которые регулярно повторяют свое действие, или, как мы говорим, периодичны по времени. Гитара позволяет нам сделать это, щипая струны, – именно для этого ее струны и предназначены! В зависимости от того, насколько быстро происходят колебания возбуждающих сил (иначе говоря, в зависимости от их частот), будет доминировать тот или иной рисунок колебаний.

Для каждого собственного колебания картина повторяется во времени. Силы, которые каждый движущийся участок струны, дерева или металла передает на соседние участки, отличаются друг от друга для разных рисунков колебаний. Скорость, с которой все изменяется, также своя для каждого из них. Те рисунки, что очень быстро изменяются в пространстве, имеют свойство порождать большие силы и, следовательно, более быстрое движение с более высокой частотой. Каждый рисунок собственных колебаний происходит со своей собственной частотой.

Эта собственная частота также называется резонансной частотой, и вот почему. Если частота возбуждающей силы близка к собственной частоте какого-то режима колебаний, этот режим непременно возникнет, проявляя себя возрастанием амплитуды колебаний. Тогда и только тогда, когда внешняя возбуждающая сила цикл за циклом совпадает по направлению с внутренними силами, нарастает и амплитуда колебаний. Любой, кто хоть раз ритмично выпрямлял ноги и тело, чтобы раскатать качели, или качал на них ребенка, знает, как это важно.



Илл. 25. Рисунки вибрации, или стоячих волн гитарной деки, создают геометрические фигуры, которые отражают взаимодействие между формой и профилем дерева и частотой порождающей колебания струны

Когда вы ударяете по камертону или гонгу, колебания расходятся кругами от точки удара, затем отражаются от краев и возвращаются, как эхо. Сложные движения быстро отдают свою энергию в бегущие звуковые волны и тепло, оставляя одну (для камертона) или несколько (для гонга) относительно долго живущих стоячих волн, каждая из которых колеблется с резонансной частотой. Именно их вы слышите как однотонный звук или медленно меняющееся созвучие после шумного начала. Гонги создают меняющиеся созвучия, постепенно теряющие свою сложность и переходящие в звук на одной ноте, потому что в них могут существовать несколько долго живущих рисунков стоячих волн, которые

угасают в разном темпе.

Рисунки колебаний, или стоячих волн гитарной деки, создают геометрические фигуры, которые отражают взаимосвязь между формой и профилем дерева и частотой возбуждающих колебаний струны, как показано на илл. 25. Похожие рисунки стоячих волн на квадратных вибрирующих пластинах (внизу) более симметричны. Эти узоры имеют разительное сходство с формами электронных облаков (илл. 26). Сходство между определяющими их уравнениями абсолютно, и это еще больше потрясает.

### **Упущенная возможность**

Очень жаль, что пифагорейцы не продолжили свои открытия с вибрирующими струнами и не рассмотрели «инструменты» на шаг сложнее, подобные нашим двумерным пластинам. Там скрывалось чудесное взаимное влияние геометрии, движения и музыки, простирающееся намного дальше простых правил струн и воспринимаемое с наслаждением ухом, глазом и разумом. Пифагорейцы тогда бы устроили бал.

Также они открыли бы путь к основным законам механики, более простой и доступный по сравнению с трудным путешествием через астрономию, который в конце концов привел к этим законам, но лишь века спустя. И, как мы скоро увидим, они проложили бы роскошную дорогу к квантовой теории.

## Музыка сфер: на этот раз по-настоящему

Третий закон Артура Кларка звучит так:

Любая достаточно развитая технология неотличима от магии.

Я бы хотел добавить к этому наблюдение, которое наша медитация в полной мере подтверждает:

Технологии природы, на основании которых она создает материальный мир, достаточно развиты.

К счастью, Природа позволяет нам изучать свои фокусы, и если мы достаточно внимательны, то мы сами становимся волшебниками.

## Скандалные гипотезы

В квантовом мире атомов и света Природа балует нас, показывая странные и кажущиеся невозможными трюки.

В то время, когда два из этих трюков были открыты, они казались почти невозможными. Один парадокс касается света, другой – атомов<sup>[57]</sup>.

- Свет передается отдельными порциями, как показывает фотоэлектрический эффект, который мы обсудим прямо сейчас. Для физиков это было шоком. После того как электромагнитная теория Максвелла была подтверждена экспериментами Герца (и затем многими другими), физики считали, что понимают, что такое свет, а именно – электромагнитная волна. Но электромагнитные волны непрерывны!

- Атомы являются составными объектами, но при этом они совершенно жесткие. Электроны впервые были определенно обнаружены в 1897 г. Дж. Томсоном, и наиболее важные факты об атомах были выяснены в течение примерно следующих 15 лет. А именно: атом состоит из крошечного ядра, несущего в себе почти всю массу и весь положительный электрический заряд. Ядро окружено отрицательно заряженными электронами, количество которых достаточно для того, чтобы общий заряд атома был нейтральным. Атомы имеют разные размеры, в зависимости от химического элемента, но, как правило, они бывают

порядка  $10^{-8}$  см – эта единица длины называется ангстремом. При этом атомное ядро в 100 000 раз меньше. Парадокс в том, как вся эта структура может оставаться стабильной? Почему электроны просто не уступают притягивающей силе ядра и не падают на него?

Эти парадоксальные факты привели соответственно Эйнштейна и Бора к тому, чтобы предложить скандальные и оказавшиеся лишь наполовину правильными гипотезы, которые послужили первыми ступеньками в крутом подъеме к современной квантовой теории.

Фотоэлектрический эффект возникает, когда вы направляете свет (или, еще лучше, ультрафиолетовое излучение) на определенные материалы. Они при этом начинают испускать электроны. Этот эффект используется, например, в солнечных батареях, которые превращают свет в электричество.

Идея о том, что свет может ускорять электроны, увеличивать их энергию и, возможно, иногда отрывать их от атомов, сама по себе не удивительна. Электрическое поле света *должно* делать такие вещи. Потрясало то, каким образом это происходило. Можно было бы ожидать, что энергии требуется время для накопления, т. е. когда вы включаете свет, то вначале вы не видите испускаемых электронов. Отнюдь нет, этот эффект «включается» мгновенно. Также можно было бы ожидать, что частота падающего света, т. е. его спектральный цвет, менее важна, чем его сила или яркость. И это не так: оказалось, что спектральные цвета из красного конца спектра неэффективны. Если свет слишком красный, то вы сумеете освободить лишь небольшое количество электронов, как бы ярко вы ни освещали материал.

Эйнштейн объяснил этот и другие эффекты фотонной гипотезой. Он предположил, что свет передается отдельными единицами, фотонами, которые уже не могут дробиться. Количество энергии в минимальной единице или *кванте* света пропорционально частоте света, причем фотоны на синем конце спектра несут примерно вдвое большую энергию, чем фотоны красного конца спектра, а у фотонов ультрафиолетового излучения энергия еще выше.

Фотонная гипотеза дала простое качественное объяснение парадоксальных свойств фотоэлектрического эффекта. Поскольку каждый фотон или отдает всю свою энергию, или не отдает ее вовсе, нет никакой нужды в постепенном ее накоплении, и для этого не требуется специального времени в начале эксперимента. Поскольку красные фотоны приносят меньше энергии, они менее эффективны, и, если у них нет

достаточной энергии для высвобождения электронов из определенного материала, они попросту этого не делают.

Фотонная гипотеза Эйнштейна не была частью некоей большой системы, как уравнения Максвелла или небесная механика Ньютона. На самом деле она в самой своей основе *противоречила* тому, что казалось очевидным следствием из уравнений Максвелла. Гипотеза объясняла некоторые факты ценой подрыва существующих и очень успешных основных принципов, которые объясняли многие другие явления. Это был скандал! В 1913 г., предлагая кандидатуру Эйнштейна для избрания академиком Прусской академии наук, Планк писал:

То, что он в своих рассуждениях иногда выходит за пределы цели, как, например, в своей гипотезе световых квантов, не следует слишком сильно ставить ему в упрек. Ибо, не решившись пойти на риск, нельзя осуществить истинно нового, даже в самом точном естествознании<sup>[58]</sup>.

Эйнштейн ввел световые кванты, т. е. то, что мы сегодня называем фотонами, в 1905 г. – восемью годами ранее! Еще через восемь, в 1921-м, когда он получил Нобелевскую премию, в качестве основания для награды приводилась конкретно его работа по световым квантам. К тому времени она доказала свою ценность.

Что касается нашего второго парадокса, парадокса существования стабильных неизменных атомов, Нильс Бор предложил идею о том, что атомы могут пребывать только в *стационарных состояниях*. В классической механике возможно бесчисленное количество орбит, как мы видели на примере Горы Ньютона. Бор предположил, что в атоме электроны, удерживаемые электрическими силами, обращаются вокруг ядра, однако возможен только некоторый ограниченный набор орбит. Для простейшего атома – водорода – он предложил простое точное правило, определяющее возможные орбиты его электронов<sup>[59]</sup>. Когда электрон следует по одной из «разрешенных» орбит, мы говорим, что атом находится в стационарном состоянии. Электрон остается на этой конкретной орбите до тех пор, пока его не пнут *слишком* сильно, потому что другие возможные орбиты значительно отличаются от исходной, и легким толчком вам не удастся перебросить его! Наконец, атомы не коллапсируют оттого, что все разрешенные орбиты удерживают электроны на безопасном расстоянии от ядер.

Гипотеза стационарного состояния Бора также не была частью большой системы. На самом деле она тоже противоречила тому, что казалось очевидным следствием очень успешной теории, а именно – механики Ньютона. Кем был Бор, чтобы указывать электронам, где они могут, а где не могут быть или какие скорости они могут или не могут иметь? Это был скандал! Гипотеза объясняла некоторые факты, но ценой подрыва существующих и очень успешных основных принципов, которые объясняли многие другие явления.

Правило Бора для водорода могло быть и было проверено экспериментами. Их успех сделал его скандальную гипотезу достойной доверия.

И Эйнштейн, и Бор очень хорошо понимали, что они делают и чего не делают, выдвигая свои скандальные гипотезы. Они не предлагали последовательную «теорию всего» или даже некий большой синтез в духе небесной механики Ньютона или электромагнетизма Максвелла. Вернее будет сказать, что они, в духе поисков Пифагора, работы Ньютона о свете или Максвелла о восприятии, выявили поразительные совокупности фактов, которым в будущем могло найтись более глубокое объяснение.

Важная часть хорошей научной стратегии – это деление проблемных областей на те, из которых может вырасти большое обобщение, и на те, где более плодотворным будет конъюнктурный подход. Успешная теория *чего-то* может быть более ценной, чем попытка создания Теории *Всего*.

### «Высшая форма музыкальности»

Атомы определенного вида – например, атомы водорода – поглощают одни цвета спектрального света более эффективно, чем другие. (Если говорить более обобщенно, они будут поглощать электромагнитные волны некоторых частот гораздо более эффективно, чем другие.) Те же самые атомы, если их «подогреть», будут испускать большую часть своего излучения в тех же самых спектральных цветах. Набор приоритетных цветов различен для атомов различных видов и формирует что-то вроде отпечатков пальцев, по которому мы можем распознать их. Набор приоритетных цветов атома называется его *спектром*.

В своей атомной модели Бор допустил, что электроны в атомах могут существовать только в дискретном наборе стационарных состояний. Таким образом, возможные значения энергии электронов также формируют

дискретный набор. И вот как Бор связал свою идею с реальностью через еще одну скандальную гипотезу. Он предположил, что вдобавок к своим «разрешенным» регулярным движениям в стационарных состояниях электрон иногда совершает квантовый скачок между одним стационарным состоянием и другим. Почему? Как? Не спрашивайте... Важно, что процесс квантового скачка сопровождается излучением или поглощением фотона. Квантовые скачки создают атомные спектры.

В этой иконоборческой во всех других отношениях модели Бор не тронул один священный принцип – сохранение энергии. Он настаивал на том, что энергия должна сохраняться даже в процессе квантового скачка.

Итак, энергия фотона по Эйнштейну пропорциональна его частоте, а частота закодирована в цвете. А значит, идеи Бора образуют конструкцию с предсказательной силой: цвета спектра атома отражают его способности к переходу между стационарными состояниями, при этом указывая на величину разностей между энергиями стационарных состояний. Модель Бора, предсказывая эти энергии, предсказала цвета в спектре водорода. И это сработало!

Эйнштейн, размышляя о работе Бора, писал:

Мне всегда казалось чудом, что этой колеблющейся и полной противоречий основы оказалось достаточно, чтобы позволить Бору – человеку с гениальной интуицией и тонким чутьем – найти главные законы спектральных линий и электронных оболочек атомов... Это мне кажется чудом и теперь. Это наивысшая музыкальность в области мысли<sup>[60]</sup>.

Однако Эйнштейн в данном случае был не прав. Самая лучшая музыка все еще была впереди.

## **Новая квантовая теория: атомы как музыкальные инструменты**

Успех Бора оставил теоретикам проблему объяснения его постулатов «от достигнутого». Его модель обеспечила описание атомов в виде «черного ящика», где говорится, «что» они делают, но не говорится «как». Набрасывая ответ на неизвестный вопрос, Бор положил начало великой игре «Jeopardy!» («Рискуй!»)<sup>[61]</sup> Физики должны были теперь найти те уравнения, для которых модель Бора являлась решением.

После героических битв, после продолжавшихся больше десяти лет усилий и споров ответ был найден. Он устоял до сего дня, и его корни уходят так глубоко, что, кажется, его никто и никогда не сумеет оспорить.

## **Что такое квантовая теория?**

При описании поведения вещества в атомном и субатомном масштабе выяснилось, что требуется не только добавлять новое к тому, что было известно раньше, но также создавать полностью отличающийся понятийный аппарат, в котором многие идеи, считавшиеся незыблемыми, подлежали пересмотру. Такой аппарат, получивший известность как квантовая теория или квантовая механика, был по большей части готов к концу 1930-х гг. С этого времени наши методы решения математических задач, которые ставила квантовая теория, значительно улучшились, и мы добились гораздо более детального и глубокого понимания основных сил Природы, как мы увидим в следующих главах. Но это развитие происходило уже внутри рамок квантовой теории.

Многие физические теории можно описать как достаточно конкретные утверждения о физическом мире. Специальная теория относительности, например, – это в основе своей двойное утверждение галилеевой симметрии вместе с постоянством скорости света.

Квантовая теория, как она понимается в настоящее время, не похожа на такие теории. Квантовая теория – это не конкретная гипотеза, а сеть тесно переплетенных идей. Я не имею в виду, что квантовая теория расплывчата – это не так. За редкими и обычно временными исключениями все, кто сведущ в применении квантовой механики, при столкновении с любой конкретной физической задачей соглашаются по поводу того,

как следует подходить к этой задаче, используя квантовую теорию. Но очень немногие, если такие вообще есть, могли бы сказать точно, какие допущения они сделали, чтобы получить ответ. Достижение согласия с квантовой теорией – это процесс, при котором *работа сама учит вас, как ее делать*.

Давайте же начнем.

## **Волновые функции, облака вероятности и дополнительность**

В квантовом описании мира фундаментальными объектами являются не частицы, занимающие определенные места в пространстве, и не флюиды Фарадея и Максвелла, но *волновые функции*. Ответ на любой состоятельный физический вопрос о физической системе может быть найден через ее волновую функцию. Но связь между вопросом и ответом не является прямой. И способ, которым волновые функции отвечают на вопросы, и ответы, которые они дают, имеют удивительные – если не сказать странные – черты.

Здесь я сосредоточусь на особом виде волновых функций, которые нужны, чтобы описать атом водорода и открыть его музыкальность. (Более подробную информацию вы можете найти в разделе «Термины», в особенности в статьях «Квантовая теория» и «Волновая функция».)

Итак, нас интересует волновая функция, которая описывает единственный электрон, привязанный электрическими силами к крошечному, но гораздо более тяжелому протону.

Прежде чем говорить о волновой функции электрона, хорошо было бы описать его *облако вероятности*, которое тесно связано с волновой функцией. Его легче понять, чем саму волновую функцию, и его физический смысл более очевиден, но оно менее фундаментально. (Эти пророчества наполнятся содержанием прямо сейчас.)

В классической механике частицы в каждый заданный момент времени занимают какие-то определенные положения в пространстве. В квантовой механике описание положения частицы весьма отлично от классического. Частица не занимает определенного положения в каждый конкретный момент времени; вместо этого ей ставится в соответствие облако вероятности, которое распространяется на все пространство. Форма облака вероятности может со временем меняться, хотя в некоторых *очень* важных случаях этого не происходит, как мы вскоре увидим.

Название подсказывает, что мы можем представить себе облако

вероятности как протяженный объект, имеющий некоторую неотрицательную (положительную или нулевую) плотность в каждой точке. Плотность облака в точке представляет относительную вероятность того, что частица будет обнаружена в этой точке. Таким образом, частица скорее будет обнаружена там, где плотность ее облака вероятности высока, и едва ли будет найдена там, где плотность облака низкая.

Квантовая механика не дает простых уравнений для облаков вероятности. Однако облака вероятности вычисляются из волновых функций.

Волновая функция отдельной частицы, как и ее облако вероятности, задает определенную амплитуду для всех возможных положений частицы. Другими словами, она определяет число для каждой точки в пространстве. Амплитуда волновой функции – это комплексное число, таким образом, волновая функция – это задание комплексного числа в каждой точке пространства<sup>[62]</sup>.

Чтобы задать правильные вопросы, мы должны провести особые эксперименты, которые различными способами исследуют волновую функцию. Например, мы можем поставить эксперименты, определяющие положение частицы, или эксперименты, определяющие ее импульс. Эти эксперименты дают ответы на следующие вопросы: «Где частица?», «Как быстро она движется?».

Как волновая функция отвечает на эти вопросы? Вначале проводится некоторая обработка, а потом вам выдаются шансы в виде чисел.

Для вопроса о положении обработка достаточно проста. Мы берем значение (или амплитуду) волновой функции – напомним, комплексное число – и возводим его модуль в квадрат. Вычисление дает нам для каждого возможного положения положительное число или нуль. Это число и является плотностью вероятности обнаружить частицу на этом месте, как мы уже говорили.

Для вопроса об импульсе обработка значительно более сложна, и я не буду пытаться описать ее в деталях. Чтобы найти вероятность наблюдать какой-либо импульс, вы должны вначале получить средневзвешенное значение волновой функции – каким именно способом это будет сделано, зависит от того, какой именно импульс вас интересует, – а затем возвести модуль этого значения в квадрат.

Ответы на эти вопросы требуют различных способов обработки волновой функции, которые оказываются взаимно несовместимыми. Согласно квантовой теории, невозможно ответить на оба вопроса одновременно. Вы не можете это сделать, хотя каждый вопрос сам по себе

является полностью законным и имеет содержательный ответ. Если бы кто-нибудь понял, как это сделать экспериментально, он бы опроверг квантовую теорию, потому что последняя утверждает, что это невозможно. Эйнштейн неоднократно пытался придумать эксперименты такого рода, но ни разу не достиг успеха и в конце концов признал поражение.

Итак, три основных момента:

- Вы получаете вероятности, а не определенные ответы.
- Вы не получаете доступ к самой волновой функции, а только можете украдкой посмотреть на ее обработанные варианты.
- Ответы на разные вопросы могут потребовать обработки волновой функции различными способами.

Каждый из этих моментов поднимает фундаментальные вопросы.

Первый поднимает вопрос о детерминизме. Действительно ли расчет вероятностей – это лучшее, что мы можем сделать?

Второй поднимает вопрос о множественности миров. Что описывает полная волновая функция, когда мы не пытаемся ее изучать, даже косвенно? Представляет ли она огромное расширение реальности – или является просто мыслительным инструментом, не более реальным, чем сон?

Третий поднимает вопрос о дополнении. Чтобы отвечать на различные вопросы, мы должны обрабатывать информацию разными способами. В приведенном и других важных примерах эти методы обработки оказываются взаимоисключающими. Таким образом, ни один подход, каким бы мудрым он ни был, не может обеспечить ответы на все возможные вопросы. Чтобы увидеть реальность во всей полноте, мы должны рассматривать ее с разных точек зрения. Таков философский принцип *дополнительности*. Это урок смирения, который преподносит нам квантовая теория. Например, у нас есть принцип неопределенности Гейзенберга: вы не можете измерить и положение, и импульс частицы в одно и то же время. Теоретически это следует из математики волновых функций. Экспериментально он возникает потому, что измерения требуют активного воздействия на измеряемый объект. Исследовать означает взаимодействовать, а взаимодействие – это потенциальное возмущение.

Каждый из этих вопросов увлекателен, и первые два привлекли большое внимание ученых. Однако мне кажется особенно состоятельным и значительным именно третий вопрос. Дополнительность – это одновременно характеристика физической реальности и урок мудрости, к которому мы должны возвращаться.

## Стационарные состояния как собственные колебания

Уравнение, которое описывает, как волновая функция электрона меняется во времени, называется уравнением Шрёдингера. Если рассматривать это уравнение как часть математики, то оно близко связано с уравнениями, которые мы используем для описания музыкальных инструментов.

Атом водорода, рассматриваемый как музыкальный инструмент, выглядит как трехмерный гонг, который является жестким на внешней стороне – далеко от протона, – но который легче привести в движение вблизи от середины. Это означает, что «вибрации» нашего инструмента, сила которых зашифрована в амплитуде волновой функции, будут иметь тенденцию сфокусироваться в середине. Волновая функция также будет стремиться сконцентрироваться в середине и, конечно, то же самое произойдет со связанным с ней облаком вероятности. Таково строгое квантово-механическое описание явления, в обиходе формулируемого как «протон притягивает электрон»!

Теперь мы готовы понять, как современная квантовая механика, основанная на волновых функциях и уравнении Шрёдингера, одновременно схватывает и передает «наивысшую музыкальность» Бора.

Самый важный шаг в понимании того, как действует любой музыкальный инструмент с физической точки зрения, – это понимание его естественных колебаний. Они соответствуют его «нотам», т. е. рисункам колебаний, которые инструмент может поддерживать на протяжении значительного времени и которые легко извлечь (сыграть).

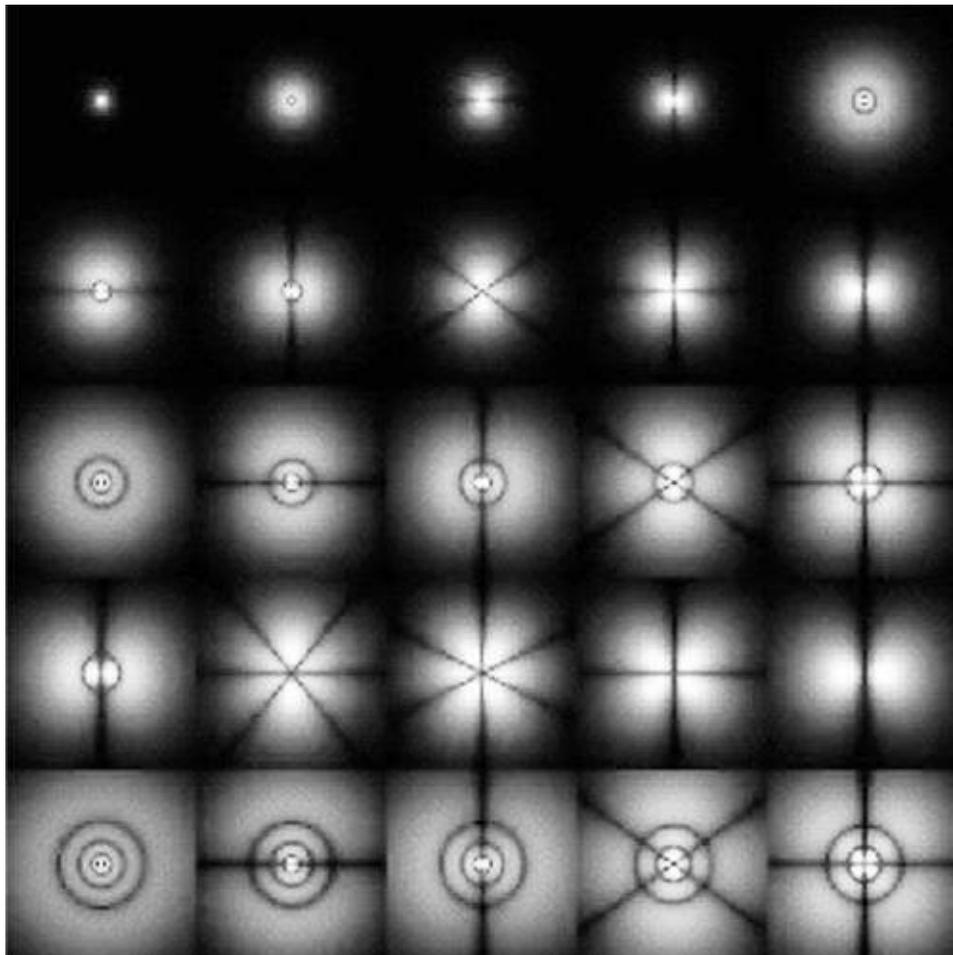
Поскольку уравнение Шрёдингера для электрона в атоме очень похоже на уравнение колебаний музыкального инструмента, мы должны рассмотреть его решения, которые выглядят подобно естественным колебаниям. И оказывается, что естественные колебания волновой функции означают нечто совершенно простое и замечательное по отношению к облаку вероятности – а именно, что оно не меняется совсем!

(Опишем это более подробно, используя комплексные числа. Когда мы говорим о вибрирующей струне, как на илл. 24, колеблется, т. е. меняется со временем, только положение элементов струны. Для волновой функции меняется только набор комплексных чисел, которые она присваивает различным точкам пространства. При естественных колебаниях изменение является простым: амплитуды комплексных чисел остаются одними и теми же, но меняются их фазы, причем все на одну и ту же величину.

В результате квадраты модулей амплитуд, которые и проявляются в облаке вероятности, не меняются вообще.)

Эти естественные колебания волновой функции, которые соответствуют не меняющимся облакам вероятности, имеют как раз такие свойства, которых Бор ожидал от своих «стационарных состояний». Электрон будет сохраняться в любом режиме колебаний из этого набора, и ни один другой их вид не имеет этого свойства. Более того, можно рассчитать энергию, присущую этим естественным колебаниям, и окажется, что она совпадает с энергией «разрешенных орбит» Бора.

Давайте посмотрим на какое-нибудь из этих стационарных состояний. На илл. 26 изображены их облака вероятности. Во всех случаях протон находится в центре и то, на что вы смотрите, является двумерной проекцией трехмерного облака. Яркость облака обозначает его величину как математической функции, т. е., скорее всего, электрон в любом из своих состояний будет обнаружен там, где облако ярче. Более компактные облака соответствуют стационарным состояниям с более низкой энергией.



Илл. 26. Каждое изображение – это моментальный снимок облака вероятности электрона атома водорода в том или ином стационарном состоянии. Электрон скорее всего будет обнаружен там, где облако ярче. В каждом случае в центре облака находится единственный протон. (Те же самые формы орбит имеют и электроны других атомов, таких как углерод.)

Чтобы оценить по достоинству сами волновые функции в отличие от получаемых из них облаков вероятности, требуется как следует постараться, но и результаты получаются более богатые. На вклейке СС мы видим только одно из стационарных состояний. Изображенные поверхности – это поверхности, где амплитуда волновой функции имеет постоянное значение. Они показаны в разрезе, так что вы можете видеть, что у них внутри. Цвета обозначают фазу волновой функции как комплексного числа. Вы должны воспринимать эту иллюстрацию как моментальный снимок. С течением времени цвета изменяются циклически. Воистину атомы – психоделичны!

Современная квантовая теория, несмотря на свою большую сложность, дает ошеломляющие преимущества по сравнению с пионерской моделью Бора:

- В современной квантовой теории переходы между стационарными состояниями происходят как логическое следствие из уравнений. Физически они вырастают из взаимодействия между электронами и электромагнитным флюидом. Поскольку это взаимодействие достаточно слабо по сравнению с основными электрическими силами, которые связывают электроны, у нас часто хорошо получается рассматривать его как поправку, отталкиваясь от стационарного состояния как от начальной точки. При таком отношении мы не считаем эти переходы настоящими скачками, хотя они происходят достаточно быстро.

- Правило Бора, определяющее «разрешенные» орбиты, было четко сформулировано только для единичных электронов. За годы «игры в Jeopardy», примерно с 1913 по 1925 г., было много попыток угадать правила для более сложных ситуаций. Но когда Шрёдингер (а ранее – Гейзенберг) придумал свои уравнения, они оказались настолько превосходящими прошлые подходы и даже настолько «очевидно правильными», что более или менее сразу были приняты как консенсус и быстро развились в современную квантовую теорию. И, судя по ее ошеломляющему и все еще продолжающемуся успеху, Природе, кажется, тоже нравится квантовая теория.

- Квантовая теория более музыкальна!

Процесс, который заменяет квантовые скачки, особенно интересен. В нем электрон порождает электромагнитную энергию в форме фотона там, где изначально не было ничего. Это происходит, когда электрон встречается спонтанную активность в электромагнитном флюиде и, передавая часть своей энергии, усиливает эту активность. При этом электрон переходит в состояние с более низкой энергией, виртуальный фотон становится настоящим фотоном и возникает Свет.

## **Холодная, строгая и блистательная**

Прежде чем двигаться дальше, я хотел бы остановиться на секунду для короткого спора с героем моей юности Бертраном Расселом, который писал:

Математика при правильном взгляде на нее владеет не только истиной, но и высшей красотой – красотой холодной и строгой, как красота скульптуры, без всякого обращения к какой-либо части нашей слабой природы, без блистательных нарядов живописи или музыки, но совершенно чистой и способной к неумолимому совершенству, какое может продемонстрировать только величайшее из искусств.

Я не могу полностью согласиться с этим утверждением, но я думаю, что его пуританский тон сбивает с толку (и слышать его от Рассела очень странно). Холодная и строгая красота может быть чудесной, но роскошные наряды тоже могут быть прекрасны. Они дополняют друг друга. Уравнение Шрёдингера холодно и строго. Но в то же время из него получается то, что изображено на вклейке СС!

## **Атомы ручной работы**

В последние годы границы атомной физики раздвинулись от наблюдения к контролю и созиданию. Ученики Мастера закончили обучение и сами стали мастерами.

На одном из рубежей атомные инженеры нашли способы отлавливать и изолировать отдельные атомы. Это позволило ясно взглянуть на основные квантовые процессы. Например, можно наблюдать за неожиданными изменениями состояния, которые происходят, когда отдельный атом

излучает или поглощает свет, и видеть «квантовые скачки» Бора в реальном времени. Атомные инженеры также могут манипулировать такими атомами, помещать их в электрические или магнитные поля или облучать светом. Это дает возможности тончайшего контроля. Отдельные атомы – это чудесный материал для инженерного искусства, потому что они фактически свободны от трения и их свойства могут быть настроены (при использовании полей) и с достаточной надежностью предсказуемы (с помощью теории). Например, это лучшие в мире часы. В настоящее время лучшие атомные часы идут с максимальным отставанием примерно в одну секунду за миллиард лет.

Другой передний край – это создание новых видов атомов. Квантовые точки – это искусственные структуры, основанные на тех же принципах, что и естественные атомы, но изготовленные «по техническим условиям», заданным человеком. По существу, это новые виды музыкальных инструментов, разработанные для работы не со звуком, а со светом. В самой своей основе квантовые точки состоят из небольшого количества электронов, изолированных в небольшом пространстве, где они попадают в ловушки искусно созданных электрических полей. Квантовые точки обладают огромными возможностями для создания детекторов и генераторов света. Это может оказаться очень полезным для расширения цветового восприятия, как мы обсуждали ранее, и во множестве других приложений.

Пионеры атомной физики и не мечтали об управлении отдельными атомами, не говоря уж о создании искусственных. В их ранних работах можно даже найти положения, отрицающие возможность квантовой инженерии. Бор, в частности, подчеркивал разницу между полностью доступным «классическим миром» и отличным от него «квантовым миром», который можно наблюдать (немногими способами!), но не перестраивать. Но их исследования, движимые изначально поиском красоты и простым любопытством, породили великолепные и бесконечно многообещающие новые технологии.

Это поучительно.

Многие виды наград вручаются людям за ощутимые, реальные заслуги. Эти награды принимают формы жалованья, прибыли, социального статуса и т. д. Но все накопленное богатство фундаментальной науки и искусства часто проистекает из усилий, чья непосредственная ценность заметна не сразу. Даже в случаях, когда некий прорыв очевидным образом важен, могут потребоваться годы работы, прежде чем он принесет какую-либо экономическую выгоду. Польза от него может полностью лежать

в сфере культуры и никогда не стать экономической в обычном смысле этого слова. Люди, которые работают над накоплением этого особого вида богатства, посвящают свой труд долговременному вложению в улучшение жизни человечества в целом. Кто из твердолобых бизнесменов или потребителей готов заплатить за это? И все же история учит нас, что такое вложение в будущее и всеобщее благо приносит свои плоды. Мудрое общество поощряет возможности совершать подобное.

## Назад к Платону

Детали атомистической теории Платона, основанной на атомах в форме платоновых тел, совершенно неверны. Несмотря на это, атомы Платона служат подходящей и красивой метафорой для реальности, потому что эта теория верна в принципе.

Вещество *действительно* состоит из атомов нескольких видов. Атомы *действительно* существуют в огромных количествах полностью идентичных копий. Свойства вещества *действительно* определяются свойствами атомов, из которых оно состоит. И, что для Платона было самым важным, *атомы воплощают Идеальное*.

В оригинальной теории Платона атомы воплощали прекрасную геометрию симметрии. В современной теории атомы – это решения прекрасных уравнений. (Если опуститься на уровень ниже, как вы увидите, мы снова вернемся к симметрии!) Если у вас есть достаточно мощный компьютер и правильные уравнения, этот компьютер сможет предсказать любое свойство атома, которое может быть измерено. Ничего больше не требуется. Именно в этом смысле атомы *воплощают* уравнения.

## Красота ограничения

Фундаментальные законы современной физики – это динамические законы. Другими словами, это законы, которые управляют тем, как вещи меняются во времени. Они переводят входные параметры (условия, которые были в один момент времени) в выходные параметры (условия в другой момент времени). Но они рады работать с любыми входными параметрами и потому не навязывают структуру.

По формальным признакам те атомы, которые мы знаем, вряд ли могут получаться из динамических уравнений. Атомы определенного вида – скажем, атомы водорода – это структуры, которые существуют в огромном количестве идентичных копий. Они не развиваются и не разрушаются и в стабильной среде не демонстрируют никаких свойств, которые изменялись бы в зависимости от времени. Заглядывая в прошлое (благодаря конечности скорости света), мы можем наблюдать спектры древних атомов, которые подтверждают, что атомы далеких-далеких галактик давным-давно вели себя точно так же, как атомы на сегодняшней Земле. Мы можем также с потрясающей точностью сравнить спектры, полученные в соседних лабораториях или в одной и той же лаборатории с разницей в две недели.

В производстве товаров использование взаимозаменяемых частей было революционной инновацией, и потребовалась сложная работа, чтобы к этому прийти. Но как же Природа добилась этого? Как могло единообразие, если оно было достигнуто тщательным подбором, противостоять разрушительному действию времени? И если эти строительные блоки исключительно стабильны и сопротивляются изменениям, то как же они тогда могли возникнуть?

Максвелл был обеспокоен и заинтригован этим вопросом, видя в нем свидетельство существования милосердного Творца. Он писал:

Как мы знаем, естественные процессы изменяют и в конце концов разрушают весь порядок и размеры как Земли, так и всей Солнечной системы. Но если случались и вновь могут случиться катастрофы, если старые системы могут разрушаться и на их развалинах могут возникать новые системы, то молекулы, из которых эти системы построены, неразрушимы и неизменны – это краеугольные камни материальной Вселенной.

Сейчас молекулы также неизменны по своему числу, по своим размерам и по весу, как и в то время, когда они были сотворены. Из этой неизменяемости их свойств мы можем заключить, что стремление к точности измерений, к правдивости в суждениях и к справедливости в поступках, почитаемых нами как благороднейшие черты человека, присущи нам потому, что они представляют сущность образа того, кто сотворил не только небо и Землю, но и материю, из которой они составлены<sup>[63]</sup>.

Ньютон не был убежден в стабильности Солнечной системы (и считал, что она нуждается в том, чтобы Творец ее время от времени ремонтировал). Здесь по похожим, но даже более веским причинам Максвелл сомневается в стабильности материальных структур, доказанной их точным сходством и возможностью добиваться точности в химии.

## **Атомы против солнечных систем**

Если не по божественному повелению, то как же иначе тогда современные химические атомы со своими повторяемыми, стабильными свойствами *возникают* из уравнений, которые первоначально являются уравнениями, описывающими изменения?

Чтобы оценить значение этого вопроса, давайте сравним его с похожим на вид вопросом, который имеет совершенно иной ответ. Это вопрос, который, как мы увидели, вдохновлял Кеплера: что определяет размер и форму нашей Солнечной системы?

На вопрос Кеплера современный ответ будет, в сущности, такой: «Случайность. Никакие фундаментальные принципы не определяют размер и форму Солнечной системы». Существует множество возможных способов, как вещество могло соединиться в звезду, окруженную планетами и их спутниками, точно так же, как существует множество возможных раздач в покере: какую вы получите, зависит от чистой случайности. В самом деле, сейчас астрономы открывают и изучают системы планет, обращающихся вокруг других звезд, и видят, что они организованы совершенно по-разному. Все эти системы подчиняются законам физики и развиваются согласно им. Но это динамические законы. Они не фиксируют начальной точки. Ньютоновская динамическая точка зрения на мир победила стремление Кеплера к геометрическому идеалу.

Говорит ли это о том, что возможно все, что угодно? Совсем нет. Мы можем отнести многие черты размера и формы Солнечной системы к фундаментальным. Некоторые можно проследить вплоть до их появления в ходе гравитационного коллапса из огромного газопылевого облака. (Мы видим, как этот процесс происходит в других частях Галактики, в частности – в туманности Ориона.) И то, что большая часть массы уходит на образование центральной звезды, такой как наше Солнце, – это логическое следствие. Всемирное притяжение способствует аккумуляции материи, а очень большие скопления масс создают в центре давление, достаточное для вспышки ядерной реакции: так и возникает звезда. Факты, которые производили такое впечатление на Ньютона, – то, что орбиты всех планет расположены примерно в одной плоскости (плоскости эклиптики) и планеты движутся в одном направлении, – отражает их роль как носителей момента импульса, полученного ими, когда сконцентрировалось первичное газовое облако. Другие характеристики отражают долгую историю, как старая обувь несет следы внешних воздействий на выступающих частях. Одна из таких черт – это то, что Луна всегда повернута к Земле одной стороной: вращение Луны вызвало бы в ней мощные приливы, которые бы действовали наподобие трения. Предположительно, в далеком прошлом такое вращение имело место, но со временем затухло. (По сходным причинам растет длина земных суток. Геологические данные, которые отражают суточные колебания в приливно-отливных отложениях, показывают, что в кембрийскую эру<sup>[64]</sup>, 650 миллионов лет назад, сутки составляли примерно 21 час.)

Мы также можем примерно «предсказать» размер и форму орбиты Земли вокруг Солнца на основании размышлений совсем иного рода. А именно: если бы форма и размер этой орбиты очень отличались бы от того, что есть, то не было бы разумной жизни, которая бы могла заметить это! При указанных условиях жизнь, сколько-нибудь близкая к той форме, которая нам известна, была бы невозможна (или по крайней мере очень трудна). Среди прочих возникли бы следующие проблемы. Если орбита намного меньше, вода на поверхности вскипит и испарится; если орбита слишком велика, то вода замерзнет; если орбита существенно отлична от круговой, то возникнут огромные перепады температуры.

Такого рода аргументы, которые возводят в принцип условия нашего существования, называются антропными. Взятые в самой общей форме, антропные доводы поднимают множество вопросов. Во-первых, кто такие «мы», когда говорится о «нашем существовании»? Если мы потребуем все, что необходимо для существования, скажем, Фрэнка Вильчека – или,

наоборот, вас, моего читателя, – мы будем создавать принципы из множества особых обстоятельств, которые на самом деле не следует рассматривать как фундаментальные характеристики Вселенной, Солнечной системы и даже Земли. Возможно, более разумный подход – строить антропные «предсказания» на основе более свободного требования о том, что должен возникнуть какой-то вид разума, способный наблюдать и делать предсказания. Но даже эта формулировка поднимает достаточно сложные вопросы на стыке биологии («Какие условия позволяют разуму возникнуть?») и философии («Что такое разум?», «Что такое наблюдение?», «Что такое предсказание?»).

Наши ограничения на размер и форму орбиты Земли представляют собой честный, достаточно простой и мягкий пример антропной аргументации. Мы перейдем к более рискованным и противоречивым примерам позже.

Как отмечал Максвелл, если бы атомы и молекулы действовали бы по тем же принципам, что Солнечная система, мир был бы совсем другим. Каждый атом отличался бы от любого другого и менялся бы со временем. Такой мир не мог бы иметь ту химию, что знаем мы, с определенными веществами и твердыми правилами их взаимодействия.

Сразу не очевидно, что же заставляет атомные системы вести себя столь отличным образом. В обоих случаях у нас есть массивное центральное тело, притягивающее несколько тел поменьше. Силы, задействованные в игре, гравитационные или электрические, в целом похожи – те и другие убывают пропорционально квадрату расстояния. Но есть три фактора, которые делают физический результат совершенно разным: стандартные атомы, с одной стороны, и непохожие друг на друга солнечные системы – с другой.

1. В то время как и планеты, и звезды отличаются одна от другой, все электроны имеют в точности одни и те же свойства (так же как и все атомные ядра данного вещества или, если говорить более точно, данного изотопа).

2. Атомы подчиняются законам квантовой механики.

3. Атомы изголодались по энергии.

Первый пункт этого объяснения, конечно, поднимает очередной вопрос. Мы пытаемся объяснить, почему атомы могут быть одинаковыми, и начинаем с утверждения о том, что некие иные вещи, электроны, все одинаковы! Вернемся к этому позже.

Но в любом случае то, что мы берем одинаковые части, не гарантирует нам одинаковых результатов на выходе. Даже если бы все планеты были одинаковы и все звезды были одинаковы, все равно существовало бы множество возможных способов «спроектировать» солнечную систему, и они бы были подвержены переменам.

Мы уже видели, как квантовая механика приносит дискретность и определенные образы в описание непрерывных объектов, которые подчиняются динамическим уравнениям. Эта история, как вы помните, развертывалась на илл. 24, 25, 26 и цветной вклейке СС.

Чтобы замкнуть круг, нам надо понять, почему электроны в атомах обычно находятся всего лишь в одном из бесконечно большого количества состояний. Здесь нам поможет пункт третий. Вариант с самой низкой энергией – так называемое основное состояние – как раз и является тем, который мы обычно обнаруживаем, потому что атомы сидят на голодном энергетическом пайке.

Почему атомы жаждут получить энергию? В конечном счете потому, что Вселенная огромна, холодна и расширяется. Атомы могут переходить из одного состояния в другое, испуская свет и теряя энергию – или поглощая свет и приобретая энергию. Если бы поглощение и излучение были сбалансированы, в игре было бы много различных состояний. Это происходило бы в горячей и закрытой системе. Свет, выделенный в одно время, был бы поглощен позже, и сбалансированное равновесие сохранялось бы. Но в большой, холодной, расширяющейся Вселенной излученный свет уходит в обширные межзвездные пространства, унося с собой энергию, которая не возвращается.

Так мы находим, что динамические уравнения, которые сами по себе не могут быть источником структуры, но делают это с помощью джиуджитсу («искусство мягкости» по-японски), сосредоточивая мощь других принципов. Они руководят ограничивающими силами квантовой механики и космологии. Космология объясняет бедность атомов энергией, а квантовая механика показывает, как энергетический голод порождает определенную структуру.

## Изображение и вдохновение

Я считаю вклейку СС выдающимся произведением искусства. На ней использованы кое-какие ловкие трюки с тенями и перспективой, чтобы передать ощущение трехмерности того, что, в сущности, является двумерным изображением. Также в ней используется изображение в разрезе и богатый выбор представляемых поверхностей (а именно поверхностей равной вероятности), чтобы выявить затейливую структуру.

Атомы водорода имеют только один электрон. Продвинувшись на один шаг по шкале сложности, мы перейдем к гелию, у которого два электрона. Квантовый атом с двумя электронами – намного более сложный объект для визуализации, и я не видел, чтобы это было когда-либо сделано хорошо. Трудность задачи состоит в том, что для каждого возможного положения одного электрона волновая функция второго является другим трехмерным объектом. Поэтому на самом деле естественное место обитания для всей волновой функции системы с двумя электронами – это пространство  $3 + 3 = 6$  измерений. Достаточно трудно представить такой объект так, чтобы это было понятно для человеческого мозга. Идеи, которые я упоминал в связи с расширением пространства цветового восприятия, здесь бы тоже могли пригодиться.

Честолюбивые ученые-художники в духе Брунеллески и Леонардо да Винчи видят в этой трудной задаче возможность для творчества. Они стремятся открыть глубинные аспекты реальности, которые одновременно прекрасны и расширяют границы сознания. Вклейка СС, как я надеюсь, – это знак того, что скоро все получится.

Убедительные изображения атомов в своем соединении закономерности и изменчивости станут похожи по своим качествам на мандалы. И еще они откроют нам страшную и волнующую перспективу проникновения в суть таинственной духовности: Се Есть Ты. Потому что, знаете, это так и есть.

## Симметрия I: два шага Эйнштейна

Создав две свои теории относительности – специальную и общую, Альберт Эйнштейн (1879–1955) принес в науку новый стиль размышления о фундаментальных принципах природы. Для Эйнштейна красота в особой форме *симметрии* начинает жить своей собственной жизнью. Красота становится творческим принципом.

## Таинственное происхождение

Описывая свой подход к науке, Эйнштейн произнес слова, которые звучат совершенно донаучно и возвращают нас во времена древних греков, которыми он восхищался:

Что меня интересует по-настоящему, так это был ли у Бога какой-то выбор при сотворении мира.

Предположение Эйнштейна о том, что Бог – или создающий мир Мастер – мог не иметь выбора, потрясло бы до глубины души Ньютона или Максвелла. Тем не менее оно прекрасно подходит к пифагорейским поискам всеобщей гармонии или понятию неизменного Идеального, восходящего к Платону.

Если у Мастера не было выбора, то почему? Что могло ограничивать Творца, создающего мир?

Во-первых, возможно, что Мастер в душе был художником. Тогда его ограничивало желание красоты. Я люблю предполагать (и предполагаю), что Эйнштейн по ходу дела размышлял над нашим Вопросом – воплощает ли мир прекрасные идеи – и вложил всю свою веру в ответ: «Да!»

Красота – это расплывчатое понятие. Но начнем с того, что настолько же расплывчатыми являлись когда-то и понятия «сила» и «энергия». Из диалогов с Природой ученые узнали, как усовершенствовать значения слов «сила» и «энергия», чтобы применять их в соответствии с важными аспектами реальности.

Также, изучая произведение Мастера, мы приходим к более ясному пониманию «симметрии» и в конечном счете «красоты» – понятий, которые отражают важные аспекты реальности, оставаясь верными духу своего использования в обычном языке.

## Специальная теория относительности: Галилей и Максвелл

Если Эйнштейн был новым воплощением Пифагора, то он многому научился за прошедшее время (благодаря множеству циклов реинкарнации). Эйнштейн, конечно, не отвергал открытий Ньютона, Максвелла и других героев научной революции и не отказывался от проявленного ими уважения к наблюдаемой реальности и конкретным фактам. Ричард Фейнман называл Эйнштейна «гигантом, чья голова находилась в облаках, но ноги стояли на земле».

В своей специальной теории относительности Эйнштейн примирил две идеи своих предшественников, которые, казалось, противоречили друг другу.

- Наблюдение Галилея о том, что движение системы как целого с постоянной скоростью не меняет законы Природы. Эта мысль является фундаментальной для астрономии Коперника и глубоко входит в механику Ньютона.

- Скорость света возникает из уравнений Максвелла как прямой результат основных законов Природы и не может меняться при переходе из одной системы в другую. Это однозначное следствие из электродинамической теории света Максвелла – теории, подтвержденной экспериментами Герца и многих других.

Между этими двумя идеями есть противоречие. Наш опыт говорит, что видимая скорость любого объекта изменится, если вы сами находитесь в движении. Ахилл догонит черепаху и даже обгонит ее. Почему с лучами света должно быть по-другому?

Эйнштейн разрешил это противоречие. Критически проанализировав действия, которые требуются для синхронизации часов, находящихся в различных местах, и то, как процесс синхронизации изменяется при общем движении с постоянной скоростью, Эйнштейн вскоре понял, что «время», приписываемое некоторому событию двигающимся наблюдателем, отличается от «времени», которое замечает фиксированный наблюдатель, причем различие зависит от места самого события. При описании событий, которые они наблюдают совместно, время, измеряемое одним наблюдателем, оказывается смещением пространства и времени другого, и наоборот. Как раз эта «относительность»

пространства и времени была новшеством специальной теории относительности Эйнштейна. Оба допущения, которые легли в ее основу, были хорошо известны и общепризнаны до его работы, но никто не воспринимал их оба достаточно серьезно, чтобы потребовать их согласования и провести его.

Поскольку в уравнениях Максвелла содержится скорость света, второе допущение специальной теории относительности – о том, что скорость света инвариантна относительно преобразований Галилея, – прямо следует из основного мотива Эйнштейна – необходимости сохранить как уравнения Максвелла, так и галилееву симметрию. Но это намного более слабое допущение.

На самом деле Эйнштейн сумел полностью изменить порядок аргументации, показав, что можно вывести всю систему четырех уравнений Максвелла из одного из них, применив преобразования Галилея, чтобы восстановить общий случай. (Приведя заряд в движение, вы получаете токи, а приведя в движение электрические поля, вы получаете магнитные поля. Следовательно, закон, управляющий созданием электрических полей неподвижными электрическими зарядами, после галилеевых преобразований дает общий случай<sup>[65]</sup>.) Этот потрясающий трюк нес в себе предчувствие будущего. *Симметрия, а не дедукция из известных законов, стала основным принципом и начала свою собственную жизнь.* Теперь можно было ограничивать еще неизвестные законы, требуя от них симметрии.

## Две поэмы в свете

### Слагая радугу вновь

Одно из физических следствий из специальной теории относительности я считаю наиболее красивым. Оно собирает вместе многие из наших самых глубинных тем – и тем не менее прямо взывает к нашему чувственному опыту. Более ранние главы нашей медитации, касающиеся физики и истории изучения света и цвета, подготовили нас к тому, чтобы мы насладились им вместе прямо здесь и сейчас.

Давайте подумаем, как изменяется чистый луч света определенного спектрального цвета, если мы смотрим на него с платформы,двигающейся с постоянной скоростью – другими словами, если мы прибегнем к преобразованию Галилея. Естественно, мы по-прежнему будем видеть луч света. И этот луч будет преодолевать пространство в прежнем темпе: скорость света инвариантна. Если мы имеем дело с чистым лучом света определенного спектрального цвета, то он по-прежнему будет казаться нам чистым лучом с определенным спектральным цветом. Но...

Цвет будет *другим!* Если мы движемся в том же направлении, что и луч (иначе говоря, удаляемся от его источника), или если его источник удаляется от нас, то цвет сдвинется к красному концу спектра (а если он изначально был красным, то перейдет в инфракрасный). Если мы движемся в противоположном направлении, то цвет сдвинется к синему концу спектра (или в ультрафиолет). Чем быстрее мы двигаемся, тем более заметен этот эффект.

Вышеописанный эффект повсеместно встречается в космологии, потому что далекие галактики движутся от нас – или, как мы говорим, Вселенная расширяется. В этом контексте он известен как красное смещение. Наблюдаемое красное смещение известных спектральных линий как раз и привело к открытию расширения Вселенной.

Для нас самый значительный вывод состоит в следующем: все цвета могут быть получены из любого цвета в результате движения или, как мы говорим, применяя галилеевы преобразования. Поскольку эти преобразования являются симметриями законов Природы, любой цвет полностью эквивалентен любому другому. Они все возникают как различные образы одного и того же объекта, видимые с разных, но в равной степени законных перспектив.

Здесь у нас должен быть рисунок! На вклейке DD вы видите волновую картину, связанную с чистым лучом света – спектральным цветом, – исходящим из источника,двигающегося направо со скоростью в  $7/10$  скорости света. Если вы находитесь справа, то луч приближается к вам и вы воспринимаете его цвет как синий; если же вы слева, то луч удаляется и представляется красным. На этом моментальном снимке источник находится вблизи центра.

Ньютон полагал, что он доказал: каждый спектральный цвет по своей внутренней сути отличается от любого другого и никакая алхимия не может превратить один в другой. Эксперименты Ньютона показали, что свет каждого спектрального цвета сохраняется, несмотря на отражение, преломление или многие другие возможные трансформации.

Но он попал впросак! Если бы Ньютон попытался бежать прочь от своих призм со скоростью десятки тысяч метров в секунду, то он увидел бы свою ошибку. Я, конечно, шучу. Очень часто (и это по-настоящему шокирует) можно встретить популяризаторов и исследователей науки, которые говорят такие вещи всерьез, как будто бы всё, помимо последней Истинной Теории Всего, – это просто какой-то мусор. Эта облегченная версия стиля мышления нетолерантных, тоталитарных идеологий. Та мысль, которую я хочу подчеркнуть, полностью противоположна: как близки к истине были заключения Ньютона и какими полезными они остаются.

И все же как здорово узнать, что в этой истории есть еще одна глава, где мы открываем глубокое единство, что лежит в основе разнообразия проявлений и обеспечивает его. Все цвета – это одно и то же, видимое в разных состояниях движения. Это великолепный поэтический ответ науки на жалобу Китса о том, что наука «разложила радугу на тысячи частей».

## **Оживляя цвет**

Физической сущностью цвета, как и физической сущностью звукового тона, является сигнал, который изменяется во времени.

Изменение света во времени происходит слишком быстро, чтобы наши органы чувств могли следовать за ним. Его частота слишком высока. И поэтому, чтобы извлечь как можно больше из этой трудной ситуации, наша система восприятия обрабатывает информацию и интерпретирует

малую ее часть как воспринимаемый цвет.

Тот код, что получается на выходе, несет на себе только слабый след оригинала! Когда мы воспринимаем цвет, мы видим только символ изменения, а не то, что меняется.

Но мы можем восстановить большую часть утраченной информации, а именно – восстановив изменения во времени, изменяя их масштаб так, чтобы человек мог их воспринимать. Через эту преобразующую реконструкцию мы расширим двери восприятия.

## Общая теория относительности: локальность, анаморфизм и флюиды в их основе

В специальной теории относительности, как мы уже обсуждали, Эйнштейн возвел галилееву симметрию (инвариантность) до основного принципа – требования, которому должны подчиняться все законы физики. Уравнения Максвелла с самого начала соответствовали этому требованию, а законы движения Ньютона – нет, но Эйнштейн предложил видоизмененную механику, которая ему удовлетворяла. Для тел, которые движутся намного медленнее скорости света, версия Эйнштейна повторяла ответы успешно работающей теории Ньютона.

А вот теорию гравитации Ньютона приспособить к тем же требованиям оказалось гораздо труднее. Она строится вокруг понятия массы, но в специальной теории относительности масса теряет свое тепленькое местечко. В частности, масса не сохраняется. (Если эти понятия вам не знакомы, то прочитайте статьи «Масса» и «Энергия» в разделе «Термины».)

Итак, если вы хотите, чтобы гравитация реагировала на массу, как это делается в теории Ньютона, то вы даете неоднозначные инструкции. Релятивистской теории гравитации потребовались новые основания.

В конце концов Эйнштейн решил эту проблему в своей общей теории относительности, усилив понятие симметрии. Он сделал симметрию – а именно симметрию Галилея – *локальной*.

Мы сможем лучше понять локальную симметрию, которую мы имеем в общей теории относительности, сравнив ее с глобальной (жесткой) симметрией в специальной теории относительности.

Согласно глобальной галилеевой симметрии или инвариантности, мы можем изменить состояние движения Вселенной, добавив постоянную общую скорость, при этом законы физики не изменятся. Но если мы изменим относительное движение различных частей Вселенной, прикладывая скорости, которые меняются в пространстве или времени, мы должны ожидать изменений в законах физики. Если вы машете магнитом вблизи стрелки компаса, стрелка двигается!

Локальная галилеева симметрия или инвариантность постулирует, что есть намного более широкий класс преобразований, которые оставляют законы физики неизменными. А именно: она гласит, что мы можем выбрать добавленную скорость так, что она будет разной в разное время и в разных

местах. Это утверждение должно звучать возмутительно, поскольку только что мы сказали, что как раз оно и *не работает!*

Но есть способ заставить его работать, расширив теорию. После многих попыток описать основную идею доступным образом, предпринятых в разных случаях в течение нескольких лет, я нашел один способ, который мне нравится. Не случайно он основывается на том, о чем мы размышляли ранее, и черпает идеи в искусстве.

Мы использовали художественную перспективу как наш прототип симметрии. Вы можете посмотреть на одну и ту же сцену из разных мест и таким образом получить разные перспективы. Изображения этой сцены могут и будут отличаться во многих деталях, но все они останутся изображениями одного и того же. Изменение перспективы без изменения сцены – это блестящий пример симметрии.

В той же манере мы можем смотреть на мир с разных «перспектив», придавая ему постоянную скорость или, что равнозначно, глядя на него с движущейся платформы. Когда мы делаем так, многие вещи начинают выглядеть по-другому, но – согласно специальной теории относительности – те же самые законы физики остаются в силе. В таком смысле это будет все еще изображение того же самого мира.

Теперь давайте представим более общие способы взглянуть на сцену помимо смены перспективы. Это приведет нас в царство анаморфного искусства, прекрасно показанного на вклейке ЕЕ. В нем используются линзы, кривые зеркала и другие приспособления, чтобы создать изображения, которые искажаются интересными, упорядоченными способами. Диапазон изображений, которые могут представлять данную сцену, значительно расширяется и включает некоторые очень искаженные виды.

Если говорить более «физически», то мы можем представить, что смотрим на мир через прозрачный, но преломляющий свет материал – скажем, воду. Мы даже можем представить себе, что вода может быть в некоторых местах плотнее, чем в других, и поэтому угол преломления в разных местах отличается. (Такое трудно сделать с настоящей водой, но для нас это несущественно.) В подобной ситуации изображения, которые мы увидим в различных местах, могут быть искажены и на самом деле выглядеть очень разными. Возможно, нам будет трудно их истолковать.

Если мы не поймем, что таким эффектом мы обязаны воде, у нас будет искушение думать, что эти изображения соответствуют разным сценам. Но если мы знаем о воде и учитываем ее воздействие, мы можем

принимать гораздо больше возможных изображений как состоятельные представления нашей сцены. Мы можем распределять воду различными способами, например, чтобы симитировать эффект зеркал в комнате смеха. Мы даже можем привести нашу воду в движение, чтобы наши изображения могли также меняться во времени. Коротко говоря, вообразив себе заполняющую пространство жидкость, или флюид, и учитывая производимые ею эффекты, мы можем рассматривать широкий диапазон трансформированных изображений как представления одной и той же сцены, рассматриваемой через различные состояния жидкости.

Подобным образом, введя материал подходящего сорта в пространство-время, Эйнштейн смог позволить тем искажениям физических законов, которые возникают при преобразованиях Галилея, меняющихся в пространстве и во времени, происходить в результате модификаций этого нового материала. Последний называется метрическим полем, или, как я предпочитаю говорить, метрическим флюидом. Расширенная система, состоящая из исходного мира и гипотетического нового материала, подчиняется законам, которые остаются теми же самыми даже тогда, когда мы вводим переменные изменения скорости, хотя состояние метрического флюида при этом меняется. Другими словами, уравнения для расширенной системы могут поддерживать нашу огромную, «невероятную» локальную симметрию.

Можно было бы ожидать, что системы уравнений, которые поддерживают такое огромное количество симметрий, очень специфичны и их трудно получить. Новая субстанция должна иметь вполне определенные характеристики. Уравнения с такой огромной симметрией – это аналоги платоновых тел или, лучше сказать, сфер среди уравнений!

Когда Эйнштейн разработал эти уравнения, обогатив мир новой субстанцией, он обнаружил, что получил заодно и свою долгожданную теорию тяготения. Уравнения показывали, что метрический флюид, который он ввел, чтобы позволить существовать локальной галилеевой симметрии, «прогибается» в присутствии вещества и, в свою очередь, влияет на то, как вещество движется. Таким образом, метрический флюид в конечном итоге играет ту же роль для тяготения, как электромагнитный флюид Максвелла для электромагнетизма. Его элементарные возбуждения, или кванты, мы называем гравитонами по аналогии с фотонами в электромагнетизме.

В этом построении роль симметрии как управляющего миром принципа была поднята на новый уровень. Симметрия стала созидательной. Допущение локальной симметрии продиктовало детальную

структуру богатой и сложной теории тяготения, которая успешно описывает Природу. Чтобы добиться успеха с локальной симметрией, нужно ввести понятие метрического флюида и следующие из него гравитоны.

Я должен добавить, что такой подход к общей теории относительности, который помещает локальную симметрию в центр Мироздания, в чем-то неортодоксален. Обычно обращаются к другим концепциям, дающим другие поводы для введения метрического флюида. Но локальная симметрия – это сама суть проблемы, и такой минималистский подход отлично нам служит, когда мы переходим к созданию теорий других сил.

Эйнштейн, говоря о своей теории, пользовался другой терминологией. Какая-то часть ее содержит следы его личных периодов «блужданий во тьме» и кажется двусмысленной или запутанной, по крайней мере мне. Но в основном его понятие общей ковариантности соответствует нашей локальной галилеевой симметрии. Подводя итоги нашего обсуждения в одном предложении, мне кажется подходящим воздать честь его выбору:

Гравитоны – это олицетворение общей ковариантности.

## Квантовая красота II: Процветание

Анализируя вещество, мы разлагаем его на электроны и атомные ядра (и в конечном счете, как мы увидим далее, еще на одну ступень – на электроны, кварки и глюоны). В этот список составных частей справедливо будет добавить фотоны, поскольку они являются материалом электромагнитного флюида. Из этого скудного набора ингредиентов, подчиняющихся нескольким странным, но строгим и хорошо структурированным правилам, возникает бесконечное разнообразие материальных миров химии, биологии и повседневной жизни.

В чем же секрет?

Это глава – короткая, но важная часть в развитии нашего Вопроса. В ней мы скрепим связь

*Идеальное → Реальное*

между странной музыкой квантовой теории и реальным миром материи. В последующих главах мы уточним наше понимание Идеальных основ в стиле:

*...Идеальное → Идеальное → Идеальное → Реальное.*

Но эта последняя связь, изобретенная здесь, будет оставаться прочной и по сути неизменной.

Мир химии обширен и увлекателен. Но нашей целью не является составление энциклопедического словаря. Чтобы ответить на наш Вопрос, достаточно, чтобы мы скрепили нашу последнюю связь. А чтобы эта задача одновременно поддавалась решению и решать ее было в радость, я сосредоточусь на том, что может показаться до смешного урезанной версией химии, где используется всего один элемент – углерод. Как вы увидите, этот уголок одного химического элемента уже создает целую страну чудес.

## Чего хотят электроны?

### Чего хотят электроны?

Этот вопрос имеет смысл, потому что все электроны, в отличие от людей, имеют одинаковые свойства и их «желания» легко перечислить. В основном их три, и о первых двух мы уже упоминали в предыдущей главе.

- Электроны подвержены электрическим силам, которые притягивают их к положительно заряженному ядру атома, но отталкивают друг от друга.

- Электроны описываются заполняющими пространство полями, волновыми функциями, которые предпочитают изменяться плавно и мягко. Последние принимают форму специфических образцов стоячей волны, называемых орбиталями, в которых находится оптимальный компромисс между притяжением ядра и естественной охотой электронов к перемене мест. Мне нравится представлять себе электроны, которые объясняют ядру атома: «Я нахожу тебя привлекательным, но мне нужно мое собственное пространство».

- Третья важная особенность электронов состоит в их отношениях друг с другом. Мы не упоминали ее, когда говорили об атоме водорода, поскольку в каждом атоме водорода всего один электрон. Это третье свойство немного сложнее двух первых. Оно называется принципом запрета Паули по имени швейцарского физика австрийского происхождения Вольфганга Паули, который впервые сформулировал его в 1925 г. Принцип Паули – это чисто квантово-механический эффект. Без отсылки к квантовому описанию физической реальности, основанному на волновых функциях, его даже нельзя сформулировать! Когда Паули предложил его, под принципом запрета не было теоретической базы. Вы можете назвать его плодом вдохновения или можете сказать, что это была догадка. Обе точки зрения правильны. Как видение стационарных состояний и квантовых скачков у Бора – и, если на то пошло, как и законы гармонии Пифагора! – принцип запрета Паули родился из восприятия звуков музыки (для Бора и Паули это была музыка атомных спектров) и выявления в музыкальных образах управляющих ими законов. Сегодня мы считаем принцип запрета Паули одним из аспектов квантовой теории тождественных частиц, который своими корнями уходит в теорию относительности и теорию квантового флюида, но первоначально это было

озарение. Для нашей нынешней задачи – оценить, как кипучее стихийное творчество электронов произрастает из простых правил, – нужна только первоначальная формулировка Паули. Правило номер три в грубой форме, которой мы будем пользоваться, гласит: не более чем два электрона могут находиться в одном и том же стационарном состоянии. (Почему не более двух электронов? Это кажется странным! Но причиной является то, что электрон имеет собственное вращение, или спин. Сразу два электрона могут находиться в определенном стационарном состоянии, только если они «вращаются» в противоположных направлениях. Более удовлетворительная формулировка принципа Паули гласит, что не более одного электрона может быть в том же самом стационарном состоянии, причем спин теперь является частью описания состояния.)

## Углерод!

Эти три правила разворачиваются в целые миры материаловедения, химии и физических основ биологии, включая большую часть наследственности и метаболизма. Чтобы преподнести это захватывающее изобилие в приемлемых для восприятия пропорциях, я решил сосредоточиться на его небольшом участке – вещественном мире чистого углерода. Как вы увидите, даже этот небольшой участок необычен, богат и разнообразен. Он также подводит нас к нескольким большим областям исследований, находящимся на переднем крае науки.

Химию, основанную на углероде, часто называют органической, потому что углерод является основным ингредиентом всех белков, жиров и сахаров, которые вместе с нуклеиновыми кислотами формируют «звездный состав» биологии. Но помимо углерода эти биологические молекулы также содержат другие элементы, которые являются ключевыми для их функционирования. Чисто углеродные соединения не играют никакой роли в естественной биологии. Поэтому здесь мы заглядываем в особый раздел великой книги органической химии – главу, посвященную неорганической органической химии.

## Атом углерода, по одному за раз

Соединения углерода образуются путем сочетания атомов углерода, поэтому давайте начнем с них. Ядро атома углерода содержит шесть протонов, таким образом, оно имеет шесть единиц положительного заряда, который может притянуть шесть электронов, прежде чем будет нейтрализован. Когда эти электроны пытаются свести к минимуму свою энергию, в игру вступают наши три правила. Электроны предпочли бы иметь волновые функции в стационарных состояниях или, как говорят химики, орбиталях с самой низкой возможной энергией. Это симпатичные, круглые, компактные орбитали, которые показаны в верхнем левом углу на илл. 26. Однако принцип Паули гласит, что так мы можем найти место только для двух электронов.

Оставшимся четырем приходится использовать другие виды орбиталей в пространстве. Сделав шаг вправо, мы увидим другую круглую орбиталь. Она менее компактна, поэтому получает меньше выгоды со стороны притягивающего заряда центрального ядра. Электроны на этой

орбитали менее стабильно связаны с ядром, чем два «внутренних» электрона, – ключевой факт к тому, что последует дальше. Эта вторая круглая орбиталь может содержать еще два электрона, таким образом, теперь у нас теперь есть место для четырех из шести электронов. Чтобы поселить оставшиеся два, нам надо заглянуть немного дальше.

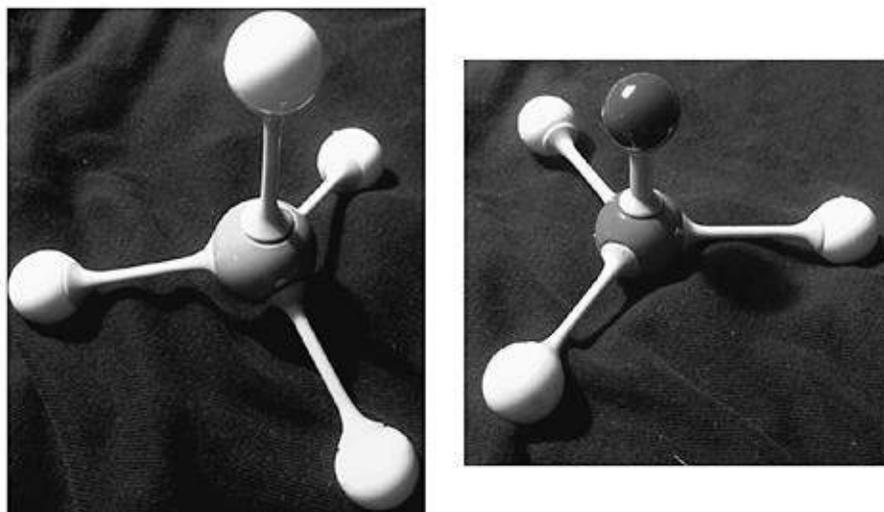
Сделав еще один шаг вправо, мы видим новый вид орбитали, уже не круглой, а скорее в форме гантели. Такая форма может быть ориентирована в любом направлении, поэтому на самом деле существует три независимые орбитали этого типа. Поэтому после того, как мы вводим эти орбитали в игру, у нас появляется полно места для двух оставшихся электронов.

Оказывается, что у этих двух новых видов орбиталей практически одна и та же энергия, поэтому электроны могут занимать их по выбору без запретительно больших энергетических трат. Важным является различие между двумя внутренними электронами, которые очень прочно связаны с ядром, и четырьмя внешними электронами, которое состоит в том, что последние удерживаются гораздо слабее. И когда рядом существуют другие атомы, именно эти четыре оказываются вожаками для раздела. Слегка изменив свои орбитали, эти электроны могут существенно удаляться от «своего» ядра и пользоваться выгодами притяжения соседних.

## **Атомы углерода в связках**

Когда мы говорим о связанных состояниях атомов углерода, существует два особенно прекрасных, симметричных способа разделять электроны между атомами. Они показаны на илл. 27.

Слева мы видим единицу структуры алмаза, которая демонстрирует идеальную трехмерную симметрию. Здесь четыре орбитали вытягиваются к вершинам тетраэдра – простейшего платонова многогранника, как вы помните.



Илл. 27. Чистый углерод имеет две возможности установления связи между атомами, обе из которых оптимальны с точки зрения симметрии

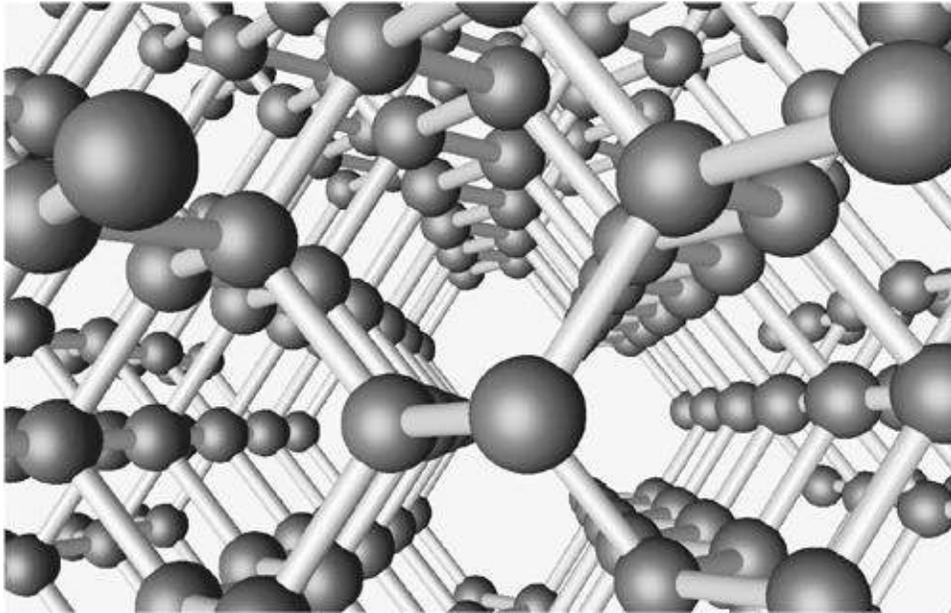
Справа мы видим единицу структуры графена, которая демонстрирует идеальную двумерную симметрию. Три лежащие в одной плоскости орбитали вытягиваются к вершинам равностороннего треугольника – простейшего правильного многоугольника. Белые шары в обоих случаях будут замещены другими атомами углерода с тем же типом связи, тогда как темные шары внесут вклад в слой квазисвободных электронов. (Строго говоря, плотность этого электронного слоя распределяется пополам – половина сверху и половина снизу по отношению к основной плоскости атомов углерода). Заметьте, что если каждая орбиталь занята одним электроном от каждого ядра, то мы отлично удовлетворяем принципу Паули, причем каждое ядро углерода делит по четыре своих электрона с соседними. На других иллюстрациях в этой главе вы увидите, как эти основные элементы комбинируются друг с другом и дают великолепное разнообразие материалов из чистого углерода.

Не случайно именно эти особенно симметричные образцы связи атомов оказываются теми, которые соответствуют предпочтительной (низкой) энергии. Они позволяют реализовать мириады стабильных способов комбинировать атомы углерода, которые мы сейчас исследуем.

### **Алмаз (трехмерная симметрия)**

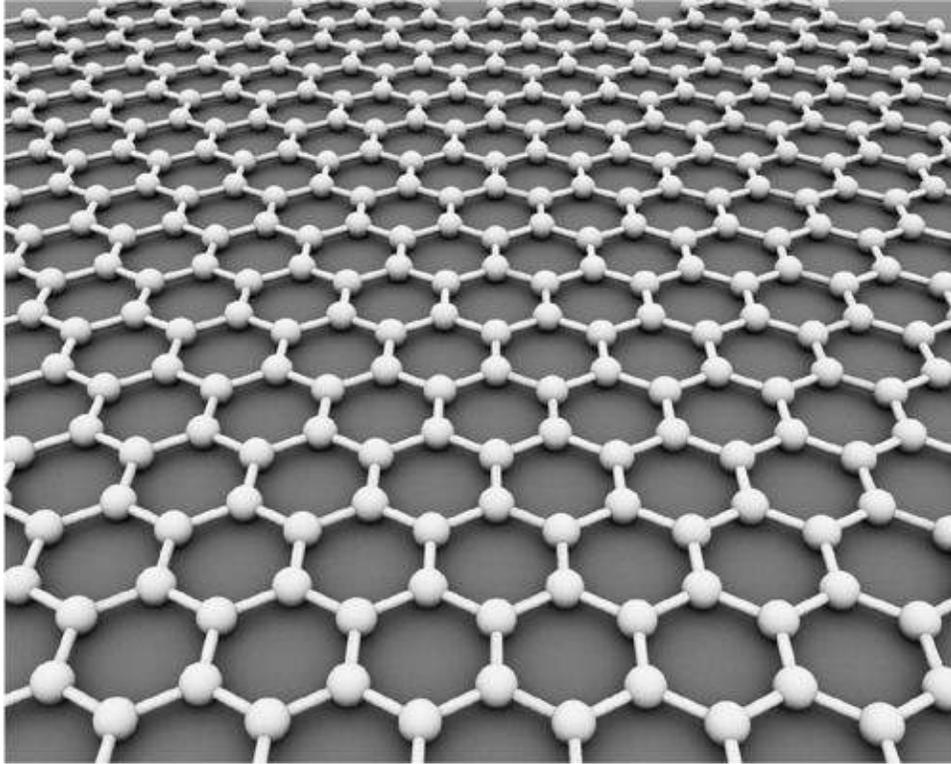
Структура алмаза на атомном уровне симметрична и гармонична (илл. 28). Каждое ядро атома углерода является центром четырех орбиталей

электронов. Орбитали протянуты к четырем соседним ядрам, которые расположены в вершинах правильного тетраэдра. Такое расположение очень эффективно, поскольку электроны избегают друг друга, посещая два разных ядра. Электроны при такой расстановке счастливы и не желают ничего другого. Их трудно оторвать, и поэтому-то алмазы так трудно поцарапать! Чистые алмазы прозрачны в сущности по той же причине: фотоны видимого света не могут доставить достаточно энергии, чтобы заставить электрон изменить свое состояние. (Алмазы нечистые, где к углероду примешиваются некоторые другие элементы, или дефектные, с нарушениями кристаллической структуры, могут иметь цвет. Существует сложная система сортировки и оценки цветов ювелирных алмазов. Некоторые виды несовершенства оказываются лучше других или даже лучше самого совершенства...)



Илл. 28. Структура алмаза

Каждое ядро углерода делит электроны с четырьмя другими в вершинах описанного тетраэдра. Это заполняющая пространство трехмерная структура



Илл. 29. Структура графена

Каждое ядро углерода делит электроны с тремя другими в вершинах равностороннего треугольника. В этой сотовой структуре, которая может распространяться бесконечно, мы узнаем одну из трех бесконечных платоновых поверхностей

### **Графен (двумерная симметрия) и графит (2 + 1)**

Самая стабильная форма элементарного углерода при комнатной температуре и нормальном давлении – это не алмаз, а графит. Вопреки своей широко разрекламированной репутации алмазы не вечны. Если пройдет достаточно много времени, они превращаются в графит (но пусть у вас не перехватывает дыхание). Графит – это черный материал, из которого делают грифели карандашей, а также широко используют как промышленную смазку. На атомном уровне графит – это сильно слоистый материал, состоящий из многих слоев графена (илл. 29), которые слабо связаны между собой. Слабость связи между слоями позволяет им легко скользить друг вдоль друга или сниматься. Это объясняет смазочные способности графита, а также способность оставлять штрихи на поверхностях. Мы говорим, что графит имеет 2 + 1 измерение, потому

что его двумерные листы можно бесконечно укладывать друг на друга.

Графен, однослойная версия графита, является простейшим и самым эффективным материалом этого рода.

В течение десятилетий его изучали теоретически, прежде чем смогли получить в лаборатории. Поскольку графен так прост и правилен, квантовые физики-теоретики смогли с уверенностью и достаточно детально предсказать его свойства. Ожидалось, что графен будет чем-то феноменальным, если его смогут производить. Но можно ли его получить?

Графен впервые был выделен Андре Геймом и Константином Новоселовым в 2004 г. В методе открытия было что-то от науки XIX в., каким-то образом перескочившее в век XXI. Они начали с карандашных штрихов, в которых обычно содержится несколько углеродных слоев, состоящих из графита. Потом ученые применили самоклеющуюся ленту, чтобы снять несколько слоев и перенести следы штрихов на тонкие предметные стекла. Эти следы составили нерегулярную поверхность, где были пятна, на которых углерод отсутствовал вообще, и те, где он сократился до одного слоя (графена!), а также пятна, где углерод имел толщину в два слоя и т. д. Различные слои показывали слегка отличающиеся цвета под поляризованным светом, поэтому Гейм и Новоселов смогли распознать пятна графена и изучить их свойства достаточно хорошо, чтобы доказать, что они и в самом деле являются пятнами новой модификации углерода – графена. В 2010 г. за эту работу Гейм и Новоселов получили Нобелевскую премию по физике.

Графен имеет уникальные механические и электрические характеристики, которые сулят множество способов его применения. Вдохновленные этими перспективами люди уже нашли некоторые более эффективные способы получать его. Одно оптимистичное и, быть может, не столь уж сумасшедшее исследование предсказывает появление рынка графена объемом в 100 миллиардов долларов в следующие несколько лет.

Сейчас я просто упомяну один ключевой момент, который легко понять и который хорошо подходит к нашим размышлениям. Как и в кристаллической решетке алмаза, правильное, эффективное расположение электронов на плоскости графена настолько предпочтительно, что их трудно разбить или заставить разойтись. Поэтому графен является исключительно прочным, крепким материалом. В то же время, поскольку его толщина составляет всего один атомный слой, лист графена легок и гибок. Обосновывая присуждение премии в 2010 г., Нобелевский комитет упомянул, что гамак из одного квадратного метра графена может выдержать кошку, но весить будет примерно столько же,

сколько один из ее усов. Насколько я знаю, конкретно этот эксперимент еще никто не поставил.

## **Нанотрубки (одномерная симметрия)**

Мы можем свернуть двумерный лист графена в одномерную трубку, так называемую нанотрубку. Это можно сделать многими способами, получая нанотрубки с различными радиусами и шагом спирали (см. вклейку FF). Отличаясь лишь слегка по своей геометрии, нанотрубки могут иметь полностью различные физические свойства. Триумфом квантовой теории является возможность однозначного предсказания свойств таких объектов только с помощью расчетов, причем прогнозы согласуются с экспериментальными измерениями.

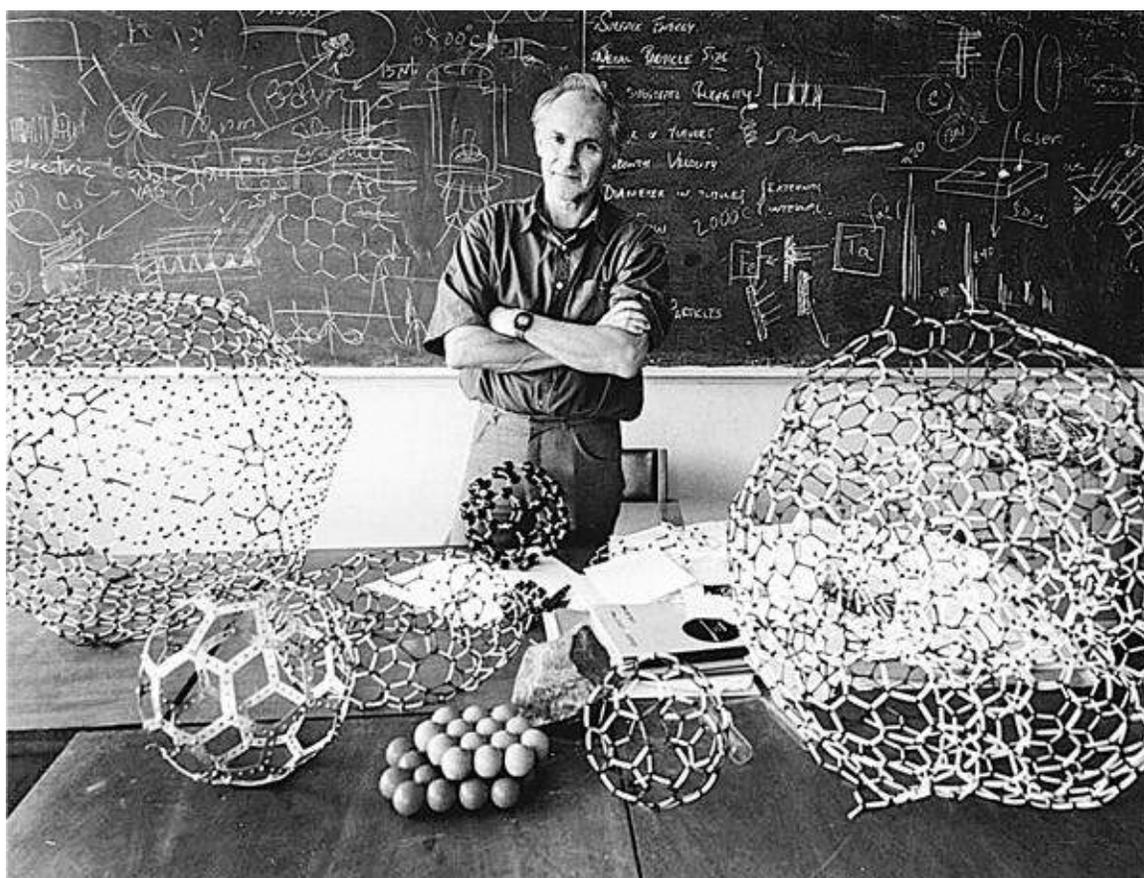
## **Бакибол (нульмерная симметрия)**

Наконец, можно представить себе замыкание графенового листа на себя с появлением конечной поверхности. Это можно сделать многими способами. На самом деле невозможно сформировать простую замкнутую поверхность, в каждой вершине которой встречаются три стороны, используя только шестиугольники. Такого платонова тела просто не существует! Ближайшим оказывается додекаэдр, состоящий из пятиугольников. Что еще более важно, каждая вершина додекаэдра связана именно с тремя другими, поэтому может быть использована основная структурная единица, изображенная в правой части илл. 27, но три ее орбитали нужно отогнуть в сторону от их идеального плоского расположения. Молекула C<sub>20</sub> в форме додекаэдра, состоящая из 20 атомов углерода, действительно существует, но более крупные формы, которые включают дополнительные шестиугольники, требуют меньшего искажения и образуются с большей готовностью. Прекрасный «футбольный мяч» – молекула C<sub>60</sub>, показанная на илл. 30, – особенно стабильна и распространена.

Шарики из чистого углерода, среди которых молекула C<sub>60</sub> является наиболее распространенной, но ни в коем случае не доминирующей, формируются при сжигании углерода посредством электричества, например, при дуговых разрядах. В небольшом количестве они также попадают в обычной свечной саже.



Илл. 30. Структура бакибола. Здесь углеродная структура полностью замкнута, создавая конечный объект. Издалека он выглядит как точка – измерения «схлопнулись» до нуля.



Илл. 31. Гарольд Крото в своей лаборатории с моделями фуллеренов

Илл. 30 показывает структуру  $C_{60}$  – одной из множества молекул, известных как фуллерены или бакиболы. Здесь графен свернут дважды,

в каждом из двух пространственных измерений, чтобы получить нульмерный объект, в котором не осталось направлений, куда он мог бы бесконечно распространяться. Как и в графене, и в нанотрубках, его основная структурная единица – это связь ядра углерода с тремя соседними. Бакибол включает в себя скрытый додекаэдр: в нем есть 12 пятиугольников, равномерно рассредоточенных между 20 шестиугольниками, причем если вы сожмете шестиугольники до точек, вы получите додекаэдр. Существуют варианты бакиболов с различным количеством шестиугольников, но в каждом из них всегда 12 пятиугольников по топологическим причинам. Свое имя они получили в честь Бакминстера Фуллера (1895–1983), изобретателя и архитектора, в чьих купольных конструкциях широко использовался подобный принцип соединения узлов в сети с помощью стержней.

Кажется подходящим завершить наше короткое путешествие в поразительную химию чистого углерода фотографией Гарольда Крото (родился в 1939 г.), который в 1996 г. [разделил](#) Нобелевскую премию по химии за свою работу о фуллеренах, среди собственноручно созданных им моделей молекул.

Живой ум восхищается не только красотой алмазов и их искрящимися гранями, но также и скрытой, внутренней красотой однообразных и скучных на первый взгляд карандашных штрихов, и сажи, и тончайших паутинок, которые выдерживают кошку.

## Симметрия II: Локальный цвет

Теперь множество смысловых линий нашей медитации сходятся воедино, и мы приближаемся к ответу на наш Вопрос.

В нашей первой интерлюдии о симметрии мы видели, как Эйнштейн, рассматривая локальную галилееву симметрию, открыл свою теорию гравитации, т. е. общую теорию относительности.

В следующей главе мы опишем, как на основе предположения о локальности симметрии строятся успешные теории трех основных взаимодействий в Природе: электромагнитного, сильного и слабого. Новые симметрии включают преобразования среди свойств (а конкретно – «цветовых зарядов») частиц. В локальных формах симметрий мы позволяем этим преобразованиям быть различными в разных местах и временах.

Итак, чтобы вдохновить себя на это путешествие, мы представили себе пункт назначения.

## Анахромия

Анаморфное искусство искажает пространственную структуру изображений. Это великолепное отображение такого рода преобразований пространства-времени, какие общая теория относительности принимает в качестве симметрий.

Виды преобразований, которые включают в себя другие взаимодействия, лучше всего могли бы быть представлены в художественной форме, которая менее развита, если вообще существует. Анаморфное искусство оставляет цветовое строение своих изображений неизменным. В *анахромном* искусстве, напротив, мы изменяем цветовую структуру образов, оставляя неизменной пространственную.

В данном случае несколько рисунков говорят больше многих тысяч слов.

На вклейке GG изображена одна из новаторских работ в анахромном искусстве. На ней мы видим четыре версии фотографии ярмарки сладостей в Барселоне. В верхнем левом углу находится оригинальное изображение с минимальной обработкой. В верхнем правом углу мы видим результат глобального преобразования цветов, когда каждый пиксель преобразуется одинаково. (Для умников:  $G \rightarrow R$ ,  $B \rightarrow G$ ,  $R \rightarrow B$  в стандартной схеме кодирования RGB.) На двух нижних картинках были применены более сложные трансформации цветов, в которых *природа преобразования меняется от места к месту*. В нижнем левом углу мы видим эффект довольно легких преобразований, тогда как в нижнем правом перед нами результат более значительных трансформаций.

## Ответ на наш Вопрос

Культовые сооружения воплощают стремления их архитекторов и общин, которые те представляют, к идеальной красоте. Их избранные выразительные методы включают цвет, геометрию и симметрию. В частности, рассмотрим великолепную вклейку НН. Здесь локальная геометрия окружающих поверхностей и локальная структура их цвета меняются по мере того, как их исследует наш взор. Это живое воплощение анаморфии и анахромии – тех самых мотивов, которые наше исследование фундаментального устройства Природы находит воплощенным в Ее сердцевине.

Воплощает ли мир красивые идеи? Вот он, наш ответ, у нас перед глазами: да!

Цвет и геометрия, симметрия, анахромия и анаморфия как самоцель являются лишь одним ответвлением художественной красоты. Существующий в искусстве ислама запрет на изображение людей сыграл важную роль в том, чтобы выдвинуть эти формы красоты на передний план, точно так же, как сыграло ее физическое ограничение структурной устойчивости (нам нужны колонны, чтобы поддерживать вес потолков, и арки с куполами, чтобы распределять напряжение). Изображения человеческих лиц, тел, эмоций, пейзажей, исторических сцен и тому подобного, когда они разрешены, становятся темами произведений искусства гораздо чаще, чем эти строгие формы красоты.

Мир, в его фундаментальном устройстве, не воплощает *все* формы красоты, причем он не воплощает как раз те формы, которые людям без специального образования или очень необычного вкуса кажутся самыми привлекательными. Но мир в его фундаментальном устройстве воплощает *некоторые* формы красоты, которые высоко ценились сами по себе и интуитивно связывались с божественным.

## Квантовая красота III: Красота в основе природы

Наша медитация над квантовой реальностью уже показала, что мир вещества, с которым мы сталкиваемся каждый день, будучи правильно понят, воплощает концепции необычайной красоты. Действительно, обычное вещество строится из атомов, которые являются в полном и точном смысле крошечными музыкальными инструментами. В их взаимодействии со светом претворяется в жизнь математическая Музыка Сфер, которая превосходит чаяния Пифагора, Платона и Кеплера. В молекулах и веществах упорядоченной структуры эти атомные инструменты играют вместе, подобно гармоничным ансамблям и синхронизированным оркестрам.

Найдя такие сокровища понимания, мы вдохновлены, чтобы копнуть еще глубже, уверенные в том, что еще не исчерпали эту жилу. Наши новые озарения дают удовлетворительный, но все же только *частичный* ответ на наш большой Вопрос. Они влекут нас дальше, так как наши ответы рождают новые вопросы, такие как:

- *Что* такое атомные ядра?
- *Зачем* существуют электроны?
- *Зачем* существуют фотоны?

В двух последних главах мы обсудим эти вопросы и другие, к которым они нас ведут. Наши исследования приведут нас к границам современного понимания, а дальше нам придется сделать несколько больших шагов за их пределы. Мы откроем новые понятия и факты, которые основываются на наших предыдущих темах, но также и выходят за их рамки. По мере приближения к сути вопроса мы откроем новые виды красоты и получим представление о том, как они могли бы прийти к могучему единому целому. Мы в прямом смысле откроем, как *в действительности* красив наш мир, а затем – каким еще более красивым он *мог бы быть*.

Эта глава посвящена группе идей, которые мы используем в настоящее время для описания четырех основных взаимодействий Природы. Два из этих взаимодействий, гравитационное и электромагнитное, уже сыграли значительную роль в нашей медитации. Два других, так называемые сильное и слабое взаимодействия, были открыты только

в начале XX в., когда физика примирилась с атомными ядрами.

Атомные ядра очень малы, и их трудно изучать. Их понимание стало длинным и тяжелым поиском, который был главным в фундаментальной физике большую часть XX в. и продолжает оставаться таковым. На какое-то время все стало очень сложно и запутано, но в конце концов Природа явила себя! Сегодня у нас есть теории сильного и слабого взаимодействий, которые достойны занять место рядом с ньютоновской (и эйнштейновской) теорией гравитации и электродинамикой Максвелла.

Как мы увидим в этой главе, понятия и уравнения, которые нам нужны для описания сильного и слабого взаимодействий, являются естественными и красивыми усовершенствованиями понятий и уравнений, которые появляются при описании гравитации и электромагнетизма. И наоборот, наше понимание сильного и слабого взаимодействий дает нам возможность по-новому посмотреть на более старые теории, заостряя внимание на общей для них для всех сути. Эта общая суть намекает на лежащее в основе более глубокое единство. В следующей главе мы увидим, насколько это объединение кажется созревшим для осуществления.

## Приближение к основам

Господствующие теории сильного, слабого, электромагнитного и гравитационного взаимодействий часто собирают вместе и называют Стандартной моделью. Как я уже упоминал во введении, эта обыденная фраза несет в себе слишком много скромности. Во-первых, «Стандартная модель» имеет привкус здравого смысла с сильными коннотациями зашоренного мышления и недостатка воображения. Во-вторых, «Стандартная модель» звучит почти как «эмпирическое правило», наводя на мысль о какой-то сырой, наспех собранной конструкции. Ни один из этих привкусов и намеков не должен быть связан с одним из величайших достижений – я бы даже сказал, *самым* величайшим достижением – человеческой мысли и усилий. Поэтому я называю ее Главной теорией.

Главная теория выполняет план Ньютона по Анализу и Синтезу. В ней мы формулируем основные законы в виде точных утверждений, касающихся свойств и взаимодействий немногих стандартных блоков, и выводим поведение более крупных тел из этих основ. Мы приходим к материи, как мы ее знаем, во всем ее богатстве, от нескольких ингредиентов, чьи свойства и взаимодействия описаны нами точно и полностью.

Главная теория предоставляет надежный фундамент в виде физических законов для всех приложений физики в химии, биологии, материаловедении и инженерном деле вообще, в астрофизике и основных аспектах космологии. Ее основы были проверены с точностью много большей, чем нужна для этих приложений, и при более экстремальных условиях.

Главная теория действительно, как мы увидим, воплощает красивые идеи. Но эти идеи необычны и в то же время глубоко спрятаны. Необходимо некоторое развитие воображения и усердное терпение, чтобы постичь их красоту.

Проблема достижения подлинного понимания, в противоположность грубому пониманию и/или принятию желаемого за действительное, существовала всегда. Одна из немногих историй о Евклиде – скорее всего, недостоверная – рассказывает о том, как он ответил своему покровителю царю Птолемею I, когда тот спросил, есть ли более простой подход к геометрии, чем его *Начала*. Евклид якобы ответил:

Ваше величество, нет царского пути к геометрии.

Несмотря на это, я надеюсь, что мне удалось показать: в геометрии есть красивые вещи, которые *можно* увидеть даже мельком, с помощью воображения и интуиции, без длительного изучения.

Похожим образом здесь я представляю вам изображения и объяснения, которые позволят вам бегло взглянуть на некоторые красивые аспекты Главной теории. Это наиболее центральные ее аспекты, что отнюдь не случайно!

Эксперименты, которые исторически служили становлению идей Главной теории, собрали воедино догадки, полученные в результате наблюдения за поведением большого и сбивающего с толку набора нестабильных частиц, открытых главным образом в экспериментах на ускорителях частиц высоких энергий. При обычных способах изложения Главной теории возникает множество сложностей из-за ее внешних проявлений, воплощенных в целом мире «элементарных частиц», которые оказываются не такими уж элементарными. При такой замысловатости можно не понять лежащие в ее основе представления. К счастью, основные идеи Главной теории проще, чем та экспериментальная база, что позволила их сформулировать. Конечно, важно, что эти экспериментальные факты существуют. Но для нашей медитации будет лучше, если мы в первую очередь сфокусируемся на идеях, а не на их доказательстве.

После этих общих положений позвольте мне описать содержание этой главы. Для облегчения усвоения оно подается в виде четырех блюд.

В первой части мы рассмотрим с помощью образов и метафор то, что я считаю духом Главной теории. Центральные понятия *пространства свойств* и *локальной симметрии* очень хорошо подходят на эту роль. Кстати сказать, это красивые понятия.

После этого на уровне идеалов Платона наша работа по существу будет завершена. Остальные части добавят те виды связей, которых требует наш Вопрос, т. е.

***Идеальное ↔ Реальное.***

Во второй части мы довольно подробно обсудим сильное взаимодействие, а в третьей части – слабое взаимодействие, но более выборочно. Полное описание, в особенности для слабого взаимодействия, содержит множество сложностей, которых мы едва коснемся.

(В современном состоянии понимания, честно говоря, они не выглядят очень красивыми!) В четвертой части я очень кратко представлю весь состав персонажей, а затем подведу итог. К этому моменту у нас будет ясное представление одновременно о красоте Главной теории и об оставшихся эстетических недостатках, которое подготовит сцену для приключений последней главы.

## Часть 1. Дух главной теории

### Пространства свойств

Как мы уже замечали до этого, люди являются в чрезвычайной степени визуальными существами. Большая часть нашего мозга занимается обработкой зрительной информации, и мы справляемся с этим очень хорошо. Мы – от природы одаренные геометры, приспособленные к тому, чтобы организовать наше зрительное восприятие на языке объектов, движущихся в пространстве.

Поэтому хотя и можно обсуждать свойства частиц и взаимодействий только в терминах чисел и алгебры, не пытаясь выразить понятия геометрически, но с человеческой точки зрения заманчиво привлечь сюда пространственное воображение и геометрию. Это позволяет нам перенаправить усилия самых мощных модулей нашего мозга и легко играть понятиями. Другими словами – обнаруживать красоту этих понятий.

Основные уравнения Главной теории и их расширения, которые мы обсудим в следующей главе, хорошо подходят для пространственного представления. Мы должны быть готовы, однако быть гибкими и сделать несколько корректировок в наших повседневных представлениях о пространственной геометрии. Главная новая идея – это идея *пространства свойств*.

Мольеровский господин Журден с большим удовольствием узнал от своего учителя философии, что он, оказывается, говорит прозой:

**Г-н Журден.** Как?! Когда я говорю: «Николь, принеси мне туфли и подай ночной колпак», – это проза?

**Учитель философии.** Да, сударь.

**Г-н Журден.** Скажите на милость! Сорок с лишком лет говорю прозой – и невдомек!<sup>[67]</sup>

Точно так же вы воспринимали дополнительные измерения, поля и пространства свойств<sup>[68]</sup> ежедневно в течение многих лет и очень вероятно – не зная об этом. Всегда, когда вы смотрите на цветную фотографию, ваш мозг осмысливает трехмерное пространство (цветовых) свойств помимо обычного пространства. Когда вы смотрите цветной фильм или телевизионную программу или взаимодействуете с экраном

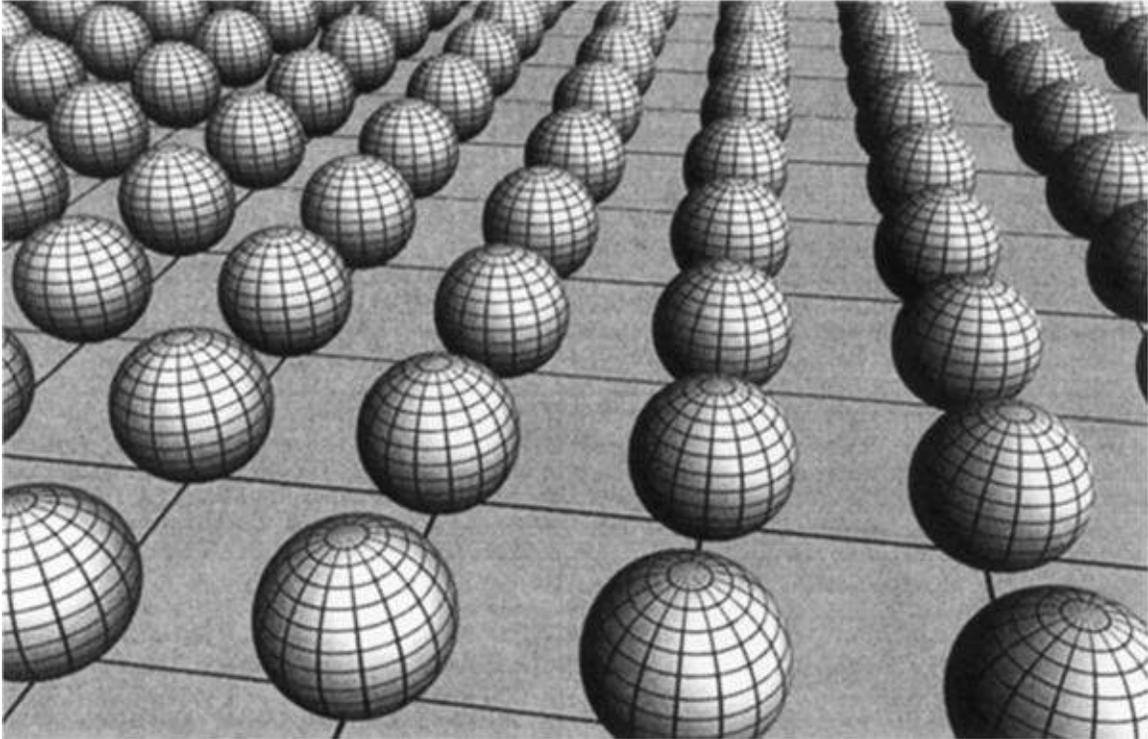
компьютера, вы обрабатываете трехмерное пространство свойств, определенное над пространством-временем.

Позвольте мне объяснить это смелое (и тем не менее очевидно верное) заявление.

Для определенности рассмотрим пример с экраном компьютера. Каким образом мы можем представить информацию, которую он нам показывает? Или в практическом смысле: если мы программируем компьютер, как мы говорим компьютеру, что он должен сделать, чтобы оживить наш экран?

Мы можем адресовать различные элементы картинки, или пиксели, через их горизонтальное и вертикальное положение. Для этого необходимо два числа  $x$ ,  $y$ . Для каждого пикселя в соответствии с общей теорией восприятия цвета мы должны задать (как учил нас Максвелл!) интенсивности трех исходных цветов. Эти исходные цвета обычно выбирают в виде некоторых разновидностей красного, зеленого и синего, и их интенсивности обозначаются  $R$ ,  $G$ ,  $B$ . Поэтому, чтобы сказать компьютеру, что именно он должен выдать на экран в данный момент времени  $t$  в любой точке экрана, мы должны указать шесть чисел:  $t$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $R$ ,  $G$ ,  $B$ . Два из них ( $x$ ,  $y$ ) задают пространственное положение, как мы уже сказали, а три числа ( $t$ ,  $x$ ,  $y$ ) задают положение в пространстве-времени. Оставшиеся три числа описывают цвет. Если рассматривать их просто как числа, они очень похожи на три первых числа! И поэтому логично (и, как оказывается, очень плодотворно) объявить, что они определяют положение в некотором новом пространстве, в *пространстве свойств*, которое наложено на пространство-время.

Вот два рисунка – абстрактный и материальный соответственно, – которые иллюстрируют понятие пространства свойств (илл. 32 и вклейки II и JJ). На первом рисунке мы изображаем простое пространство свойств геометрически. К каждой точке обычного пространства прикреплено дополнительное пространство. Здесь абстрактное дополнительное пространство имеет форму сферы. Наше пространство цветовых свойств, описанное выше, наиболее естественным образом можно представить трехмерным кубом, поскольку возможные интенсивности, будучи долями максимального значения, лежат в пределах от нуля до единицы. Оно показано в верхней части вклеек II и JJ. На нижней их части представлено пространство, с которым вы сталкиваетесь, когда смотрите на экран компьютера (как мы только что обсудили). Как можно видеть, это точное красочное воплощение илл. 32!



Илл. 32. Концепция дополнительных измерений, изображенная абстрактно: над каждой точкой обычного пространства существует дополнительное пространство, заключающее в себе «дополнительные измерения». Здесь дополнительные измерения представлены небольшими сферами

Цвет, приписываемый пикселям, описывается положением в трехмерном  $(R, G, B)$  пространстве свойств, как описано ранее. На вклейке КК мы развиваем тему цветового пространства цвета и демонстрируем некоторые аспекты его гибкости и плодовитости. Обычный фотоснимок изображен в нижней части. Мы можем разбить на слои тот же исходный материал с помощью проекции пространства свойств на подпространство с более низкой размерностью. На левом верхнем рисунке мы проецируем только на зеленый цвет  $(G)$ , таким образом сводя пространство свойств к одному измерению. На правом верхнем рисунке мы проецируем на зеленый и красный, пренебрегая синим, тем самым сводя пространство цветовых свойств к двум измерениям.

Существуют странные параллели между этими пространствами свойств различных размерностей и основами наших Главных теорий. Как раз на этот факт, который я сейчас поясню, намекают подписи на вклейке – «электромагнитное», «слабое» и «сильное».

Электродинамика, говоря языком квантовой теории, описывает, как фотоны реагируют на распределение электрического заряда в пространстве и времени. Другими словами, фотоны чувствуют положения и скорости заряженных частиц и реагируют на них. Таким образом, фотоны «видят» в каждой точке пространства-времени единственное число, показывающее количество электрического заряда в этой точке, и «видят» его в одномерном пространстве свойств.

Как мы обсудим вскоре в подробностях, сильное взаимодействие – это что-то вроде «электродинамики на стероидах<sup>[69]</sup>». Уравнения нашей теории сильного взаимодействия, квантовой хромодинамики (КХД), похожи на уравнения Максвелла для электродинамики, но основаны на трехмерном пространстве свойств сильного взаимодействия. Также в КХД у нас не просто один фотон, а восемь фотоподобных частиц, глюонов, которые различными способами откликаются на то, что происходит в пространстве свойств сильного взаимодействия. По невероятному совпадению *свойства*, на которые реагируют глюоны, также были названы *цветами*, хотя, конечно, они не имеют никакого отношения к цвету в обычном смысле. Сильные цвета скорее похожи на электрический заряд. Но мы немного забегаем вперед...

## **Инь и ян, четыре раза подряд**

Астрофизик Джон Уилер был мастер изобретать запоминающиеся фразы для описания физических идей. Выражение «черная дыра» – незабвенный уилеризм, так же как и «масса без массы», которым мы воспользуемся позже. У Уилера был поэтический способ описания сути теории гравитации Эйнштейна, общей теории относительности, который мы можем взять за основу:

Материя говорит пространству-времени, как ему искривляться.

Пространство-время говорит материи, как ей двигаться.

Для наших дальнейших целей будет важно разъяснить – а потом исправить! – мысль о том, что пространство-время говорит материи, как ей двигаться. Сначала мы немного разъясним, почему «говорит», а потом уточним смысл «материи» и «пространства-времени».

Как именно пространство-время указывает материи двигаться? Его указания, согласно общей теории относительности, очень просты:

*Продолжай двигаться как можно более прямо!*

На искривленной поверхности есть понятие наиболее прямых возможных путей, или *геодезических линий*. Геодезические линии, как и прямые в обычной евклидовой геометрии, имеют такое свойство: нет более короткого пути между двумя принадлежащими одной линии точками. Эти же математические понятия (кривизна и геодезические линии) применимы не только к поверхностям – которые, в конце концов, можно по праву считать самостоятельными двумерными пространствами, – но и к пространству в целом, и даже к пространству-времени. И гениальность Эйнштейна в общей теории относительности заключалась в том, что он придал гравитации ту форму, которую поэтизировал Уилер: гравитационное «падение» или «обращение» – всего лишь попытка материи двигаться как можно более прямо (перемещаться вдоль геодезических линий) в искривленном пространстве-времени.

Описание Уилера потрясающе выразительно, но оно слишком упрощенное. В конце концов, гравитация – не единственное взаимодействие в природе! Чтобы сделать поэзию точной и полностью раскрыть ее возможности, нам необходимо внести некоторые уточнения.

### **Геометрическая мантра**

В стихотворной строфе Уилера слово «материя» немного *слишком* поэтично. Материя может иметь несколько свойств (например, электрический заряд), но кривизна пространства-времени реагирует только на полную плотность энергии и импульса. Поэтому вместо этого мы должны сказать:

Энергия-импульс говорит пространству-времени, как ему искривляться.

Более того, помимо гравитации и другие силы влияют на то, как движется материя. Эти силы вызовут отклонения от наиболее прямых (геодезических) путей. Следовательно, мы должны сказать:

Пространство-время говорит энергии-импульсу, какое направление прямое (в пространстве-времени).

Итак, соединив все вместе:

Энергия-импульс говорит пространству-времени, как ему искривляться.

Пространство-время говорит энергии-импульсу, какое направление прямое (в пространстве – времени).

А теперь очередь Главной теории электромагнетизма:

Электрический заряд говорит электромагнитному пространству свойств, как ему искривляться.

Электромагнитное пространство свойств говорит электрическому заряду, какое направление прямое (в электромагнитном пространстве свойств).

И для слабого взаимодействия:

Слабый заряд говорит пространству свойств слабого взаимодействия, как ему искривляться.

Пространство свойств слабого взаимодействия говорит слабому заряду, какое направление прямое (в пространстве свойств слабого взаимодействия).

И для сильного взаимодействия:

Сильный заряд говорит пространству свойств сильного взаимодействия, как ему искривляться.

Пространство свойств сильного взаимодействия говорит сильному заряду, какое направление прямое (в пространстве свойств сильного взаимодействия).

В полной Главной теории, включающей все четыре взаимодействия, материя имеет четыре вида свойств: энергию-импульс, электрический заряд, слабый заряд и сильный заряд. Частицы материи распространяются в более сложном, чем учитывал Уилер, пространстве, которое, помимо обычного пространства-времени, включает пространства свойств электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий. Но, согласно Главной теории, материя следует тому же принципу инь, адаптированному к такому более сложному окружению:

Продолжай двигаться так прямо, как только можешь!

## **Инь-ян**

Удивительное в Главной теории заключается в том, что все четыре взаимодействия похожи на узнаваемые вариации на одну и ту же тему. Это не кажется мне таким уж странным, и, конечно, красиво видеть в двойственности

*материя || пространство – время*

...пример китайского дуализма

*инь || ян*

Инь – это принцип податливости, связанный с землей и водой (материей). Он «делает то, что делается само по себе» («Оклахома!»<sup>[70]</sup>) или «следует за силой» («Звездные войны»), т. е. следует пути наименьшего сопротивления – геодезической линии.

Ян – побуждающий принцип, связанный с небом (пространство-время), светом (электромагнитным флюидом – см. ниже!) или другими движущими силами.

Сердце Главной теории с этой точки зрения – это четырежды инь-ян.

Очень специфическая особенность этой книги состоит в том, что в ней есть оригинальное изображение знака тайцзи (инь-ян), предоставленное современным мастером традиционных китайских искусств по имени Хэ Шуйфа. Оно является фронтисписом к этой книге, а также представлено на вклейке А.

У тайцзи было несколько переводов, из которых «высшая противоположность», возможно, самый красноречивый. Его символ содержит два контрастирующих элемента – инь (темный) и ян (светлый), и его часто называют символом инь-ян. Заметим, что два этих элемента составляют неделимое целое и что каждый из них содержит другой и содержится в другом.

Наши самые глубокие описания физической реальности в квантовой теории и в четырех Главных теориях взаимодействий (гравитационного, электромагнитного, сильного и слабого) привносят понятия, наводящие на мысль об инь и ян. Нильс Бор, выдающийся основатель квантовой

теории, видел значительные аналогии между его понятием дополнительности (комплементарности) и неделимом дуализме инь-ян. Он разработал для себя герб, в котором инь-ян играет главную роль (илл. 42). Наши Главные теории строятся на взаимодействии подобных свету заполняющих пространство флюидов (ян) и вещества (инь), которым они одновременно управляют и на которое реагируют.

## Мантра потока

Карта мира не обязательно должна быть наклеена на глобус. Мы можем изобразить геометрию искривленной поверхности, такой как земная поверхность, проецируя данные о расстояниях на плоскую сетку.

В общем случае мы также можем представить геометрию искривленного пространства, или искривленного пространства-времени, отображая информацию о расстояниях на плоскую сетку. В каждой точке этой сетки и в каждом направлении, исходящем из этой точки, мы будем иметь число, которое скажет нам, как далеко мы можем попасть, перемещаясь на один шаг в этом направлении. Тем самым мы представим геометрию нашего пространства, приписав несколько чисел каждой точке. Это построение определяет *метрическое поле* (или просто *метрику*), как это называют в математике.

В физике, рассматривая геометрию пространства-времени, мы можем говорить в духе Фарадея и Максвелла о *метрическом флюиде*. Именно это понятие в общей теории относительности Эйнштейна заменяет гравитационные силы теории Ньютона.

Термин «флюид» восходит к понятию жидкости, и метрический флюид, во многом как и электромагнитный флюид в теории Максвелла, начинает жить своей жизнью. Например, он поддерживает самодостаточные возмущения – *гравитационные волны*, аналогичные электромагнитным волнам, с помощью которых Максвелл объяснил свет, а Герц создал радио.

Используя эти кодирующие геометрию флюиды, мы получаем мантры потока:

Энергия-импульс говорит метрическому флюиду, как ему течь.

Метрический флюид говорит энергии-импульсу, как ей течь.

Электрический заряд говорит электромагнитному флюиду, как ему течь.

Электромагнитный флюид говорит электрическому заряду, как ему течь.

Слабый заряд говорит слабому флюиду, как ему течь.

Слабый флюид говорит слабому заряду, как ему течь.

Сильный заряд говорит сильному флюиду, как ему течь.

Сильный флюид говорит сильному заряду, как ему течь.

В определенном смысле мантры потока – это всего лишь парафразы геометрических мантр, но они приносят новые привлекательные перспективы:

- В такой формулировке инь (материя) и ян (сила) оказываются в равном положении: каждая из них дает указания другой. Это наводит на мысль, что их видимая двойственность может превратиться в более глубокое единство. Мы увидим в следующей главе, как эта нелепая идея может осуществиться с помощью *суперсимметрии*.

- Мантра потока для электромагнетизма гораздо ближе по духу оригинальным идеям Фарадея и Максвелла, чем наша предыдущая «геометрическая» мантра. Геометрическая мантра, напротив, ближе по духу тем идеям, которые привели Эйнштейна к его теории гравитации, т. е. к общей теории относительности. Эта гармония идей – великий дар. Она красива сама по себе. И, опять предвещая нашу следующую главу, она наводит на мысль о более глубоком единстве между взаимодействиями.

- По существу, как только геометрия – пространства-времени или пространств свойств – записывается в виде математического флюида, мы легко можем представить себе, что этот флюид течет и начинает жить своей жизнью.

## **Воплощения локальной симметрии**

Теперь мы расшифровали и даже улучшили вторую строчку стихотворной строфы Уилера. Другими словами, мы обсудили, как силы направляют материю или как ян направляет инь. Чтобы завершить этот цикл идей, мы должны обсудить законы, которые управляют влиянием в противоположном направлении.

Точнее, наша задача состоит в следующем: как нам получить уравнения для кривизны пространства-времени и пространств свойств? Наш главный направляющий принцип, принцип *локальной симметрии*,

настолько же красив, насколько глубок. Мы ввели эту идею ранее, в главе «Симметрия I», и теперь коротко повторим ее и после этого будем делать дальнейшие построения на ее основе.

Вспомним, что, разработав в 1905 г. специальную теорию относительности, Эйнштейн вскоре осознал, что ее невозможно совместить с теорией гравитации Ньютона. Он бился над этой проблемой целых десять лет, назвав их «годами тревожного поиска во тьме».

Эйнштейн достиг просветления, обнаружив подходящие уравнения для кривизны пространства-времени, и тем самым завершил новую теорию гравитации, общую теорию относительности. Он открыл их, когда сформулировал следующее требование: уравнения должны воплощать то, что он назвал *общей ковариантностью*, которая является вариантом локальной симметрии для пространства – времени.

Чтобы глубже понять локальную симметрию Главной теории, давайте начнем с того, что вспомним основную идею симметрии уравнений, которую мы ввели ранее в наших дискуссиях вокруг уравнений Максвелла. Мы говорим, что уравнение (или система уравнений) имеет симметрию, если существуют такие изменения, которые можно произвести над входящими в уравнение величинами, не изменив его содержания. Требование симметрии предоставляет нам способ нахождения особенных уравнений, поскольку большинство уравнений, выбранных случайно, *не* симметричны. Также, если говорить субъективно, это способ нахождения особенно *красивых* уравнений.

(Некоторые считают, что использование слова «симметрия» для описания свойства уравнения режет слух, поскольку оно кажется довольно далеким от обыденного значения этого слова. Если у вас есть такое затруднение, возможно, вам стоит иметь в виду слово «инвариантность» как дополнение или замену. После некоторого обдумывания я решил придерживаться слова «симметрия», так как оно глубоко укоренилось в литературе и это не осталось без отклика. Как бы вы это ни называли, главной идеей остается Изменение без изменений.)

Общепринятая, т. е. нелокальная, или (слово, которое буду использовать я) *глобальная*, симметрия физических законов обычно предполагает изменение Вселенной в целом, жестко и глобально. Например, мы постулируем, что содержание законов физики не изменится, если мы изменим положение всего, что в них встречается, на одну и ту же величину – скажем, сдвинем все на метр в одном и том же направлении, везде (и во все моменты времени). Если хорошо подумать об этом, вы поймете, что это точный (хотя возможно странный) способ сказать,

что законы не знают предпочтительного положения в пространстве или, проще говоря, что законы везде принимают одну и ту же форму. Но, если мы поменяем положение некоторых предметов на бóльшую величину, чем положение других, мы изменим их взаимное расположение. Это, несомненно, поменяет содержание законов о силах – например, закон Ньютона для гравитации и похожий на него закон Кулона для электрических сил, – которые зависят от расстояний между объектами.

С локальной симметрией появляются преобразования, меняющиеся в пространстве и времени. Именно потому, что мы можем выбирать преобразования *локально*, не заботясь о Вселенной в целом, мы используем слово «локальная» при описании такой возможности. Рассмотрим снова вид трансформации, который мы только что обсудили в предыдущем абзаце: простой сдвиг всех объектов. На первый взгляд, как мы видели, симметрия законов физики может иметь место только в том случае, если мы предполагаем перемещение всего на одинаковое расстояние в одном и том же направлении. Если мы изменим расстояния между объектами, мы изменим законы их взаимодействия! Однако – а в этом как раз и заключается йога локальной симметрии – если у нас имеется метрический флюид *и мы внесем нужные поправки в метрический флюид одновременно с перемещениями*, то мы сможем сохранить расстояния между объектами и, следовательно, законы их взаимодействия неизменными!

Анаморфное искусство, как показано на вклейке ЕЕ, служит прекрасной метафорой – или, лучше сказать, моделью – для локальной симметрии. Как мы обсуждали ранее, начертательная/проективная геометрия – это искусство/наука об Изменениях без изменений, с которым (-ой) сталкиваешься, смотря на один и тот же объект (нет изменения) с разных точек зрения (изменения). Мы признаем, что многие различные картины могут изображать один и тот же предмет. Но мы можем получить более сложные образы, используя все тот же изначальный объект, если допустим присутствие искажающих сред – кривых зеркал, скажем, или линз и призм... или вообще некоей структуры, которая меняется в пространстве от места к месту и искривляет световые лучи. *Допуская присутствие таких сред, мы начинаем считать, что гораздо более широкий спектр изображений представляет один и тот же объект.* Локальная симметрия – это та же самая идея, только примененная к уравнениям вместо предметов.

Условие локальной симметрии накладывает жесткие ограничения на наши уравнения. Мы требуем, чтобы версии этих уравнений,

выглядящие очень искаженными, имели такие же следствия, как и оригиналы. Чтобы это было возможно, мы должны сделать предположение о том, что пространство-время (включая и любые пространства свойств, наложенные на него) заполнено соответствующими флюидами. В зависимости от того, как вы хотите интерпретировать эту ситуацию, вы можете сказать, что флюиды ответственны за видимые искажения или – альтернативно – компенсируют их. (Они *ответственны* за видимые искажения, если вы трактуете все от объекта к восприятию; они *компенсируют* видимые искажения, если вы трактуете все от восприятия к объекту!) В любом случае нам нужны эти заполняющие пространство-время флюиды, если мы хотим иметь локальную симметрию. И если мы хотим, чтобы они были успешными универсальными компенсаторами, флюиды должны обладать весьма особенными свойствами. Другими словами, они должны будут подчиняться очень специальным уравнениям.

Именно требование локальной версии специальной теории относительности позволило Эйнштейну получить уравнения для метрического поля, являющиеся основой общей теории относительности! И именно требование локальных версий вращений в пространствах свойств позволило Чжэньнину Янгу и Роберту Миллсу найти уравнения, носящие их имена и управляющие слабым и сильным флюидами. Янг и Миллс основывались на работе Германа Вейля, который показал, что уравнения *Максвелла* для электромагнитного флюида можно вывести таким образом.

Когда мы переходим от флюидов к соответствующим им субатомным частицам, или квантам, мы осознаем, что существование гравитонов, фотонов, глюонов и цветных глюонов – квантов метрического, электромагнитного, сильного и слабого флюидов соответственно – и их свойств является *неизбежным и исключительным следствием различных локальных симметрий*. Обычный жаргон для этих локальных симметрий в физической литературе таков:

- общая ковариантность – для локальной версии специальной теории относительности;
- калибровочная симметрия  $U(1)$  – для локальной версии вращения в пространстве свойств электрического заряда;
- калибровочная симметрия  $SU(2)$  – для локальной версии вращения в пространстве свойств слабого заряда;
- калибровочная симметрия  $SU(3)$  – для локальной версии вращения в пространстве свойств сильного заряда.

Историческое происхождение термина «калибровочная симметрия» довольно интересно. Оно обсуждается в примечаниях в конце книги.

Мы можем подвести итог нашему обсуждению справедливым образом так, чтобы это запомнилось:

Гравитоны – это воплощения общей ковариантности.

Фотоны – это воплощения калибровочной симметрии 1.0.

Виконы – это воплощения калибровочной симметрии 2.0.

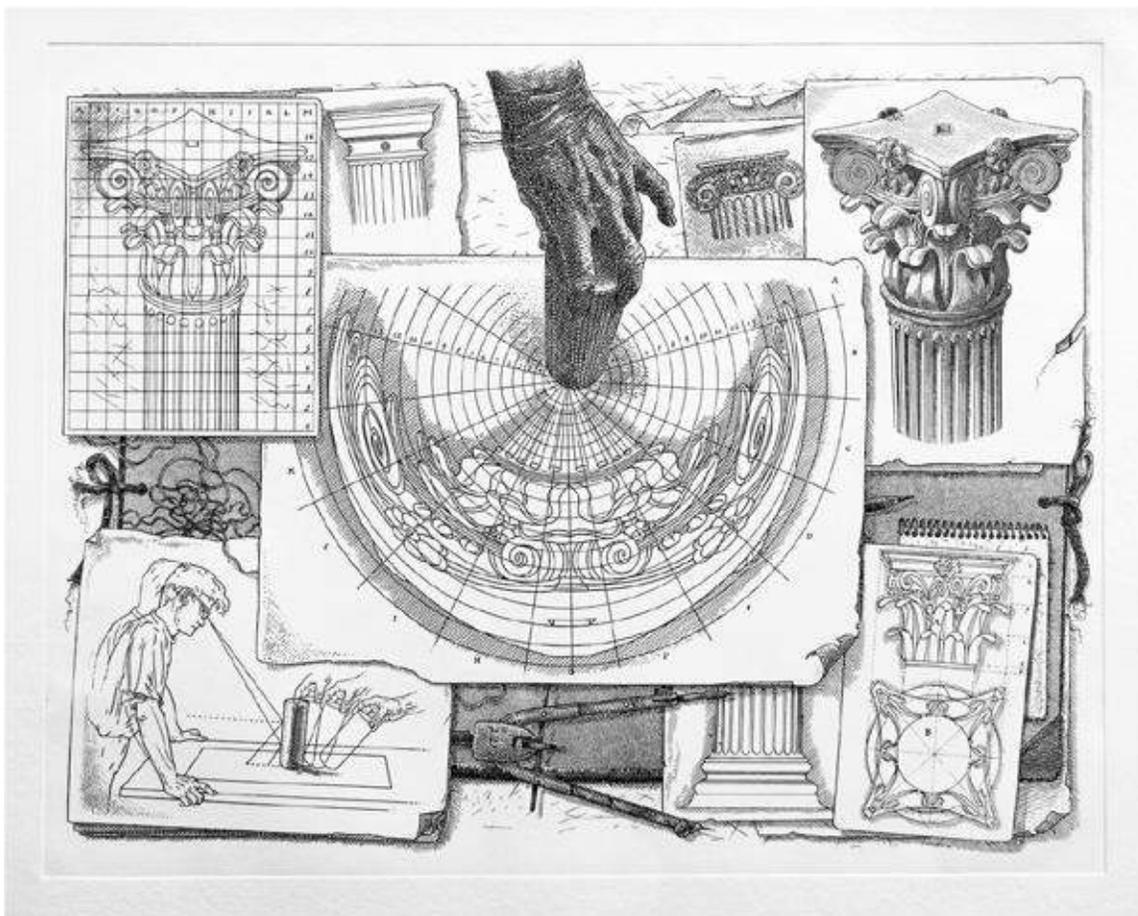
Цветные глюоны – это воплощения калибровочной симметрии 3.0.

Давайте отпразднуем эту выдающуюся плодотворность дуализма

***Идеальное ↔ Реальное***

подходящим рисунком (вклейка LL). Когда объекты, содержащие симметричные детали, фотографируют с помощью объектива «рыбий глаз», симметрия различных деталей отображается по-разному, в зависимости от пространственного положения. Такие изображения могут передавать дух локальной симметрии в подходящей, странно красивой визуальной форме.

И в заключение (с помощью илл. 33) давайте переключим наше внимание с результатов теорий с локальной симметрией на процесс их создания. Это трехступенчатый процесс. Мы должны выбрать объекты, которые мы хотим изобразить (материя), то, как мы разрешим им выглядеть (преобразования), и среды, которые будут обеспечивать эти преобразования (флюиды). Этот рисунок, показывающий процесс создания анаморфного искусства, является уточненной версией вклеек К и L. Наш современный Мастер – рачительный ремесленник, но теперь мы знаем, что его мысли более изобретательны, его инструменты более разнообразны – и его подход более игрив, – чем у Мастера, которого представлял себе Блейк.



Илл. 33. Процесс создания анаморфного искусства

## Где определяет что

Когда частица движется в пространстве свойств, на обычном языке мы бы сказали, что она превращается в частицу другого вида. Скажем, «красный» кварк – т. е. кварк с единицей красного заряда – может превратиться в «синий» кварк. Но теперь у нас есть другой, более глубокий способ рассматривать эту ситуацию. С этой новой точки зрения мы видим, что эти две частицы – красный кварк и синий кварк – на самом деле являются одной и той же сущностью, занимающей разные положения! Таким образом, *что* это кодируется тем, *где* оно находится.

Поскольку цветные глюоны реагируют именно на цветовой заряд, то они решают, что им делать, «смотря», где расположены частицы – или, в более общей формулировке, как выглядит распределение волновых функций или полей в пространстве цветовых свойств. Для этих глюонов важно положение и еще раз положение – положение в этом пространстве

свойств, равно как и положение в пространстве-времени. И наоборот, когда мы наблюдаем за поведением цветных глюонов, мы получаем информацию из пространства цветового заряда. Пространства свойств, сначала введенные в качестве подспорья воображению, превращаются тем самым в осязаемые элементы действительности.

## Часть 2. Сильное взаимодействие более конкретно

### Открывая атомные ядра

Основное открытие, которое привело к современным успешным атомным моделям, было сделано Хансом Гейгером и Эрнестом Марсденом в 1911 г. Работая в лаборатории Резерфорда и реализуя его идею, Гейгер и Марсден изучали отклонение тонким слоем золотой фольги альфа-частиц, испускаемых при радиоактивном распаде радия. Они наблюдали случаи сильного отклонения. Резерфорд рассказывал об этом эпизоде так:

Это было самым потрясающим событием из всех, что случались со мной в жизни. Это было почти так же невероятно, как если бы вы выстрелили 15-дюймовым [артиллерийским] снарядом в кусочек папиросной бумаги, а он бы отлетел назад и попал в вас. Подумав, я понял, что такое обратное рассеяние должно быть результатом единственного столкновения, и когда я произвел расчеты, я увидел, что можно было получить что-либо близкое к такому порядку величины, если только взять систему, в которой большая часть массы атома сосредоточена в мельчайшем ядре. И именно тогда у меня появилась идея атома с очень маленьким массивным центром, несущим заряд...

Резерфорд предложил определенную, удивительно простую модель, объяснявшую наблюдения. Он предположил, что в каждом атоме есть крошечное ядро, содержащее весь его положительный заряд и практически всю его массу. Это могло объяснить редкое, но мощное обратное рассеяние – ядро не хочет двигаться (потому что оно тяжелое) и оно способно оттолкнуть альфа-частицу (так как в нем сконцентрирован заряд). Резерфорд сделал это рабочей моделью и подтвердил ее, количественно объяснив рассеяния на большие углы. Остальная часть атома, согласно Резерфорду, состояла из гораздо более легких отрицательно заряженных электронов, каким-то образом распределенных по гораздо большему объему.

Это был эпохальный результат. Он показал, что понимание структуры атома можно удобно разделить на две задачи. Первая задача – то, что мы

сейчас называем атомной физикой, – это рассматривать тяжелое, положительно заряженное ядро как данность и после этого определять, как с ним связываются электроны. Мы обсудили эту область квантовой красоты до этого.

Вторая задача – то, что мы сейчас называем ядерной физикой, – это понять, из чего сделаны эти центры атомов и каким законам они подчиняются.

Быстро стало ясно, что одни лишь электрические силы не могут объяснить физику ядер. Действительно, чисто электрическая модель не могла решить проблему с концентрацией положительного заряда в ядре атома. Не будучи уравновешена другой, более мощной силой, сила электрического отталкивания должна была разорвать ядро на части. Гравитация? При таких крошечных массах ей можно полностью пренебречь. За это должны были отвечать новые силы, неизвестные классической физике.

Ядерная физика поставила две задачи: экзистенциальную и динамическую. Экзистенциальная заключается в том, чтобы определить ингредиенты ядер, а динамическая – в том, чтобы понять силы, с которыми эти составляющие действуют друг на друга. С переписью ингредиентов расправились через несколько лет, и это было довольно просто. Один компонент был более или менее очевиден. Ядро водорода стабильно, (по всей видимости) неделимо и имеет единичный (положительный) электрический заряд. Оно самое легкое из всех ядер, и другие легкие ядра имеют массы, близкие к целому числу его масс. Следовательно, этот *протон* – названный так Резерфордом – один из ингредиентов.

Второй компонент был открыт Джеймсом Чедвиком в 1932 г. Нейтрон – это электрически нейтральная частица лишь чуть-чуть тяжелее протона. Его открытие дало нам простое, но полезное представление о том, что такое атомные ядра: они являются совокупностью протонов и нейтронов, связанных друг с другом. С таким представлением многие наблюдаемые факты встали на свои места. Например, ядра разных химических элементов различаются только числом протонов, которые они содержат, поскольку это число определяет электрический заряд ядра, от которого зависит его взаимодействие с окружающими атомными электронами, последние же в свою очередь обуславливают его химию. Разное количество протонов в ядре дает атомы различных химических элементов. С нейтронами в качестве второго игрока мы решаем загадку изотопов. Атомы, содержащие изотопические ядра, имеют одинаковые химические свойства, но различаются по массе. Их ядра содержат одинаковое число

протонов, но разное число нейтронов. Таким образом, простая модель атомного ядра, состоящего из протонов и нейтронов, объясняла одновременно разнообразие химических элементов и существование изотопов.

Считалось, что следующим шагом будет выяснить, какие силы действуют между протонами и нейтронами и удерживают их вместе. Как мы уже говорили, нужны были новые силы, поскольку электромагнитное взаимодействие стремится разорвать ядра на части, а гравитационное столь слабо, что им можно пренебречь.

Однако эксперименты по исследованию ядерных сил вскоре пошли неожиданными путями. Практически все они следовали стратегии первоначального эксперимента Гейгера – Марсдена. Чтобы исследовать, скажем, взаимодействие между протонами, пучком протонов стреляли по другим протонам (по водородной мишени) и следили за тем, что из этого получается. Наблюдая отклонения на разные углы, можно попытаться сделать выводы об ответственной за это силе. Использование пучков с протонами различных энергий и с нейтронами, вращающимися в разных направлениях, улучшает анализ. Эксперименты такого типа вскоре показали, что силы, действующие между протонами и нейтронами, не подчиняются простому уравнению. Они зависят не только от расстояния, но и от скорости и спина, причем сложным образом.

Если смотреть глубже, эксперименты вскоре похоронили надежду – надежду нашего Вопроса – на то, что протоны и нейтроны являются простыми частицами и что какая-нибудь красивая «сила», в традиционном понимании этого слова, могла бы объяснить то, что на самом деле происходит при их взаимодействии. Потому что, когда протоны сталкивались с другими протонами, результатом обычно являлось не просто отклонение двух сталкивающихся частиц. Вместо этого появлялся целый поток частиц!

В сущности, эксперименты, направленные на открытие простой силы, вместо этого обнаружили новый и неожиданный мир частиц. Мезоны  $\rho$ ,  $\rho$ ,  $K$ ,  $\eta$ ,  $\omega$ ,  $K^*$ ,  $\phi$  и барионы  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ,  $\Xi$ ,  $\Delta$ ,  $\Omega$ ,  $\Sigma^*$ ,  $\Xi^*$ ,  $\Omega$  являются самыми легкими и самыми доступными из них. (Существуют десятки других.) Эти частицы, все без исключения, очень нестабильны и живут не больше микросекунды (а в большинстве случаев гораздо меньше). Выводы об их существовании и свойствах должны быть сделаны на основе изучения продуктов их распада в детекторах на ускорителях высоких энергий, таких как ускорители в Брукхейвенской национальной лаборатории, в Фермилабе и в CERN. Эти новые частицы все вместе называются *адронами*.

Так же как классификация бабочек или палеонтологическая история лошадей, состав адронного «зверинца» и характеристики его обитателей – массы, спины, времена жизни, варианты распадов – завораживают истинных ценителей. Однако, чтобы продвинуться в нашем поиске красоты к основам, мы должны перейти к более общим вопросам. Для дальнейшего использования позвольте мне кратко резюмировать два наиболее важных урока, которые можно извлечь из этого «зверинца».

*Адроны состоят из двух царств – барионов и мезонов*<sup>[71]</sup>. Протоны и нейтроны являются прототипом барионов. Все барионы обладают несколькими общими свойствами. Все они испытывают на малых дистанциях сильное взаимодействие в присутствии друг друга либо в присутствии мезонов, и (для экспертов) все они являются фермионами. Мезоны также обладают общими свойствами. Все они испытывают на малых дистанциях сильное взаимодействие в присутствии друг друга либо в присутствии барионов, и (для экспертов) все они являются бозонами.

*Протоны и нейтроны не являются ни простыми, ни фундаментальными.* Представить себе атомное ядро состоящим из протонов и нейтронов было полезным шагом, но эти частицы не являются простыми или фундаментальными – их взаимодействия сложны, и они являются лишь двумя членами гораздо более широкого семейства похожих частиц. Чтобы посмотреть на них с правильной перспективы и завершить анализ материи, нужен новый и более широкий взгляд.

## **Кварковая модель**

Кварковая модель была придумана Мюрреем Гелл-Манном и Джорджем Цвейгом и стала блестящей демонстрацией силы воображения и распознавания образов.

Согласно кварковой модели, барионы – это связанные состояния трех более фундаментальных сущностей – трех видов, или «ароматов», кварков: верхнего  $u$ , нижнего  $d$  и странного  $s$ . (Пока этого достаточно, и я отложу рассмотрение гораздо более тяжелых, крайне нестабильных кварков  $c$ ,  $b$ ,  $t$  на потом.)

Но как всего три аромата кварков –  $u$ ,  $d$ ,  $s$  – порождают сотни различных барионов? Дело в том, что некая заданная тройка кварков, скажем,  $u$ ,  $u$ ,  $d$ , может существовать во многих различных состояниях

движения, аналогичных дискретным боровским орбитам электронов в атомах или стационарным состояниям на илл. 26 в главе «Квантовая красота I». Эти дискретно различные состояния имеют различные энергии и, следовательно, – если применить формулу  $m = E/c^2$  – разные массы. Поэтому, с точки зрения экспериментатора, они кажутся разными частицами! Таким образом, мы обнаруживаем, что множество разных частиц отражает одну и ту же материальную структуру, лежащую в их основе и зафиксированную в различных состояниях внутреннего движения.

Сходным образом кварковая модель постулирует, что мезоны – это связанные состояния одного кварка и одного антикварка. Каждая пара кварк-антикварк, скажем, в различных состояниях движения образует множество различных мезонов.

Кварковая модель также дает правдоподобное объяснение сложности адронных сил. Даже если отдельные кварки взаимодействуют просто, но, когда связанные состояния из трех кварков или из кварка и антикварка встречаются друг с другом, существует большой простор для наводок и взаимоподавления. Примерно по тем же причинам обычная химия, основанная на взаимодействиях атомов, оказывается сложной и разнообразной, хотя силы между отдельными электронами, на которых она основана, чрезвычайно просты.

Кварковая модель была главным шагом в упорядочении адронного «зоопарка». Она предоставляет описание адронов, подобное по его объяснительной силе боровской модели атома. Но кварковая модель, как и модель Бора, имеет ограничения. Хотя она правильна по своему духу и исторически важна, кварковая модель является логически неполной и только полуматематической. Кроме того, она столкнулась с большой проблемой, что мы сейчас и обсудим.

Кварковая модель дала успешное *описательное* объяснение многих свойств протонов, нейтронов и родственных им адронов. Но она постулировала некоторые очень странные свойства для кварков. Возможно, самым странным из таких свойств является конфайнмент, шутивно изображенный на карикатуре на вклейке ММ – она взята из плаката, который ознаменовал мою Нобелевскую премию. Предполагается, что кварки являются строительными блоками протонов, но, несмотря на очень большие усилия, свободные частицы со свойствами кварка (такими как дробный заряд, равный  $2/3$  или  $-1/3$  электрического заряда протона) никогда не наблюдались. Таким образом, кварки в группах по три штуки могут образовывать протоны, в которых силы между ними оказываются умеренными. Но по каким-то причинам они не могут

высвободиться – кварки удерживаются вместе, находясь в состоянии конфайнмента.

Чтобы учесть это поведение, нам, похоже, нужны связи между кварками, похожие на пружину или резинку, которые тянут кварк тем сильнее, чем больше растягивается связывающая пружина или резинка при увеличении расстояния. Пружины и резинки, конечно, сами по себе являются сложными физическими объектами, поэтому недопустимо предполагать их наличие в фундаментальной теории. И если мы все же так делаем, возникает вопрос: из чего сделана эта пружина?

Физики привыкли, что фундаментальные силы становятся слабее с расстоянием, как это происходит с гравитационными и электромагнитными силами, и поэтому конфайнмент оказался большой проблемой. Многие физики так не смогли заставить себя отнестись к кваркам серьезно именно из-за этого.

## **Прорыв: квантовая хромодинамика**

Уравнения Максвелла для электродинамики, уравнения Ньютона (и затем Эйнштейна) для гравитации и уравнения Шрёдингера (и затем Дирака) для атомной физики установили высокие стандарты красоты, ясности и точности. Ни сложные уравнения (а в сущности – таблицы), описывающие ядерные силы, ни общие идеи кварковой модели даже близко не подошли к этим стандартам.

И все же красивые, ясные, точные уравнения для сильного взаимодействия существовали. Они пролежали без дела много лет, прежде чем мы смогли их использовать. Это уравнения, которые основываются на уравнениях Максвелла и воплощают те представления, которые мы набросали в первой части этой главы.

Почти 20 лет прошло между формулировкой этих уравнений Янгом и Миллсом и появлением квантовой хромодинамики как их воплощения в реальности. Эта история – ошеломляющий пример соотношения

*Идеальное → Реальное.*

В сфере сильного взаимодействия не может быть сомнений, что ответ на наш Вопрос

Воплощает ли мир красивые идеи?

прост:

Да, воплощает.

### «Максвелл на стероидах»

Квантовая хромодинамика (КХД) использует идеи и уравнения, которые являются грандиозным обобщением уравнений Максвелла для электромагнетизма, расширенным, чтобы включить еще больше симметрии. Мне нравится говорить, что КХД (QCD) выглядит как квантовая электродинамика (КЭД, QED) на стероидах.

В КЭД есть один вид заряда – электрический заряд. Он может быть положительным, как у протонов, или отрицательным, как у электронов, но в любом случае мы определяем его количество при помощи всего одного числа (положительного или отрицательного). А вот КХД содержит целых три вида заряда. Они без какого-либо серьезного основания были названы цветами; для определенности будем называть их красным, зеленым и синим.

В КЭД есть одна частица, переносящая взаимодействие. Это фотон, который отвечает на электрический заряд. А в КХД содержится сразу *восемь* частиц-переносчиков взаимодействия, названных цветными глюонами. Два из них, подобно фотону, отвечают на цветовой заряд. (А почему не три? Это объясняется в следующем абзаце.) Остальные шесть обеспечивают *преобразования* из одного цвета в другой. Таким образом, есть глюон, который превращает единицу красного заряда в единицу зеленого заряда, другой превращает единицу зеленого заряда в единицу синего заряда и т. д.

*Правило отбеливания* – это красивая особенность КХД, которая физически важна, которую довольно легко сформулировать и очень легко продемонстрировать математически, но трудно мотивировать интуитивно. (По крайней мере я не нашел для этого хорошего способа.) Согласно правилу отбеливания, результирующий эффект от наличия единицы красного заряда, единицы зеленого заряда и единицы синего заряда в одном и том же самом месте – нулевой: они взаимно гасятся. (Для экспертов: здесь я предполагаю, что они находятся в антисимметричной конфигурации.) Это смутно напоминает то, как три спектральных цвета (красный, зеленый и синий) могут сложиться и дать нейтральный белый – отсюда и термин «отбеливание» – хотя, конечно, физика этих процессов

абсолютно различна. Именно из-за правила отбеливания, которое делает одну комбинацию зарядов бессильной, мы получаем только два, а не три вида глюонов, отвечающих на цветовой заряд.

Каждый кварк переносит одну единицу цветового заряда. Цвет кварка – это независимое свойство, которое мы должны указать в дополнение к таким свойствам, как электрический заряд или масса, и оно никак не менее важно. Однако в отличие от электрического заряда или массы *цвет кварка – это не одно число, а три. Точнее сказать, он кодирует позицию в трехмерном пространстве свойств.* Существование этих новых видов заряда – основа КХД. Этот факт настолько существенный, настолько красивый и настолько важный для более поздних разработок, что мы просто обязаны сделать обзор его оснований в реальности.

### **Странная действительность кварков и глюонов**

Кварки впервые удалось «увидеть» в экспериментах, проведенных Джеромом Фридманом, Генри Кендаллом и Ричардом Тейлором на Стэнфордском линейном ускорителе в конце 1960-х. В сущности они делали снимки «внутренностей» протонов. При использовании (виртуальных) фотонов очень высоких энергий они смогли достичь хорошего разрешения для очень маленьких расстояний и времен.

Те «снимки» очень многое прояснили! В ретроспективе особенно выделяются три наблюдения.

*Протоны содержат кварки.* Поскольку снимки были сделаны с использованием фотонов, они смогли запечатлеть распределение электрического заряда в протоне. Они показали, что электрический заряд сконцентрирован в очень маленьких, точечных структурах, а не рассредоточен по ядру. Потрясающее повторение открытия Резерфорда и Гейгера – Марсдена – но теперь уже внутри протона, а не внутри атома! Количество заряда в этих точечных структурах, а также другие свойства совпали с ожиданиями кварковой модели.

*В протонах кварки почти свободны.* Большинство снимков показывает три кварка и больше ничего, причем позиция каждого кварка оказывается почти не зависимой от позиций других. Отсюда делается вывод, что в пределах протона взаимодействие между кварками слабо. В то же время множество других экспериментов указывают на то, что кварк никогда не покидает протон как отдельная частица. Таким образом,

нам нужна сила, которая относительно слаба на коротких расстояниях, но становится мощной на больших расстояниях. Основной парадокс динамики сильного взаимодействия, который мы упоминали ранее, становится высеченным в камне.

*Протоны – это гораздо больше, чем просто три кварка.* Несколько снимков запечатлели следы дополнительных кварк-антикварковых пар. Это не так уж удивительно: поскольку в протонах запасено много энергии, а кварки обладают очень маленькой массой, создать их столь же легко, как написать формулу  $m = E/c^2$  – с очень маленькой  $m$ !

Но важнее то, чего *не было* замечено на снимках. Если сложить всю энергию движения кварков, определенную из наблюдений, получится только около *половины* той величины, которая составляет полную массу протона. Поскольку фотоны слепы к электрически нейтральным частицам, очевидная интерпретация состоит в том, что в протонах есть некий значительный электрически нейтральный компонент в дополнение к электрически заряженным кваркам. Эта микрокосмическая проблема «темной материи» была первым указанием на то, что протоны – это намного больше, чем просто три кварка. Как мы вскоре увидим, этот недостающий ингредиент представлен цветными глюонами.

Последующие эксперименты при более высоких энергиях показали другой, ярко осязаемый аспект реальности кварков и глюонов. Чтобы увидеть его, рассмотрите, пожалуйста, теперь вклейку NN.

Чтобы описать, что появляется в результате ультравысокоэнергичных столкновений, будь то столкновения электронов с позитронами (как на вклейке NN) или протонов с протонами (как на Большом адронном коллайдере в CERN), проще всего представить, будто мы произвели кварки, антикварки и глюоны – даже при том, что эти частицы не «существуют» (они находятся в состоянии конфайнмента), – и идти от этого к тому, что мы фактически наблюдаем. (Совсем скоро это станет кристально ясно.)

Дело в том, что быстро движущийся кварк, антикварк или глюон материализуются в лаборатории в виде *струи* адронов, которые движутся почти в одном и том же направлении. Полная энергия и импульс частиц в струе составляют вместе исходную энергию кварка, антикварка или глюона, с которого началась струя, потому что энергия и импульс сохраняются. Поэтому, если мы готовы подсматривать, «идя вместе с потоком», т. е. следить за его энергией и импульсом, забывая, что они поделены среди многих адронов, мы можем увидеть лежащие в основе фундаментальные частицы. Это очень полезно для интерпретации результатов, поскольку мы можем *намного лучше* предсказывать рождение

кварков, антикварков и глюонов, которые повинуются простым уравнениям, чем рождение адронов, которые гораздо сложнее устроены.

Если вы поедете на конференцию по физике высоких энергий в наши дни, то вы услышите, что экспериментаторы спокойно говорят о производстве несуществующих частиц (кварков, антикварков или глюонов) и об измерении их свойств. Это стало стандартным языком в этой области. Конечно, они имеют в виду, что наблюдали соответствующие струи. Таким образом, математически Идеальное становится вполне осязаемым Реальным.

### Самоклеящийся клей

Свет свободно проходит через свет. Если бы это было не так, визуальная информация, которую мы получаем от мира, была бы искажена рассеянием, и ее было бы намного сложнее интерпретировать. В КЭД этот простой факт вполне понятен: фотоны реагируют на электрический заряд, но сами фотоны электрически нейтральны.

Самое существенное *качественное различие* между КХД и КЭД состоит в том, что, в отличие от фотонов, *цветные глюоны взаимодействуют друг с другом*. Рассмотрим, например, цветной глюон, который превращает единичный красный заряд в единичный синий заряд. Давайте назовем его *RB*. Когда такой глюон поглощается, полный красный заряд поглотившей его частицы уменьшается на единицу, а ее полный синий заряд увеличивается на единицу. Но поскольку эти заряды сохраняются, мы приходим к заключению, что, если считать его частицей, переносит *RB* «минус одну» единицу красного заряда и «плюс одну» единицу синего заряда. Он *не* нейтрален. Другие глюоны, которые изменяют красный или синий заряд или реагируют на них, будут взаимодействовать с *RB*. И точно так же для всех остальных: восемь цветных глюонов формируют комплекс взаимодействующих друг с другом частиц.

Когда мы переходим от этих квантов к полям, которые они создают, взаимодействия дают удивительный эффект. Силовые линии глюонов притягивают друг друга! И поля вместо того, чтобы распространять свое влияние равномерно сквозь пространство, концентрируются в трубки (см. вклейку ОО – и ср. с илл. 20).

Самоклейкость цветного «клея» – ключ к пониманию конфайнмента кварков. Трубки силовых линий глюона – это и есть возникающие вдруг

«резинки», готовые создать эффект конфайнмента! Когда вы увеличиваете расстояние, разделяющее цветовой заряд и его противоположность, они оказываются соединены более длинной трубкой потока. Требуется конечное количество энергии на единицу дополнительного разделения, чтобы подпитывать новые поля. В результате возникает сила сопротивления, и эта сила отнюдь не становится меньше по мере того, как вы растягиваете их еще дальше. Потребовалось бы бесконечное количество энергии, чтобы освободить цветовой заряд полностью, но этого не может быть, и потому он находится в конфайнменте.

Самоклейкость глюона – это также хороший способ ввести и визуализировать понятие асимптотической свободы. Поскольку самоклейкость фокусирует цветовые поля вдали от кварка, они действуют с большей силой, чем действовали бы в противном случае, как армия, которая концентрирует свои силы. И наоборот, мы можем начать с *более слабых сил*, чем мы себе представили вначале, чтобы объяснить данную силу вдалеке. В этом вся суть асимптотической свободы: *слабая на коротком расстоянии сила может породить значительную силу на большом расстоянии*. Это именно тот вид поведения, который нам нужен, как вы, возможно, помните, чтобы объяснить снимки протонов Фридмана – Кендалла – Тейлора.

Мы можем также интерпретировать асимптотическую свободу с точки зрения того, как мы зондируем это взаимодействие. Зонды высоких энергий чувствительны к поведению силы на коротких расстояниях. «Почти свобода» на *коротких расстояниях* отражается на слабости взаимодействий и простоте поведения при *высоких энергиях*.

Неожиданно возникающая простота КХД при высоких энергиях – роскошный подарок Природы физикам, ищущим фундаментального понимания. На самом деле она приносит целую кучу подарков.

## **Подарки понимания**

*Ранняя Вселенная постижима.* Очень рано в своей истории, вскоре после Большого взрыва, Вселенная была поистине местом высоких энергий. Благодаря асимптотической свободе мы можем с уверенностью смоделировать ее содержимое.

*Мы можем получить информацию из столкновений на высоких энергиях.* Поскольку доминирующая сила становится проще при высоких энергиях, мы можем точно вычислить ее следствия. Это позволяет нам

без помех интерпретировать результаты ультрасильных столкновений между протонами и тщательно исследовать их в поиске новых эффектов. Например, Большой адронный коллайдер стал инструментом для открытия бозона Хиггса, как описано позже в этой главе. В ближайшем будущем мы узнаем, описывают ли действительно многообещающие, амбициозные теории объединения взаимодействий, как мы обсудим в следующей главе.

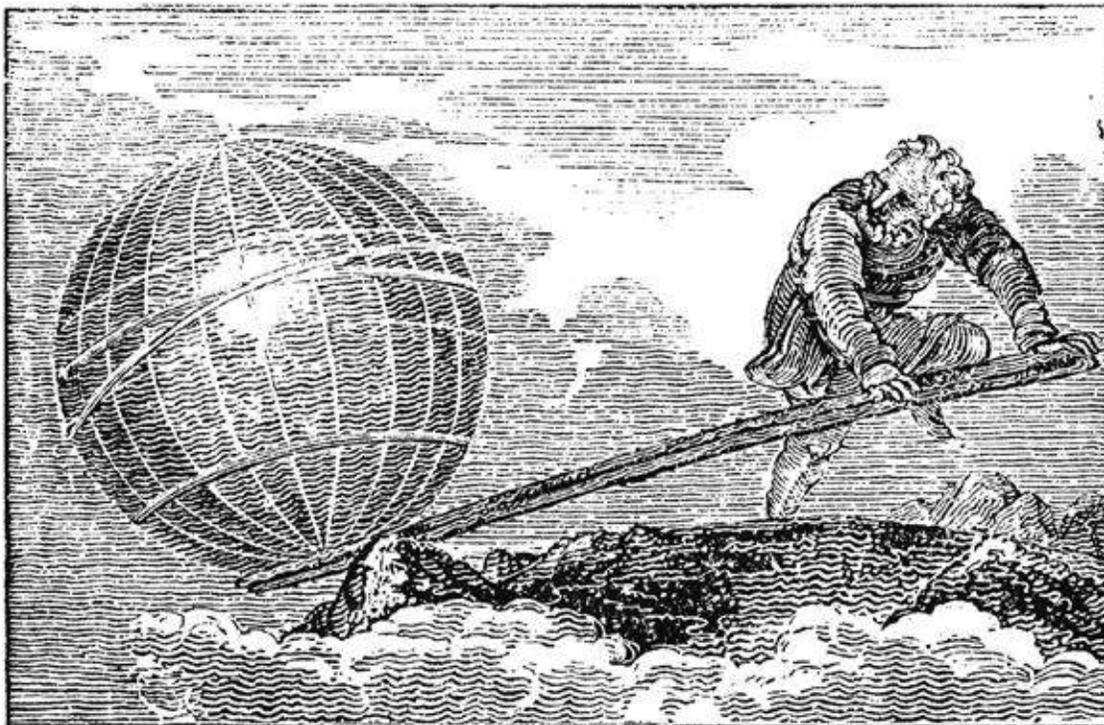
*Разные силы начинают казаться не такими уж разными.* Поразительное математическое сходство между уравнениями КХД и КЭД превращается в близкое физическое сходство между их следствиями, когда мы рассматриваем поведение при очень высоких энергиях (или на очень коротких расстояниях). Сильное взаимодействие, описываемое КХД, становится и проще, и слабее, пока кварки не начинают вести себя почти как электроны, а глюоны – почти как фотоны. Можно было бы сказать, что эффект стероидов смягчается. Учитывая столь явное математическое и физическое сходство, возможность существования объединенной теории выглядит серьезной. Основанная на симметрии математика КХД открывает дверь к объединению, а асимптотическая свобода проталкивает нас сквозь нее. Следуя за этой идеей до конца и вводя также слабое взаимодействие и гравитацию, мы обнаружим, что она объясняет несколько иначе загадочных «совпадений». Мы исследуем объединение всех взаимодействий как текущий рубеж нашего Вопроса в следующей главе.

Спасибо тебе, мать-природа, за эти подарки!

## **Рычаг и Дрожь Завесы**

Очень трудно создать теории частиц и взаимодействий, которые были бы совместимы и с принципами квантовой механики, и с принципами специальной теории относительности. И это хорошо! Это означает, что, если мы верим в квантовую механику и в специальную теории относительности, мы получаем хороший рычаг для достижения нашей цели. Доступные теории весьма жесткие – их нельзя сильно изменить, не сделав их противоречивыми; это делает их сильными. И их не много; это позволяет держать их в сфере внимания.

С таким рычагом правильный факт может привести к огромным последствиям.



Илл. 34. «Дайте мне точку опоры, и я переверну мир» (Архимед)

Асимптотическая свобода оказывается именно таким фактом! Экспериментальное открытие того, что сильное взаимодействие между находящимися рядом кварками в конце концов не так уж сильно, было очень трудно согласовать с другими известными нам фактами. В большинстве теорий, которые не противоречат ни квантовой механике, ни специальной теории относительности, сходное отталкивает сходное, поэтому фокусировки сил не происходит. Противоположное поведение – когда взаимодействие становится сильнее на коротких расстояниях – намного более распространено. Поэтому, когда мы с Дэвидом Гроссом и независимо от нас Дэвид Политцер обнаружили, что это *возможно*, это был такой момент, который Каббала описывает как «Дрожь Завесы Храма», когда оболочка, которая сохраняет божественный мир сокрытым от нашего взора, сдвигается.

Мы с Гроссом продолжили, основываясь на нескольких других фактах – и главный из них заключался в том, что мы можем связать три кварка, чтобы сделать барион, где цветовые заряды взаимно нейтрализуются (правило отбеливания!), – поиск теории, которую мы теперь называем квантовой хромодинамикой (основанной на локальной симметрии и трехмерном пространстве свойств), которая стала бы

единственно возможной теорией сильного взаимодействия. Даже теперь, когда я перечитываю наше заявление:

Наконец давайте вспомним, что предложенные теории оказываются единственным образом выбраны природой, если принять во внимание одновременно и буквально результаты SLAC<sup>[72]</sup> и подход ренормализационной группы к квантовой теории поля.

Я вновь переживаю смесь радостного возбуждения и беспокойства, которую почувствовал в то время. Сама КХД исторически стала первым подарком асимптотической свободы.

## **Новый вид физики**

Уже в течение нескольких десятилетий считается правильным делить физику на две ветви: теория и эксперимент. Обе они в принципе стремятся к лучшему пониманию материального мира, но используют различные инструменты.

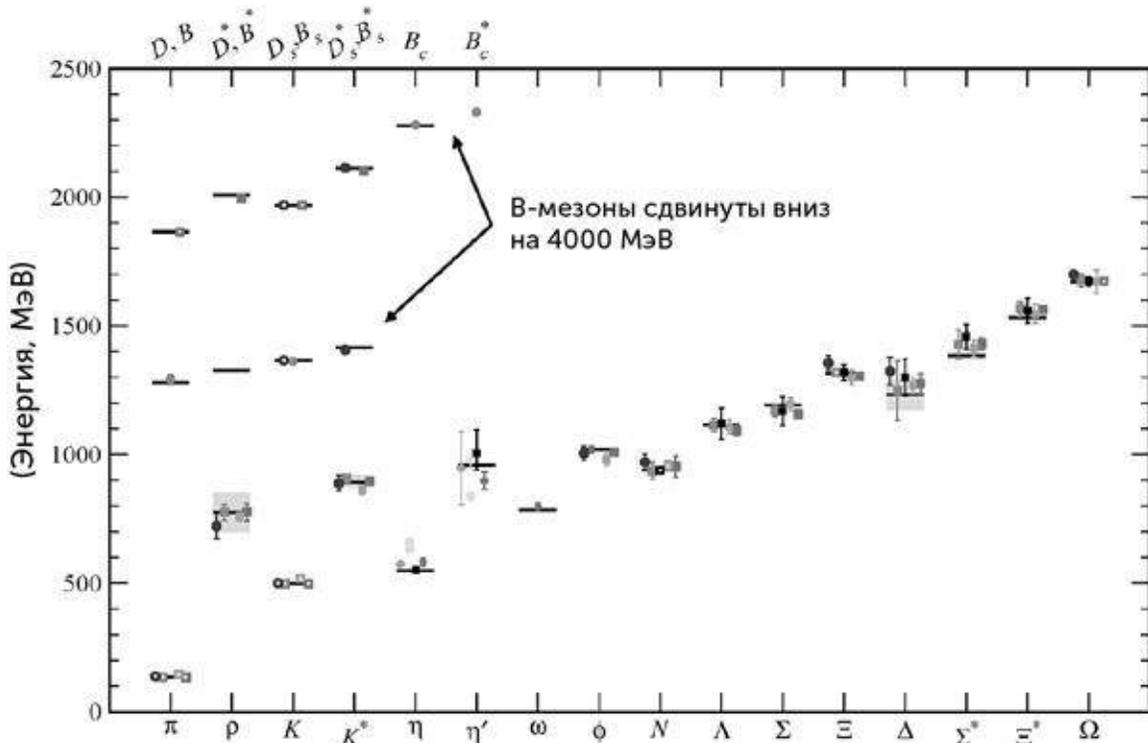
В последние годы, отмеченные взрывным ростом производительности компьютеров, появилась и процветает третья ветвь. Мы могли бы назвать ее «цифровым экспериментом», или «моделированием», или просто «решением сложных уравнений». Она сочетает элементы и теории, и эксперимента, но значительно отличается от обоих. Этот новый вид физики оказался особенно важен и успешен в КХД.

КХД предоставляет нам совершенно определенные уравнения, которым мы можем научить компьютеры. Как только мы это сделали, у нас появляется доступ к чрезвычайно быстрым, неустанным, честным и неуклонно точным помощникам, которые больше всего на свете любят вычислить. Давайте бегло посмотрим на два выдающихся результата, которые были достигнуты при помощи такого подхода. Они позволяют нам блестящим образом подвести итог нашему обсуждению сильного взаимодействия.

Во-первых, давайте возвратимся к вопросу, с которого мы начали: что представляют из себя атомные ядра? Сущность этого вопроса, как мы уже видели, заключается в его самом простом случае: что такое протон? Зная уравнения, которым он подчиняется, мы можем вычислить подробный портрет героя. Таким образом, мы обнаруживаем, что наше самое

сокровенное вещество обладает красотой (вклейка PP) и утонченностью (вклейка QQ).

Наконец, в качестве подходящей кульминации нашего обсуждения КХД давайте задокументируем источник (большой части) массы. Скромно выглядящая илл. 35 резюмирует колоссальное научное достижение и является вехой для нашего Вопроса.



Илл. 35. Успешное вычисление масс адронов, основанное на КХД: источник (большой части) массы

На горизонтальной оси вы видите названия мезонов и барионов. Опять же, хотя об этих частицах можно много чего сказать и подробности будут захватывающими для специалистов, для текущих целей достаточно отметить, что существует множество адронов и у них есть различные названия (состоящие из различных греческих и латинских букв, иногда со звездочками или штрихами) и различные массы. Над каждым названием вы найдете горизонтальный отрезок, указывающий на экспериментально измеренное значение массы этой частицы. (Некоторые из частиц живут очень недолго, и это «размазывает» их массу по достаточно широкому диапазону. В таких случаях, например с частицей  $\rho$ , вы увидите серый прямоугольник, окружающий центральный отрезок.) Рядом с каждым отрезком есть затененные точки с вертикальными линиями, проходящими

через них, – они обозначают *расчетные* значения массы частицы, полученные непосредственно из уравнений КХД различными исследовательскими группами. Вертикальные отрезки отражают диапазон неопределенности в вычислениях, внесенной ограничениями на машинное время и другими факторами. Я должен заметить, что эти вычисления чрезвычайно трудны. В них используются очень умные алгоритмы, и они проводятся на самых мощных вычислительных системах в мире в течение долгого времени.

Все результаты для «основных последовательностей» мезонов  $\pi$ ,  $\rho$ ,  $K$ ,  $K^*$ ,  $\eta$ ,  $\eta'$ ,  $\omega$ ,  $\phi$  и барионов  $N$ ,  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ,  $\Xi$ ,  $\Delta$ ,  $\Sigma^*$ ,  $\Xi^*$ ,  $\Omega$  получаются в результате вычислений, если даны всего три входные величины: средние массы верхнего и нижнего кварков, масса странного кварка и единиц цветового заряда. Как можно видеть, согласие между измерениями и вычислениями поразительно.

Я хочу подчеркнуть, что из этих вычислений следует гораздо больше, чем закладывается в качестве входных данных. Уравнения КХД сильно ограничены симметрией, и в них мало возможностей для подстройки. Повторю, что для точного задания этих вычислений мы должны указать всего три входные величины: средняя масса верхнего и нижнего кварков, масса странного кварка и единица цветового заряда (общая мера силы взаимодействия). Поэтому, если что-то с чем-то не согласуется, там негде спрятаться! Мы непременно должны найти в результате наших вычислений все адроны, которые наблюдаются, с теми массами, которые они имеют согласно наблюдениям. И, самое важное, мы не должны найти ничего такого, что бы не наблюдалось, – в частности, мы не должны найти изолированных кварков или глюонов!

Из этого испытания ордалией<sup>[73]</sup> теория выходит триумфатором. Среди вычисленных масс есть масса частицы под названием  $N$ . Это не просто еще одна масса, потому что  $N$  обозначает *нуклон*, т. е. протон или нейтрон. (Различие между массами протона и нейтрона слишком мало, чтобы его можно было заметить в таком масштабе.) Оказывается, эта масса очень мало зависит от масс кварков, которые в соответствующем случае достаточно малы.

Следовательно: *почти вся масса нуклона, а значит, и почти вся масса обычного вещества во Вселенной возникают из чистой энергии, согласно формуле:*

$$m = E/c^2.$$

Масса нуклона проистекает из кинетической энергии кварков в состоянии конфайнмента и из энергии поля глюонов, которые обеспечивают конфайнмент. Мы получаем Массу без Массы, получаем ее непосредственно из чисто концептуальных, основанных на симметрии уравнений КХД.

Воплощает ли мир красивые идеи? Можете поспорить, что да. И вы тоже их воплощаете.

## Часть 3: Слабое взаимодействие

Квантовая хромодинамика (КХД) определяет основные динамические законы, согласно которым протоны, нейтроны и другие адроны образуются из кварков и глюонов, а также описывает силы, связывающие ядра, – так называемое сильное взаимодействие. Квантовая электродинамика (КЭД) управляет мирами света, атомов и химии, как мы уже обсудили.

Однако ни одна из этих двух больших теорий не включает процессы, в ходе которых протоны превращаются в нейтроны, и наоборот. И все же такие превращения происходят. Как же мы можем их учесть? Чтобы объяснить эти события, физикам пришлось ввести еще одно взаимодействие в дополнение к гравитации, электромагнитному и сильному взаимодействию.

Это новое дополнение, эту четвертую фундаментальную силу называют слабым взаимодействием. Слабое взаимодействие завершает наше современное понимание физики – Главную теорию.

Жизнь на Земле поддерживается за счет совсем небольшой доли энергии, излучаемой Солнцем, которая приходит к нам в виде солнечного света. Солнце получает свою энергию, превращая протоны в нейтроны и выделяя при этом энергию. Слабое взаимодействие в этом очень особом смысле делает возможной существование жизни.

### Основы слабого взаимодействия

Полное описание слабого взаимодействия потребовало бы знакомства с двумя большими группами персонажей – со сбивающей с толку толпой частиц и с длинным почетным списком исследователей, а также привело бы к обсуждению подробностей, не имеющих прямого отношения к нашим главным темам. Здесь я ограничусь кратким, упрощенным описанием двух самых ярких фактов, выбранных благодаря их фундаментальному значению и с прицелом для дальнейшего использования. Наши знания подытожены на цветных вклейках RR, SS, TT и UU, которые обеспечивают основу для постижения окончательного объединения. Возможно, вам захочется обращаться к этим изображениям по мере того, как мы будем продвигаться вперед, чтобы не запутаться.

*Превращения кварков.* Поскольку протоны и нейтроны, как мы уже обсудили, являются сложными соединениями более фундаментальных

кварков и глюонов, мы должны найти и более фундаментальную причину превращений протон  $\leftrightarrow$  нейтрон. Глубинной структурой, лежащей в основе этих превращений, является следующий кварковый процесс:

$$d \rightarrow u + e + \bar{\nu}.$$

Так как основой нейтронов являются тройки кварков  $udd$ , в то время как основой протонов – тройки  $uud$ , то превращение кварка  $d \rightarrow u$  позволяет превратить нейтрон в протон. Такое превращение сопровождается испусканием электрона  $e$  и антинейтрино  $\bar{\nu}$ . Таким образом, взаимодействие между кварками, лежащее в основе процесса, на уровне адронов реализуется как

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}.$$

Этот медленный распад является судьбой изолированных нейтронов. (Их среднее время жизни – 15 минут, а стабильны нейтроны только тогда, когда связаны в ядрах.)

Основные правила квантовой механики говорят нам, что мы также получим допустимые процессы, если заменим какую-нибудь частицу ее античастицей и перенесем ее в противоположную сторону реакции либо если мы обратим направление стрелки в реакции. Применяя эти правила к нашему процессу  $d + u \rightarrow e + \bar{\nu}$ , мы находим такие возможные процессы, как

$$\begin{aligned} d + \bar{u} &\rightarrow e + \bar{\nu} \\ d + \bar{e} + \nu &\leftarrow u \end{aligned}$$

и множество других. Они дают начало целому ряду форм ядерного распада (радиоактивности), дестабилизируют другие адроны и обуславливают многие превращения в космологии и астрофизике, включая синтез всех химических элементов из первоначальной смеси протонов и нейтронов. В качестве примера возможных реакций: первый из этих процессов,  $d + \bar{u} \rightarrow e + \bar{\nu}$ , приводит непосредственно к распаду  $\bar{p}$ -мезона (в основе которого как раз лежит кварк-антикварковая пара  $d\bar{u}$ ) на электрон и антинейтрино.

*Спиральность и нарушение четности.* Очень глубокий аспект слабого взаимодействия, названный нарушением четности, был теоретически обнаружен Ли и Янгом в 1956 г. Чтобы описать его, мы должны ввести

понятие *спиральности*<sup>[74]</sup> частицы. Оно применяется к частицам, которые одновременно движутся и вращаются.

Если объект вращается вокруг некоторой оси, мы можем присвоить этой оси направление следующим образом: представьте себе наш вращающийся объект как фигуристку на коньках. Если при вращении ее правая рука движется вперед, в сторону живота, мы выбираем направление от ее ног к голове; если же вращение приближает ее правую руку к спине, мы выбираем направление от головы к ногам.

У частиц, которые нам интересны, есть небольшое собственное вращение, известное как *спин*. Они всегда вращаются, как неустанные фигуристки на льду. Мы можем применить к ним ту же логику и получить направление, связанное с вращением. Если наша частица движется в том же направлении, мы говорим, что частица правая. Если она движется в противоположном направлении, мы говорим, что она левая. Другими словами, спиральность частицы задает направление ее вращения относительно ее скорости.

Ли и Янг предположили, что *левые* кварки, электроны и нейтрино (а также мюоны и  $\tau$ -лептоны) участвуют в слабом взаимодействии, так же как и *правые* антикварки, антиэлектроны (позитроны) и антинейтрино (а также антимюоны и анти- $\tau$ -лептоны), а вот частицы с противоположной спиральностью этого не делают. Эксперименты подтвердили их предположение.

### **Еще один цветной анаморф: от «??» к «!»**

Преобразовательный аспект слабого взаимодействия и еще несколько более специальных аспектов подали Шелдону Глэшоу, а также Абдусу Саламу и Джону Уорду идею о том, что, возможно, это взаимодействие тоже можно было бы описать в виде воплощения локальной симметрии.

Мы можем понять, как это могло бы сработать, используя идеи и образы, которые мы уже развили. Мы хотим, чтобы наш основной слабый процесс (давайте для определенности возьмем процесс вида  $u + e \rightarrow d + \nu$ ) происходил за счет движений в пространстве свойств. У пространства свойств должно быть (по крайней мере) два измерения, чтобы  $u$ - и  $d$ -кварки могли быть одной и той же сущностью в различных положениях, и аналогично  $e$  и  $\nu$ . Затем мы сможем посмотреть на весь наш процесс, который при буквальном прочтении представляет изменение идентичности частиц – того, чем они являются, – как на изменение их положения – того,

где они находятся. Это принцип «где определяет что» в действии!

Теория, основанная на локальной симметрии, идет дальше, обеспечивая нас флюидом, управляющим перемещениями в пространстве свойств. Самое элементарное действие этого флюида – это то, что происходит, когда его самые маленькие единицы, или кванты, создаются и уничтожаются. Следовательно, наш процесс на самом базовом квантовом уровне может происходить таким образом:

$u$ -кварк испускает викон  $W^+$  и превращается в  $d$ -кварк;  
электрон  $e$  поглощает викон  $W^+$  и превращается в нейтрино  $\nu$ .

Или по-другому:

электрон  $e$  испускает викон  $W^-$  и превращается в нейтрино  $\nu$ ;  
 $u$ -кварк поглощает викон  $W^-$  и превращается в  $d$ -кварк.

Викон  $W^+$  обычно называют  $W^+$ -бозоном, причем верхний индекс обозначает его электрический заряд. Викон  $W^-$ , или  $W^+$  – бозон – это его античастица. Когда вы обстоятельно разберетесь с локальной симметрией, вы обнаружите, что существует третий, электрически нейтральный викон  $Z$ , или  $Z$ -бозон.

Предлагая эту локальную теорию, Глэшоу, Салам и Уорд следовали нашему иезуитскому девизу «Более достойно благословения просить прощения, чем разрешения», поскольку они намеренно проигнорировали другой аспект теории Янга – Миллса. Локальная симметрия теории Янга – Миллса требует, чтобы  $W^+$ ,  $W^-$  и  $Z$  имели нулевую массу. Аналогичные предсказания нулевой массы для гравитонов, фотонов и цветных глюонов – все соответствуют действительности и представляют большой успех для локальной симметрии. Но в теории слабого взаимодействия это предсказание не работает. Если бы у викионов была нулевая масса, их можно было бы легко наблюдать в столкновениях на ускорителях или даже в химических реакциях, так же как фотоны. В сущности, слабое взаимодействие не было бы слабым!

Короче говоря, в случае слабого взаимодействия локальная симметрия кажется слишком хорошей, чтобы быть правдой.

Чтобы согласовать Идеальное с Реальным, мы должны ввести еще одну идею – и она красива! Новая идея – это *спонтанное* нарушение симметрии, которое в данном контексте предложили Роберт Браут

и Франсуа Энглер и независимо Питер Хиггс (а также Джеральд Гуральник, Карл Хаген и Том Киббл). Именно оно позволяет нам одновременно и съесть пирожок, и сохранить его. Если говорить точнее, мы можем сохранить уравнения локальной симметрии с их прекрасным принципом «где определяет что» для слабого взаимодействия, позволяя бозонам иметь ненулевую массу, согласующуюся с наблюдениями. Мы продолжим рассмотрение их смелой и сильной идеи более подробно после обязательной исторической зарисовки, надлежащим образом завершающей наш рассказ о слабом взаимодействии как таковом.

Именно Стивен Вайнберг синтезировал эти два подхода – симметрию и нарушение симметрии, чтобы произвести полностью удовлетворительную теорию слабого взаимодействия, которая представлена в современной Главной теории. Но сначала было совершенно неочевидно, что эта теория даст правильные или хотя бы конечные ответы, если принять во внимание квантовые флуктуации. Герард 'т Хоофт и Мартинус Велтман продемонстрировали, что она дает их, и при этом ввели в оборот методы вычислений, которые сделали теорию точнее и полезнее. Фриман Дайсон ранее сослужил подобную службу КЭД, для которой сделать это было намного легче (но все равно трудно).

## **Флюид Хиггса, поле Хиггса, частица Хиггса**

На одной покрытой водой планете в далекой-далекой галактике рыбы эволюционировали и стали разумными – настолько разумными, что некоторые из них стали физиками и начали изучать, как движутся тела. Сначала рыбы-физики получили очень сложные законы движения, потому что (как мы знаем) движение тел в воде устроено сложно. Но однажды рыба-гений – Рыба Ньютон – сделала предположение о том, что основные законы движения гораздо проще и красивее: в сущности, это законы движения Ньютона. Она предположила, что наблюдаемое движение выглядит сложным из-за влияния вещества – назовем его «водой», – заполняющего мир. С большим трудом рыбам удалось подтвердить теорию Рыбы Ньютона, выделив молекулы воды.

Согласно механизму Хиггса, мы похожи на таких рыб. Мы погружены в космический океан, который усложняет наблюдаемые законы физики.

Уравнения для частиц с нулевой массой, включая уравнения Максвелла, уравнения Янга – Миллса и уравнения Эйнштейна в общей теории относительности, особенно красивы. Как мы уже обсуждали,

они могут обеспечивать огромное количество симметрии – локальной симметрии. Фотоны обладают нулевой массой, так же как цветные глюоны в квантовой хромодинамике и гравитоны в теории гравитации. Чтобы иметь красивые уравнения и чтобы наше описание Природы было единообразным, нам хотелось бы создать мир из «кирпичиков» с нулевой массой.

К сожалению, несколько видов элементарных частиц отказываются потакать нашим желаниям. Так,  $W$ - и  $Z$ -бозоны, которые переносят слабые взаимодействия, имеют значительные массы. (Именно поэтому слабые взаимодействия обладают малым радиусом действия и слабы при низких энергиях.) То, что они обладают массой, досадно, потому что в других отношениях, как мы только что видели,  $W$ - и  $Z$ -бозоны кажутся удивительно похожими на фотоны.

Можно ли преодолеть это затруднение? Примем во внимание, что на поведение фотонов могут влиять свойства вещества, через которое они проходят. Известный пример: свет замедляется при прохождении сквозь стекло или воду. Это явление, при котором свет становится более «вялым», чем обычно, можно грубо уподобить приобретению светом инерции. Менее знакомый, но более глубокий для наших текущих целей пример – поведение фотонов внутри сверхпроводников. Уравнения, описывающие фотоны в сверхпроводниках, *математически идентичны* уравнениям для частицы с массой. Внутри сверхпроводника фотоны эффективно становятся частицами с ненулевой массой.

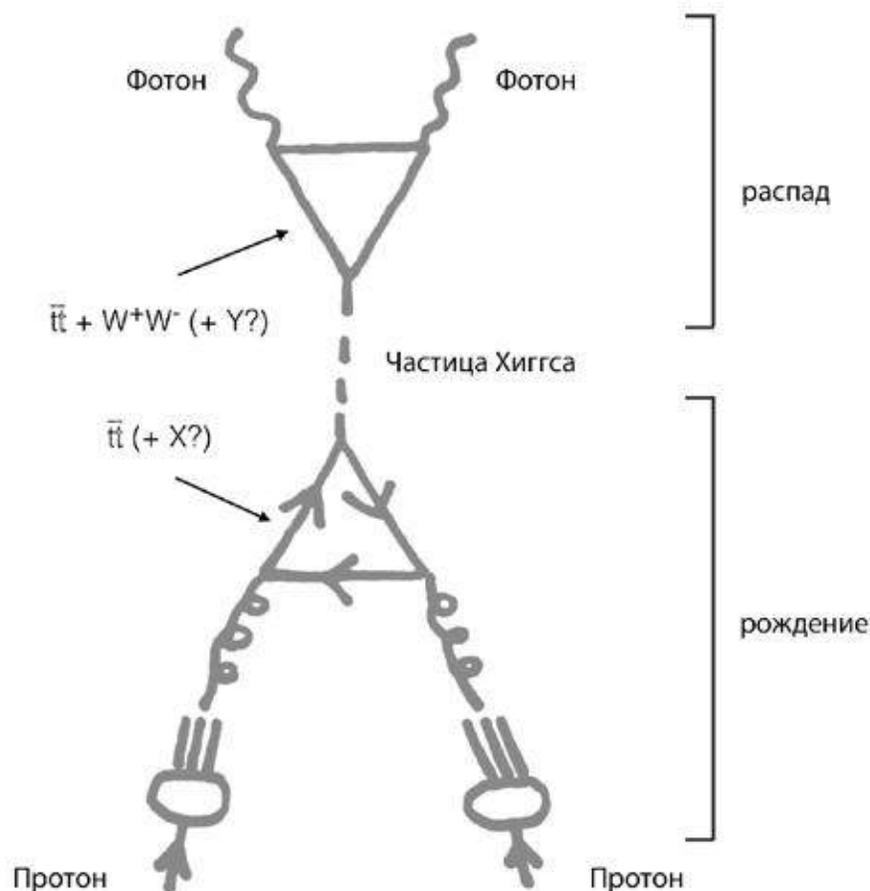
Сущность механизма Хиггса в идее о том, что «пустое пространство» – т. е. пространство, лишённое частиц и излучения, – на самом деле заполнено материальной средой, которая делает  $W$ - и  $Z$ -бозоны массивными. Эта идея позволяет нам сохранить красивые уравнения для безмассовых частиц, при этом относясь с надлежащим уважением к мнению действительности. Итак, нам нужна среда, которая делает для  $W$ - и  $Z$ -бозонов то же самое, что сверхпроводники делают для фотонов. Более того, гипотетическая космическая среда должна создавать массы гораздо большего масштаба: массы  $W$  и  $Z$  в (не) пустом пространстве примерно в  $10^{16}$  раз больше, чем массы фотонов в сверхпроводниках.

Физики обращались к механизму Хиггса многие годы и, используя его, шли от успеха к успеху. Многие аспекты взаимодействий  $W$ - и  $Z$ -бозонов, помимо их масс, были точно предсказаны с использованием красивых уравнений для безмассовых частиц и калибровочных симметрий с их следствиями, модифицированными заполняющим пространство

веществом. Так мы собрали убедительную сумму доводов в пользу существования нашего собственного «космического океана». Но в конечном счете эта версия основывалась на косвенных доказательствах. Не было никакого четкого ответа на очевидный вопрос: из чего он сделан?

Ни одно известное вещество не могло быть основой космического океана. Никакая комбинация известных кварков, лептонов, глюонов или других частиц не имела нужных для этого свойств. Нужно было что-то новое.

В принципе космический океан Хиггса мог бы состоять из нескольких веществ, и сами эти вещества могли бы быть составными. Литература по теоретической физике элементарных частиц содержит сотни, если не тысячи, предложений такого вида. Но среди всех логичных возможностей есть так называемая минимальная модель – самая простая и самая экономная. В этой минимальной модели космическое вещество состоит всего из одного ингредиента. Хотя принятая в этой области терминология сбивает с толку и к тому же постоянно меняется, здесь, когда я говорю о «частице Хиггса», я буду иметь в виду уникальную новую частицу<sup>[75]</sup>, которая была введена, чтобы завершить минимальную модель.



Илл. 36. Эта схема изображает процесс, в результате которого частица Хиггса была получена с помощью глюонов и впервые обнаружена экспериментально – блестящий пример, в котором можно видеть, как работают сообща многие аспекты Главной теории и глубокие принципы квантовой теории

Мы можем сделать много выводов о том, как частица Хиггса взаимодействует с другими формами материи. В конце концов, раз мы находимся внутри этого космического океана, мы все наблюдаем свойства частиц Хиггса *в массе* с незапамятных времен. Фактически все свойства этой частицы предсказываются единственным образом, как только становится известна ее масса. Например, ее спин и электрический заряд должны быть равны нулю, потому что она должна быть похожа на квант «ничего». Так как мы знали, что мы ищем, стало возможно разработать разумную стратегию поиска частицы Хиггса. Ключевой процесс, с помощью которого была обнаружена частица Хиггса, изображен на илл. 36.

Первый шаг состоит в том, чтобы создать эту частицу. Преобладающий механизм рождения довольно примечателен. Обычное вещество очень слабо взаимодействует с частицей Хиггса  $H$ . (Именно поэтому электроны и протоны могут быть намного легче, чем  $W$  и  $Z$ , – они не чувствуют ее сопротивления.) На самом деле преобладающее взаимодействие происходит не напрямую, а за счет косвенного процесса «слияния глюонов», процесса, который я обнаружил в 1976 г. во время незабываемой прогулки, о которой я расскажу ниже. Он представлен в нижней части илл. 36.

Глюоны не соединяются с частицей Хиггса напрямую. Их взаимодействие – чисто квантовый эффект. Для квантовой механики характерно возникновение спонтанных флуктуаций, или «виртуальных частиц». Обычно такие флуктуации возникают и исчезают без какого-либо заметного эффекта, кроме их влияния на поведение соседних реальных частиц. В наиболее важном процессе слияния глюонов последние передают энергию виртуальной паре, состоящей из топ-кварка  $t$  и антитоп-кварка  $\bar{t}$ . Кварк и антикварк  $t$  и  $\bar{t}$  сильно взаимодействуют с частицей Хиггса – это главная причина того, что они тяжелые, – так что есть значительная вероятность того, что они породят эту частицу перед тем, как исчезнуть.

Самый эффективный способ получить из сталкивающихся протонов частицу Хиггса состоит в том, чтобы столкнуть два глюона, по одному от каждого протона. Остальная часть протонов материализуется в виде беспорядочного фона, обычно содержащего многие десятки частиц.

Распад  $H$  на два фотона,  $H \rightarrow \gamma\gamma$ , показанный ближе к верхней части илл. 36, происходит подобным же образом. Фотоны не связываются непосредственно с частицей Хиггса, а лишь через виртуальные  $t\bar{t}$  и  $W^+W^-$  пары. Хотя это довольно редкий вариант распада, он был основным для открытия  $H$ -частицы, потому что у него есть два больших преимущества с экспериментальной точки зрения.

Первое преимущество в том, что энергия и импульс фотонов высокой энергии могут быть измерены довольно точно. Мы можем объединить их, согласно кинематике специальной теории относительности, чтобы определить «эффективную массу» пары фотонов. Если фотоны из этой пары образовались вследствие распада частицы с массой  $M$ , то их эффективная масса будет равна  $M$ .

Второе преимущество в том, что фотонные пары высокой энергии довольно трудно произвести в обычных процессах (не связанных с частицей Хиггса), поэтому с фоном не так уж трудно бороться.

Используя оба этих преимущества, экспериментаторы разработали стратегию поиска: измерять эффективные массы многих фотонных пар и искать избыток таких пар при одном определенном значении относительно соседних.

И – если сказать коротко – это сработало!

Есть еще бонус: поскольку фон может быть вычислен с большой достоверностью, величина превышения над фоном дает меру частоты рождения  $H$ , помноженную на коэффициент ветвления, или парциальную ширину именно такого распада – в пару  $\gamma\gamma$ . Тогда можно проверить, согласуется ли измеренный избыток событий с предсказаниями для минимального  $H$ , что особенно интересно, поскольку эти частоты рождения открывают новую дверь в неизведанное. Ведь могут существовать и другие тяжелые частицы, пока не наблюдавшиеся, но дающие свой виртуальный вклад в величину частоты рождения! До сих пор наблюдения согласуются с минимальной моделью «без рюшечек», но большая точность одновременно и достижима, и очень желательна.

## Очарованный вечер

Вплоть до десяти часов вечера (или около того) тот летний день 1976 г., который оказался самым плодотворным в моей научной карьере, совершенно не предвещал ничего подобного. У моей совсем маленькой дочки Эмити болело ухо, и весь день она была беспокойной, капризной и требовала внимания. Мы с Бетси, неопытные родители, недавно прибывшие в импровизированную деревню Фермилаба, где мы никого не знали, справлялись как могли. Когда наступила темная, типичная для Среднего Запада ночь, изнуренная Эмити наконец погрузилась в сон, а затем и Бетси тоже. Они были похожи на ангелов мира и спокойствия.

Настороженность и энергия, которые требовались, чтобы справляться с потоком маленьких кризисов, все еще были со мной, после того как сами кризисы прошли. В поиске выхода я решил, как часто делаю, выйти погулять. Ночь была кристально ясной; небо сияло; горизонт был резким и далеким; и даже земля, залитая лунным светом, казалась нереальной. С образами земных ангелов, которые остались во мне, и неземным зрелищем, окружавшим меня, я почувствовал невероятный восторг. Это было время для важных размышлений.

В течение нескольких предшествовавших лет теории сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий, основанные на локальной

симметрии, прошли путь от смелой авантюры до общепринятого мнения. Когда я подумал об этой ситуации, мне пришло в голову, что, в то время как различные кварки, лептоны, глюоны и виконы – не говоря уже о фотонах – были в центре внимания и в фокусе хорошо продуманных экспериментальных программ, нарушение симметрии оставалось относительно неизведанным. Не было даже заслуживающего внимания предложения проверить самую простую, «минимальную» модель с одной-единственной частицей Хиггса, как описано выше.

Основная проблема проста: частице Хиггса в этой модели «нравится» связываться с тяжелыми частицами, но частицы стабильного вещества, которые мы можем изучать непосредственно или поместить их в наши ускорители, очень легки. Цветные глюоны имеют нулевую массу, так же как фотоны, в то время как  $u$ - и  $d$ -кварк и электроны имеют незначительную массу.

Но недавно (вы помните, у нас на календаре 1976-й!) возник большой интерес к более тяжелым кваркам. Очарованный кварк  $c$  был еще недавним открытием, и были вполне достаточные основания подозревать, что существует два дополнительных, еще более тяжелых вида кварков. (И они правда существуют. Красивый кварк  $b$  был обнаружен довольно скоро, в 1977 г., в то время как топ-кварк  $t$  не был найден до 1995 г. Им уже были даны имена, и их свойства – с единственным исключением в виде их масс – были вычислены даже до того, как их открыли экспериментально.) Поэтому было естественным подумать, могут ли новые, более тяжелые кварки распахнуть двери, через которые мы могли бы добраться до частицы Хиггса. Я сразу же понял, что это возможно. Можно использовать те же самые приемы, которые привели к успеху с очарованными кварками, чтобы произвести мезоны, основанные на  $b\bar{b}$  или  $t\bar{t}$ . Эти более тяжелые кварки будут энергично связываться с частицами Хиггса. Если карты лягут удачно – по существу, если эти тяжелые кварки обладают большей массой, чем половина массы частицы Хиггса, – то частицы Хиггса смогут рождаться в распадах таких мезонов. Это было моим первым важным осознанием той ночи.

Теперь было важно рассмотреть конкурирующие распады, без частиц Хиггса, поскольку они могли бы доминировать и сделать интересующую меня возможность чисто умозрительной. Одной из самых важных возможностей, которые нужно было рассмотреть, был распад на цветные глюоны. Я не мог сделать точного расчета в уме, но, исходя из грубых оценок, казалось, что все в порядке. (Так оно и есть в действительности.) Но это навело меня на еще более важную мысль: если тяжелые кварки

могут связываться с частицами Хиггса и с глюонами, то они дают возможность связать глюоны с частицами Хиггса! И в этот момент в моем мозгу родился основной процесс, который вы видите в нижней части илл. 36. Опять же, точное вычисление было бы трудной задачей, но я сделал некоторые приблизительные оценки в уме и счел результаты обнадеживающими. В частности, я понял, что, даже если недостающие кварки окажутся *очень* тяжелыми, они все равно будут давать свой вклад – и что если бы существовали еще более тяжелые кварки, то они тоже участвовали бы в процессе. Мне сразу же стало ясно, что это был основной способ, которым частицы Хиггса могут связываться со стабильным веществом. Здесь открывалось многообещающее окно в неизведанное. Это было вторым моим важным осознанием той ночи.

В тот момент я дошел до лаборатории и решил повернуть обратно. Мне повезло в размышлениях о минимальной модели Хиггса, поэтому хотел подумать, как новые идеи можно применить к более сложным ее версиям. Изменения легко развивать дальше в любом конкретном случае, поэтому я начал думать, какие усложнения было бы интереснее всего рассмотреть. Особенно любопытная идея заключалась в существовании некоторой дополнительной симметрии, которая бы спонтанно нарушалась. Это могло привести к возникновению новых безмассовых частиц – захватывающая возможность! Это было моим третьим важным осознанием той ночи.

В Принстоне, где я до этого преподавал в течение года, нечто, названное инстантонами – которые я даже не буду пытаться объяснить здесь, – вызвало сильнейшее возбуждение. Инстантоны нарушают симметрию особенно интересными способами, и я подумал, что будет забавно привлечь и их, чтобы у меня было что-то такое, о чем можно рассказать коллегам и о чем им было бы интересно послушать. Я смутно чувствовал, что частица, которая в противном случае была бы безмассовой, согласно моему третьему осознанию, вместо этого получит небольшую массу и будет иметь другие интересные свойства. Это было моим четвертым важным осознанием той ночи, и оно привело меня домой.

Судьба этих четырех озарений различна. Первому просто не повезло. Красивый  $b$ -кварк оказался недостаточно тяжелым по сравнению с частицей Хиггса, а  $t$ -кварк настолько тяжел и нестабилен, что его мезоны бесполезны.

Второе – это одно из моих достижений, которыми я больше всего горжусь. Более чем через 30 лет оно имело решающее значение

для открытия частицы Хиггса, как описано на илл. 36 и в тексте рядом с ним.

Третье еще не принесло плоды, но остается интересным. В конечном счете я назвал эти безмассовые частицы «фамилонами», и их продолжают искать.

Четвертое оказалось самым интересным и, возможно, самым важным. Когда я возвратился в лабораторию на следующий день и посмотрел литературу на эту тему, то обнаружил очень интересную статью Роберто Печчеи и Хелен Квинн. Они рассматривали модель, похожую на ту, над которой размышлял я, и обратили внимание на то, что она могла решить очень важную проблему, так называемую проблему  $\theta$ . Ее суть в том, что существует число  $\theta$ , которое, согласно Главной теории, может иметь любое значение в интервале между  $-\pi$  и  $\pi$ , однако наблюдения показывают, что оно очень-очень мало. Это или совпадение, или признак того, что Главная теория является неполной. В модели Печчеи – Квинн это «совпадение» объяснялось как след новой (спонтанно нарушенной) симметрии. Однако Печчеи и Квинн не заметили, что в их модели была новая легкая частица! Поэтому мне выпала честь дать ей имя. За несколько лет до этого я заметил одно моющее средство Axion, название которого походило на имя частицы. Я решил, что, если у меня будет шанс, я назову так частицу. Среди прочего проблема  $\theta$  содержала аксиальный ток. Это дало мне лазейку, с помощью которой можно было незаметно протащить это название мимо бдительных консервативных редакторов журнала *Physical Review Letters*, что я и сделал. (Стивен Вайнберг тоже заметил эту новую частицу независимо от меня. Он собирался назвать ее «хигглетом». Мы договорились, слава Богу, использовать название «аксион».)

У аксиона долгая, запутанная и все еще не законченная история. К этой теме я возвращался много раз, разработав теорию его рождения в ранней Вселенной и предложив возможное существование аксионного фона, аналогичного широко известному микроволновому фону. Согласно этой работе, наблюдать аксионный фон будет трудно, но возможно. Отважная команда блестящих экспериментаторов ведет активный поиск. Когда-нибудь в скором времени аксион, возможно, будет достоин собственной книги, поскольку является главным кандидатом для объяснения темной материи Вселенной. Но он может и не существовать вовсе. Время покажет.

## Часть 4: Подведение итогов

### Перечень взаимодействий и сущностей

У нас есть четыре фундаментальных взаимодействия: гравитация, электромагнетизм, сильное и слабое взаимодействия. Все они теоретически описываются с использованием локальной симметрии. Теория гравитации, или общая теория относительности Эйнштейна, основана на локальной симметрии пространства-времени, в то время как теории других трех взаимодействий – на локальной симметрии пространств свойств.

Общая теория относительности – могущественная теория, и ее совсем не просто освоить. Но она базируется на взаимодействии между обычным пространством-временем и энергией-импульсом, которые являются универсальными понятиями, не требующими подробной записи в нашем списке. Следовательно, мы вовсе не проявляем какого-либо неуважения к этому взаимодействию, когда признаем эту взаимосвязь одним словом «гравитация».

Поскольку поведение вещества относительно других трех взаимодействий определяется потоками в пространствах свойств, мы должны описать геометрию пространств свойств, в которых оно «обитает», чтобы дать корректное описание вещества. Я сделаю это в два этапа, представленных на парных вклейках RR и SS, TT и UU. На первом этапе я обошел вниманием некоторые сложности, к которым вернулся на втором этапе.

На вклейках RR и SS вы можете видеть шесть различных блоков. Внутри блоков написаны названия частиц:  $u$ - и  $d$ -кварки в трех цветах (например, красный, зеленый, и синий  $u$ -кварки) и лептоны  $e$  и  $\nu$  (электрон и нейтрино). Каждый блок кодирует способом, который мы сейчас опишем, возможное пространство свойств для материи. Таким образом, эти шесть блоков представляют шесть различных видов материи, которые занимают различные виды пространств свойств. Некоторые из блоков содержат несколько различных видов частиц; самый большой из них (блок A) содержит шесть. С нашей точки зрения – и, главное, с точки зрения взаимодействия, – различные частицы в одном блоке действительно являются одной и той же сущностью, но видимой в различных положениях в пространстве свойств. Наш перечень содержит 16 различных видов частиц – возмутительно большое число фундаментальных ингредиентов

нашего мира! Но если смотреть глубже, то мы увидим, что эти 16 частиц представляют собой только шесть различных *сущностей* – значительно меньше (но все еще слишком много... мы добьемся большего успеха в следующей главе).

В горизонтальном направлении мы изображаем три измерения пространства сильного заряда (или «цвета»). Блоки, в которых есть три столбца ( $A$ ,  $B$  и  $C$ ), представляют сущности, способные перемещаться в трехмерном пространстве свойств сильного заряда. В вертикальном направлении мы расположили размерности пространства слабого заряда. Блоки, в которых есть две строки ( $A$  и  $D$ ), представляют сущности, которые могут перемещаться в двумерном пространстве свойств слабого заряда.

Объект, представленный блоком  $A$ , может независимо перемещаться в обоих направлениях, таким образом, он может наслаждаться  $3 \times 2 = 6$  размерностями свойств.

Числа рядом с каждым блоком представляют масштаб его одномерного пространства свойств электрического заряда<sup>[76]</sup>.

Наконец, верхние индексы  $L$  и  $R$  обозначают соответственно левый и правый. Ли и Янг показали нам, что только левые кварки и лептоны участвуют в слабом взаимодействии. В нашем перечне это можно понять из того факта, что только блоки с верхним индексом  $L$  содержат две строки. Каждая частица встречается как в левой, так и в правой разновидности, но в разных блоках.

Блок  $F$  особенно интересен. В нем есть только одна запись: правое нейтрино  $\nu R$ . У него нет ни сильного, ни слабого, ни электромагнитного заряда – следовательно, оно невидимо для всех негравитационных взаимодействий. У  $\nu R$  нет доступа ни в одно пространство свойств, и оно должно довольствоваться перемещением в обычном пространстве-времени.

Мы теперь завершаем первый этап нашей переписи.

## Вспомним о семействах

Чтобы завершить нашу переписку Главной теории, мы должны добавить еще два компонента, как показано на вклейке TT и UU (где я также упомянул гравитацию).

Первый компонент – это флюид Хиггса. В минимальной версии Главной теории (которая, как мы уже обсуждали, до сих пор оказывалась адекватной действительности) флюид Хиггса чувствует слабое взаимодействие, но не вступает в сильное взаимодействие. В соответствии

с этим он занимает двумерное пространство свойств, как показано на вклейках ТТ и UU.

Другой компонент – это таинственное утроение всего сектора материи. Наряду с кварками и лептонами, которые мы до сих пор упоминали, – так называемое первое семейство – существуют второе и третье семейства. Они заполняют точно такие же блоки, но новыми «жильцами», следующим образом:

ПЕРВОЕ	ВТОРОЕ	ТРЕТЬЕ
$u$	$c$	$t$
$d$	$s$	$b$
$e$	$\mu$	$\tau$
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$

Таким образом, в дополнение к верхнему  $u$ -кварку мы имеем очарованный кварк  $c$  и топ-кварк  $t$ ; в дополнение к нижнему  $d$ -кварку – странный и красивый кварки  $s$  и  $b$ ; в дополнение к электрону  $e$  у нас есть мюоны  $\mu$  и тау-лептоны  $\tau$ ; и в дополнение к электронному нейтрино  $\nu_e$  – мюонное и тау-нейтрино  $\nu_\mu$  и  $\nu_\tau$ . (Теперь мы должны добавлять нижние индексы, чтобы различать нейтрино между собой.)

Второе и третье семейства играют очень небольшую роль в нашем современном обычном мире.

Но они существуют, и их существование ставит теоретические проблемы – проблемы, которые до настоящего времени не решены. Например, массы частиц находятся в широком диапазоне без какой-либо очевидной логики. Их слабые распады приносят много дополнительных сложностей, вводя с десятков или около того непонятных множителей, значения которых пока не удавалось вычислить теоретически. (Если вы когда-нибудь почувствуете необходимость уязвить физика, который разглагольствует о своей «Теории Всего», просто спросите его об угле Кабиббо.)

В примечаниях в конце книги я разъяснил еще некоторые детали этих «семейных» сложностей и указал некоторые ссылки, воспользовавшись которыми вы можете узнать больше. В оставшейся части этой медитации мы сосредоточимся на аспектах из физической реальности, в которых

красота более очевидна.

## Конец начала

Теперь мы обсудили все аспекты Главной теории: электродинамику Максвелла, КХД и (более схематично) слабое взаимодействие и гравитацию, а также составили список объектов, на которые они действуют.

Главная теория предоставляет полное и уже проверенное в бою математическое объяснение того, как субатомные частицы соединяются, чтобы создать атомы, атомы объединяются, чтобы создать молекулы, а молекулы – чтобы создать вещества, и как все это взаимодействует со светом и излучением. Ее уравнения всеобъемлющи – и все же экономичны; симметричны – и все же приправлены интересными деталями; строги – и все же необычно красивы. Главная теория обеспечивает надежный фундамент для астрофизики, материаловедения, химии и физической биологии.

Таким образом, в значительной мере мы ответили на наш Вопрос. Мир, поскольку мы говорим о мире химии, биологии, астрофизики, машиностроения и повседневной жизни, *действительно* воплощает красивые идеи. Главная теория, которая управляет этими сферами, глубоко укоренена в понятиях симметрии и геометрии, как мы уже видели. И она добивается своей цели в квантовой теории с помощью правил, подобных правилам музыки. Симметрия действительно определяет структуру. Чистая и совершенная Музыка Сфер действительно дает жизнь душе реальности. Платон и Пифагор, мы приветствуем вас!

И все же я чувствую, что ответ, которого мы достигли к настоящему времени, в двух отношениях приводит нас не к концу наших поисков, но только к концу начала.

Во-первых, есть некоторые нерешенные вопросы.

Как я уже упомянул, у нас остается проблема семейств. И астрономы с их открытиями темной материи и темной энергии оказали нам медвежью услугу. (Оказывается, наша блестящая теория касается лишь 4 % полной массы Вселенной! Конечно, вес – это не главное, но все же...)

Если смотреть глубже, наши замечательные ответы позволяют нам придумывать и отвечать на новые, более амбициозные вопросы. И прежде всего есть такой вопрос: являются ли разнородные части Главной теории результатом более глубокого единства? В оставшейся части нашей медитации мы рассмотрим этот вопрос и (я думаю) дадим на него первые

многообещающие ответы.

Во-вторых, перед нами открытые двери.

Поскольку мы, в сущности, достигли понимания того, *что такое* материя, мы находимся в положении ребенка, который только что изучил правила игры в шахматы, или начинающего музыканта, который только что выяснил, на какие звуки способен его инструмент. Такие элементарные знания – это подготовка к совершенному владению искусством, но еще не искусство.

Можем ли мы использовать воображение и вычисления, а не метод проб и ошибок, чтобы разрабатывать материалы будущего? Можем ли мы уловить, что Вселенная говорит посредством гравитационных волн, нейтрино и аксионов? Можем ли мы постичь человеческий разум, молекулу за молекулой, и систематически улучшать его? Можем ли мы разработать квантовые компьютеры и с их помощью создать действительно чуждые формы интеллекта? Задавать такие вопросы – значит обнаружить в зрелости одного Золотого века семена новых.

## Симметрия III: Эмми Нётер – время, энергия и здравомыслие

Симметрия вообще – это Изменение без изменения. Но именно удивительная Эмми Нётер (1882–1935) установила тесную связь между *математической* симметрией физических законов и существованием определенных *физических* величин, которые не меняются. Фраза «*X* не изменяется со временем» довольно труднопроизносима и к тому же содержит отрицание, поэтому вместо нее мы обычно говорим «*X* сохраняется». В этой терминологии теорема Нётер гласит, что симметрии физических законов приводят к сохраняющимся величинам.

Таким образом, в работе Эмми Нётер придуманное нами соответствие

*Идеальное ↔ Реальное*

становится математической теоремой.

Без сомнения, конкретный пример нётеровой пары

*симметрия ⇒ закон сохранения*

был бы сейчас как нельзя кстати. И здесь мы можем продемонстрировать настоящую драгоценность. Я думаю, это действительно самый глубокий результат во всей физике.

В нашем примере симметрия – это то, что называется симметрией относительно трансляции (сдвига) времени. Это непонятное выражение может показаться пугающим, но его значение просто: *те же самые законы физики, которые применимы сегодня, были применимы в прошлом и будут применимы в будущем.*

Допущение о том, что одни и те же законы применимы всегда, возможно, сначала не покажется похожим на допущение симметрии, но на самом деле это одно и то же. Ведь оно говорит, что вы можете *изменить* значение времени, которое появляется в законах физики, добавляя или вычитая константу, *без изменения* содержания законов. (На математическом и физическом жаргоне смещение на постоянную

величину в пространстве или во времени называют «трансляцией», или сдвигом.)

Симметрия относительно трансляции времени – это мудрость Екклезиаста:

Что было, то и будет;  
И что делалось, то и будет делаться,  
И нет ничего нового под солнцем.

И то, что Шекспир оплакивал здесь:

Уж если нет на свете новизны,  
А есть лишь повторение былого  
И понапрасну мы страдать должны  
Давно рожденное рождая снова<sup>[77]</sup>.

это немного другое. Симметрия относительно трансляции времени применима к законам, связывающим события, а не к событиям самим по себе. Если говорить формально, то симметрия относительно трансляции времени – свойство наших динамических уравнений, но она не говорит нам ничего о начальных условиях.

К концу этой интерлюдии я критически рассмотрю предположение о симметрии относительно трансляции времени, но пока позволим себе принять его на веру.

## Время и энергия

Согласно теореме Нётер, любая симметрия физических законов подразумевает сохранение некоторой физической величины. Для симметрии относительно трансляции времени сохраняющаяся величина – это энергия!

Энергия как физическое понятие имеет странную историю. Я бы хотел кратко изложить некоторые основные факты из этой истории, во-первых, потому, что они интересны, и особенно интересны здесь, потому что это подчеркнет значимость идеи Эмми Нётер.

## Краткая история энергии

Сегодня мы понимаем, что энергия заставляет мир работать. Мы ищем ее источники, запасаем ее, обсуждаем ее цену, взвешиваем компромиссные решения, связанные с тем, чтобы получать ее разными способами, и т. д. Однако ее привычность не должна вводить нас в заблуждение относительно присущей энергии странности.

Идея о том, что сохранение энергии – это фундаментальный закон, появилась только в середине XIX в. Даже тогда вопрос, *почему* это должно быть так, был довольно таинственным и оставался таковым до озарения Нётер. И даже сегодня, как я объясню, мне кажется, что мы постигли это еще не до конца.

В борьбе концепций, предшествовавшей ньютоновской ясности, ученые, которые пытались постичь движение, неоднократно обнаруживали в разных видах задач, что *квадрат* скорости тела постоянно оказывается особенно полезной мерой движения тела. Галилей, например, обнаружил, что для тел, движущихся под действием околосредней гравитации, – таких как брошенные камни, пушечные ядра или (он точно это измерил) шары, катящиеся по наклонной плоскости, и маятники – одно и то же изменение в высоте всегда приводит к одинаковому изменению квадрата скорости, независимо от всего остального.

Оглядываясь назад, мы понимаем этот странный результат как пример сохранения энергии. Есть два слагаемых в полной энергии тела – кинетическое и потенциальное. Кинетическая энергия (энергия движения) пропорциональна квадрату скорости тела, тогда как потенциальная энергия (энергия положения) – для гравитации вблизи земной поверхности –

пропорциональна высоте, на которой находится тело. Закон сохранения энергии говорит, что изменения кинетической энергии должны компенсироваться изменениями потенциальной энергии, и это другой способ сформулировать открытие Галилея.

Для нашего рассказа важно, что результат Галилея был не прямым наблюдением, а скорее идеализацией. Он доказал это в виде теоремы, математической модели, пренебрегая сопротивлением воздуха, трением и другими осложнениями, которые всегда присутствуют в реальности. Используя тяжелые шары вместо, скажем, перьев и соблюдая другие предосторожности, Галилей смог провести эксперименты с малым влиянием осложняющих факторов, когда его модель сохранения энергии достаточно точна. Но строго говоря, галилеева версия закона сохранения энергии (вернее, того, что в конце концов стало этим законом) не бывает в точности верна ни для какой реальной системы, и он об этом прекрасно знал. Для Галилея это был всего лишь любопытный факт об идеализированной модели.

В классической механике Ньютона закон сохранения энергии стал более общей теоремой. И все же он оставался скорее идеализацией, чем описанием действительности. Ньютонова теорема о сохранении энергии применима к системам частиц, взаимодействующих между собой посредством сил, величина которых зависит только от расстояний между частицами. В рамках этой модели теорема объясняет, что такое энергия – а именно: это величина, которая появляется в теореме и сохраняется во времени! Опять же оказывается, что полная энергия состоит из кинетической и потенциальной частей. Кинетическая энергия всегда имеет одну и ту же форму. Ее можно вычислить, сложив произведения масс на квадраты скорости для всех частиц и разделив сумму пополам. Потенциальная энергия – это функция взаимного положения частиц, точная форма которой зависит от природы сил. Пока всё в порядке. Но силы трения в ньютоновской механике нарушают сохранение энергии! И хотя этот факт не противоречит теореме Ньютона, так как силы трения не удовлетворяют допущениям теоремы – трение не является силой, зависящей от расстояния между частицами, – он ограничивает применимость теоремы в реальной жизни.

Если мы добавим электродинамику Максвелла, все еще больше усложнится, но основной вывод остается сходным. В расширенной модели мы все еще можем, сделав некоторые допущения, математически вывести теорему о сохранении энергии. Но – прежде всего – меняется смысл энергии! А именно: мы должны ввести третью форму энергии, помимо

кинетической и потенциальной. Появляется также энергия поля, которая – в соответствии с ее названием – зависит от напряженности полей. И только полная энергия – кинетическая плюс потенциальная плюс энергия поля – сохраняется. Хуже того, даже эта более сложная версия закона сохранения энергии выполняется лишь в том случае, если пренебречь трением и электрическим сопротивлением.

Я помню, что, когда впервые изучал все это, я отчетливо почувствовал разочарование и скептицизм. Мне казалось, что так называемый «закон» сохранения энергии был уродливой, громоздкой конструкцией. Каждый раз, когда обнаруживалась какая-нибудь новая сила или эффект, они нарушали существующий «закон», так что приходилось придумывать новый вид энергии, чтобы как можно лучше залатать дыры, и даже после этого могли появиться новые течи. Ни в ньютоновской механике, ни в максвелловской электродинамике сохранение энергии не является точным и общим законом. Кажется, что это скорее полезный, но приблизительный результат, применимый в ограниченном числе случаев. Так как он не был, насколько я мог видеть, глубокой концептуальной основой и в любом случае оставался только приблизительным, я не видел причин ожидать, что закон сохранения энергии мог быть верным проводником к чему-либо существенно новому.

Идея о том, что сохранение энергии может быть фундаментальным принципом, который выполняется в точности, возникла постепенно в середине и в конце XIX в. Это было открытие, вдохновленное потребностями техники.

На протяжении истории человечество испробовало множество способов, чтобы заставить предметы двигаться, желая преуспеть в полезных задачах, таких как транспортировка людей и товаров, осада крепостей, изготовление муки, и в массе других приложений. Во время Промышленной революции машины стали основой экономической жизни, и их оптимизация стала важным делом, поэтому задача о том, как приводить их в действие, интенсивно изучалась как экспериментально, так и теоретически. Размышление об энергии и ее преобразованиях оказалось самым плодовитым подходом. А именно: выяснилось, что на практике (мнимые) нарушения закона сохранения энергии в результате таких явлений, как трение и электрическое сопротивление, всегда приводят к *потере* энергии. (Практический вывод состоит в том, что нужно сосредоточиться на цене энергии в любой ее форме и на уменьшении ее потерь.) Эта тенденция терять, но никогда не приобретать энергию объяснила неудачи инженеров в создании

автономных самодвижущихся машин – так называемых вечных двигателей, – а также помогла понять, почему вообще машинам нужны источники энергии. Также было замечено, что *потеря* энергии всегда сопровождается *выработкой* теплоты. Несколько ученых с разной степенью доходчивости трактовали эту ситуацию в позитивном ключе. Они предположили, что сохранение энергии – это действительно общая истина, но, чтобы понять это, нужно осознать, что тепло – это еще одна форма энергии. Вдохновленный этой точкой зрения, Джеймс Прескотт Джоуль провел серию изящных опытов, в которых использовал падающие грузы, чтобы приводить в движение гребные колеса, нагревающие воду, чтобы численно продемонстрировать основную идею: известное количество энергии (от падающего тела) производит пропорциональное ему количество тепла.

После этого триумфа научный мир принял сохранение энергии в качестве рабочего принципа. Природа заговорила, и она ясно дала понять, что есть что-то очень правильное в этой идее.

Но в отсутствие более глубокого доказательства, чем факт, что «это работает», закон оставался одновременно таинственным и сомнительным. «Это работает» в действительности означает, что «это работало до сих пор». Нельзя было быть уверенным, что какое-нибудь новое открытие не обнаружит каких-нибудь червоточин. Такое уже случалось. Сохранение *массы* было краеугольным камнем ньютоновской механики, и оно действительно очень хорошо служило в качестве рабочего принципа больше двух столетий как в небесной механике, так и во всех видах инженерных приложений. Сохранение массы тщательно проверил и начал использовать Антуан Лавуазье в экспериментах, отметивших начало современной количественной химии. Однако в XX в. грубое нарушение сохранения массы является обычным явлением в экстремальной физике. На электрон-позитронном коллайдере высоких энергий при столкновении двух очень легких частиц (электрона и позитрона) зачастую образуются десятки частиц, полная масса которых в целом во много тысяч раз превышает полную массу начальных частиц!

Пока энергия выглядела мешаниной многих разных ее видов – кинетической (мера движения), потенциальной (мера положения), энергии поля (вообще говоря, мера сил, действующих на заряды и токи), тепловой (мера изменений температуры) и других, которые я не упомянул, – она казалась открытой для дальнейших видоизменений или, возможно, даже для исключения каких-то видов.

Эмми Нётер рассмотрела понятие энергии самым внимательным

образом. Обосновав сохранение энергии однородностью физических законов во времени, она показала ее истинную сущность и обнажила ее скрытую красоту. С помощью математического волшебства Эмми Нётер превратила неуклюжую лягушку в прекрасную принцессу. Появление благодаря технике современного понятия сохранения энергии, достигающего наивысшей точки в объяснении Нётер его происхождения из симметрии, – это изумительный пример того, как

### *Реальное → Идеальное.*

Могло ли сохранение энергии пойти тем же путем, что и сохранение массы? В науке священна только реальность, и реальность может преподносить сюрпризы, готовы мы к ним или нет. Но теорема Нётер повышает ставки: если вдруг окажется, что энергия не сохраняется, мы будем должны пересмотреть фундаментальные понятия, которые используем для формулировки законов физики, или наши идеи об однородности времени, или и то и другое. Большинство из нас считает такой результат предупреждением, которое говорит нам, что размышления о нарушении сохранения энергии, если Природа не дает для них поводов, вряд ли будут плодотворны. Зачем напрашиваться на неприятности?

### **Больше уроков от Нётер**

Однородность физических законов в пространстве, подобно их однородности во времени, представляет некий род симметрии, который называется пространственной трансляционной симметрией. Согласно теореме Нётер, должна существовать соответствующая сохраняющаяся величина. И это *импульс*. Физические законы должны также выглядеть одинаково, если смотреть с различных направлений. Это еще один закон симметрии, названный вращательной симметрией. Согласно теореме Нётер, должна быть соответствующая сохраняющаяся величина, и она есть: *это момент импульса*. Как и сохранение энергии, эти великие законы сохранения имеют долгую и выдающуюся историю. Они были выведены для особых случаев и при более строгих предположениях до Нётер. Действительно, один из законов Кеплера – о планетах, заметающих равные площади в равные промежутки времени, – отражает сохранение момента импульса, поскольку скорость этого заметания пропорциональна величине

момента импульса. Но теорема Нётер, связывая их с простыми качественными аспектами физической реальности, дает нам глубокое понимание того, *почему* эти законы существуют.

На переднем крае современной физики, как мы скоро обсудим, теорема Нётер стала важнейшим инструментом для совершения открытий. С ее помощью мы связываем теоретическую эстетику возможной симметрии и вопрос

*Красивы ли мои уравнения?*

с суровой действительностью физического измерения и вопросом

*Верны ли мои уравнения?*

Все это было очень успешным и вдохновляющим, и все же я чувствую, что не хватает еще чего-то важного. И я такой не один: сам Нильс Бор, когда он столкнулся в 1920-е гг. с экспериментами с радиоактивностью, вызвавшими его недоумение, недолгое время рассматривал идею о том, что энергия не сохраняется. Лев Ландау, еще одна уважаемая среди физиков фигура, позже предположил, что звезды нарушают сохранение энергии. (Источник энергии для звезд – термоядерные реакции – не был ясен до середины XX в.)

Все выводы основываются на предположениях, и теорема Нётер не исключение. На самом деле предположения, заложенные в теореме Нётер, довольно абстрактны, специальные, и их трудно точно определить. (Для экспертов: теорема доказана для систем, уравнения которых получены путем вариации лагранжиана. Есть достаточные основания восхищаться системами, которые могут быть описаны таким образом, но причины эти сложны, и неясно, по крайней мере мне, почему они обязательны – и обязательны ли) Мне кажется, что такой важный, просто сформулированный результат должен иметь более прямое, интуитивное объяснение. Если бы оно у меня было, то я был бы счастлив им поделиться. В данный момент все, что я могу сказать, – это то, что я все еще в поиске!

## Эмми Нётер собственной персоной

Великий результат Эмми Нётер в математической физике, который мы здесь обсуждаем, был демонстрацией силы молодости. Ее основной работой в жизни была чистая математика. Более того, ее специальностью было придание строгости математике. Она сделала алгебру намного более абстрактной и гибкой – так, чтобы приспособить замысловатые конструкции, придуманные изобретательными математиками, для использования в алгебраической геометрии и теории чисел. Упрощая основы, Эмми Нётер предложила творческие способы работать на этих основах.

Преследуя свою страсть, она преодолевала суровые испытания и предубеждения. Давид Гильберт хотел, чтобы Эмми Нётер работала вместе с ним на ведущем в мире математическом факультете в Гёттингене. Гильберт писал: «Не понимаю, почему пол кандидата служит доводом против нее... Ведь здесь университет, а не баня» – но его мнение не стало решающим. Эмми Нётер оставили на какое-то время в качестве приглашенного лектора, которому не платили. Но, будучи не только интеллектуальной женщиной, но еще и еврейкой, с подъемом нацизма она была вынуждена бежать из Германии. Герман Вейль позже писал, отдавая дань ее духу в то время испытаний:

Эмми Нётер – ее храбрость, ее откровенность, ее безразличие к собственной судьбе, ее примирительный дух – были посреди всей ненависти и подлости, отчаяния и горя, окружавшего нас, моральным утешением.



Илл. 37. Эмми Нётер, математик и благородный человек

Другие свидетельствуют о ее самоотверженности, ее великодушии и прежде всего о ее страстной преданности математике. Она часто забывалась, по словам ее студентки Ольги Таусски, «яростно жестикулируя», и не замечала, когда шпильки вылетали из ее длинных волос, свисавших из-за этого в беспорядке. Когда я думаю о работе Эмми Нётер и читаю выдержки из ее биографии, мне вспоминается, как Новалис описывал Спинозу как «человека, опьяненного богом». Эмми Нётер была женщиной, опьяненной математикой.

Эта фотография Эмми Нётер в 20 лет, похоже, запечатлела ее дух.

## Симметрия, здравомыслие и мировая конструкция

Босуэлл в его «Жизни Сэмюэля Джонсона» рассказывает о следующем эпизоде:

После того как мы вышли из церкви, мы некоторое время стояли и разговаривали друг с другом об оригинальной софистике епископа Беркли, доказывающей, что материи не существует и что всё во вселенной всего лишь идеал. Я заметил, что, хотя мы убеждены, что его доктрина не верна, ее невозможно опровергнуть. Я никогда не забуду проворство, с которым Джонсон ответил, ударяя ногой с огромной силой по большому камню так, что это заставило его отскочить: «Я опровергаю ее *так*».

Дэвид Юм, подражая Беркли, придумал более сложные аргументы за радикальный скептицизм. Юм не видел способа доказать предположение о том, что физическое поведение однородно во времени. Но без этого предположения никакой прогноз не был надежным – даже, например, прогноз о том, что завтра взойдет солнце. И все же предположить однородность поведения, согласно Юму, – это иррациональный смелый шаг. Бертран Рассел заключил исследование Юма в незабываемой шутке:

Человек, который каждый день кормил цыпленка в течение всей его жизни, наконец вместо этого скручивает ему шею, показывая, что более совершенные представления относительно однородности Природы были бы полезны для цыпленка.

И Рассел продолжил:

Поэтому важно обнаружить, есть ли какой-нибудь ответ Юму в рамках полностью или главным образом эмпирической философии. В противном случае нет никакого интеллектуального различия между здравомыслием и безумием.

В этом разделе, вдохновленном Джонсоном, я собираюсь бросить

вызов Юму и Расселу.

Чтобы обезопасить мир для здравомыслия, давайте вернемся к основам и рассмотрим, что значит найти основание для веры. Мы начнем с известного силлогизма Аристотеля, с которого началось изучение логики как самостоятельного предмета. На первый взгляд, это классическое построение

Все люди смертны.  
Сократ – человек.  
Следовательно, Сократ смертен.

производит впечатление глубины и логической мощи. Человек выводит новое заключение с уверенностью из старых фактов.

Однако по размышлении оно может начать казаться пустым. В конце концов, мы имеем право утверждать, что «каждый человек смертен», только если мы уже знаем, что Сократ – определенный человек – смертен. Таким образом, это рассуждение оказывается глубоко и неизбежно зацикленным.

И все же трудно избавиться от ощущения, что здесь происходит что-то полезное и нетривиальное. Глубокая мысль, я думаю, состоит в том, что мы можем быть более уверены в *общем* утверждении «Все люди смертны» и в отождествлении «Сократ – человек», чем в определенном суждении «Сократ смертен», если оно утверждается независимо от этой информации.

Сила утверждения «Все люди смертны», конечно, происходит не из проведения полной переписи человечества, с последующей индивидуальной проверкой того, что каждый член этого класса умер. Для начала – многие из нас еще не умерли! Скорее это результат общего понимания того, что значит быть человеком, в особенности включая недолговечность человеческих тел, физиологию человеческого старения и т. д. Бессмертное существо должно было бы очень значительно отличаться от «человека» (в общепринятом смысле этого слова) так сильно, что мы бы дали ему какое-то иное определение. И Сократ хотя и был, очевидно, необычным человеком, но его родителями, судя по всему, были люди, он обладал таким же человеческим телом, как и другие, мог быть ранен в сражении, вырослел и старел с такой же скоростью, как и другие... Короче говоря, Сократ легко подпадал под категорию «человек». Так что данный силлогизм был к нему применим даже до того, как Сократ умер – что он в конечном счете, несомненно, сделал.

Кстати, для Аристотеля было бы более показательным и действительно

индуктивно использовать *другой* пример, не так ли?

Всякий человек смертен.  
Аристотель – человек.  
Следовательно, Аристотель смертен.

Это сделало бы его более гуманным. Кроме того, обучая своего известного ученика Александра Македонского, Аристотель мог бы использовать такой вариант:

Все люди смертны.  
Александр – человек.  
Следовательно, Александр смертен.

Это могло бы изменить ход истории, убедив Александра Македонского лучше заботиться о себе. Но более вероятно, что Аристотель за такое был бы уволен или того хуже.

Однажды, и возможно, уже скоро, когда медицинские технологии улучшатся и/или человеческий разум выйдет за пределы традиционных человеческих тел, нам, возможно, придется пересмотреть суждение «Всякий человек смертен». Например, статус этого силлогизма может оказаться сомнительным:

Всякий человек смертен.  
Рей Курцвейл<sup>[78]</sup> – человек.  
Следовательно, Рей Курцвейл смертен.

Но когда этот счастливый день придет (если придет), люди вместо этого начнут силлогизм словами «Все древние люди были смертны» или чем-то вроде того и продолжают как прежде, но теперь добавляя более тонкие различия. В любом случае смертность Сократа, Аристотеля и Александра никогда не была под серьезным сомнением, даже задолго до того, как они на самом деле умерли, и именно по причине, выраженной в силлогизмах, если их правильно понимать.

Главная мысль для наших нынешних целей состоит в том, что более широкие и прочные основания делают выводы более достоверными. Общие суждения могут быть для конкретных утверждений полезным каркасом, даже если кажется, что последние утверждают строго меньше.

Что насчет курицы Рассела? Она рассуждает:

Каждый день Хороший Фермер кормит меня.  
Завтра будет еще один день.  
Хороший Фермер покормит меня завтра.

Это выглядит очень похоже на предыдущие силлогизмы! Но внешность – не главное. Хотя этот силлогизм имеет ту же логическую форму, его фактическое содержание довольно сильно отличается. Достаточно умная курица заметила бы, что Хороший Фермер дает курице еду немного разными способами или в разное время изо дня в день и что Хороший Фермер делает много всего другого. Достаточно умная курица попыталась бы создать теорию, которая объясняла бы больше действий Хорошего Фермера, и – если бы это была особенно проницательная курица – она бы начала думать о Хорошем Фермере как о корыстной личности со своими мотивами. Курица также могла бы заметить, что Хороший Фермер и его семейство едят продукты биологического происхождения, что собирается урожай, что животные на ферме время от времени загадочно исчезают и т. д. В этот момент курица начала бы подозревать, что грядет Судный день, когда Хороший Фермер *не* будет вести себя так, как предполагает первая строка. В то время как утверждение «Все люди смертны» выдерживает тщательную проверку и является частью всеобъемлющего, последовательного мировоззрения, суждение «каждый день Хороший Фермер кормит меня» не является таковой.

Чтобы принять вызов Рассела, ответить Юму и защитить здравомыслие, мы должны обосновать наше допущение о единообразии Природы. Мы можем сделать это предположение более достоверным, как обсудили только что, дав ему более широкие и более прочные основы. Наша формулировка однородности во времени как утверждения о симметрии физических законов помогает сделать это в нескольких смыслах. Мы можем сделать из этого много выводов, которые ни в коем случае не очевидны, но которые оказываются достоверными свойствами физического мира. Проще всего будет повторить точные измерения в разное время и проверить, согласуются ли их результаты. Получая доступ к информации об удаленных звездах и галактиках, мы глубже изучаем прошлое, потому что свет движется с постоянной и конечной скоростью. Мы можем убедиться, что их спектральные линии в прошлом имели ту же структуру, как и те, что мы видим сегодня. Так мы находим подтверждение, что тогда работали те же самые законы атомной физики, что и сейчас. И, вдохновленные Нётер, мы можем проверить сохранение энергии!

Это ни в коем случае не попытка позолотить лилию<sup>[79]</sup>, поскольку сохранение энергии получает отличную проверку в анализе взаимодействий элементарных частиц, в которых исследуются очень экстремальные условия.

Теперь, когда все эти и другие проверки были выполнены с большой тщательностью и точностью, доводы в пользу здравого смысла непоколебимы.

Чтобы завершить это обсуждение, мы должны отметить еще два факта однородности физических законов, помимо однородности во времени, которые почти в той же мере являются основополагающими в устройстве мира: однородность в пространстве и однородность вещества. Однородность в пространстве, которую мы упоминали ранее, проверяется в тех же лабораторных и астрономических тестах, что и однородность во времени. Кроме того, вдохновленные Нётер, мы можем проверить ее иначе – проверяя сохранение импульса! Опять же это ни в коем случае не попытка позолотить лилию, потому что сохранение импульса проходит тщательную проверку в анализе реакций элементарных, где исследуются очень экстремальные условия.

Наконец, есть *однородность вещества* – тот наблюдаемый факт, что у всех электронов (например) абсолютно одинаковые свойства. Это допущение неявно подразумевается в любом приложении современной атомной физики, электроники и химии. Хотя оно часто считается само собой разумеющимся, это абсолютно неочевидно.

В человеческом производстве использование взаимозаменяемых частей было революционным новшеством, достижение которого потребовало тяжелого труда. Тем не менее задолго до новшеств Сэмуэла Кольта и Генри Форда Творец Природы предвидел достоинства взаимозаменяемых частей. В сегодняшней Главной теории взаимозаменяемость электронов следует из того факта, что все электроны (например) являются минимальными возбуждениями – квантами – вездесущего, заполняющего мир электронного флюида, и того, что свойства этого флюида однородны в пространстве и времени. Таким образом, в рамках квантовой теории однородность вещества не требует отдельных допущений. Она вытекает из однородности пространства и времени, а следовательно, как нас учила Эмми Нётер, из симметрии.

# **Квантовая красота IV: Доверяем красоте**

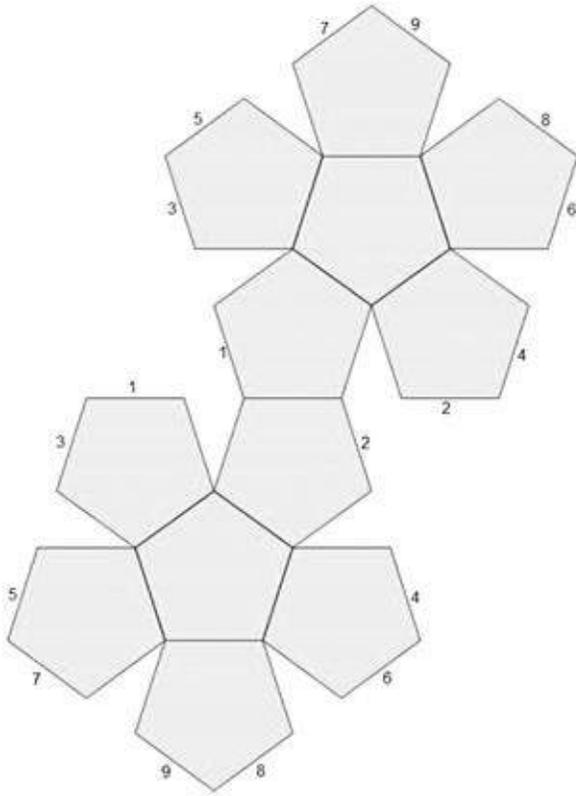
## Притча о додекаэдре

Додекаэдр уже появлялся несколько раз в нашей медитации. Будучи одним из пяти платоновых тел, он воплощает немало геометрической симметрии. Согласно самому Платону, это форма Вселенной в целом. Мы видели, как Сальвадор Дали использовал символизм додекаэдра, чтобы выразить космическое соединение, которое могло бы быть трудно перенести на холст иначе. Мы также нашли додекаэдр, скрывающийся в пределах каждого из бесконечного разнообразия фуллеренов, где его 12 пятиугольников обеспечивают шестиугольникам графена возможность образовать замкнутую поверхность.

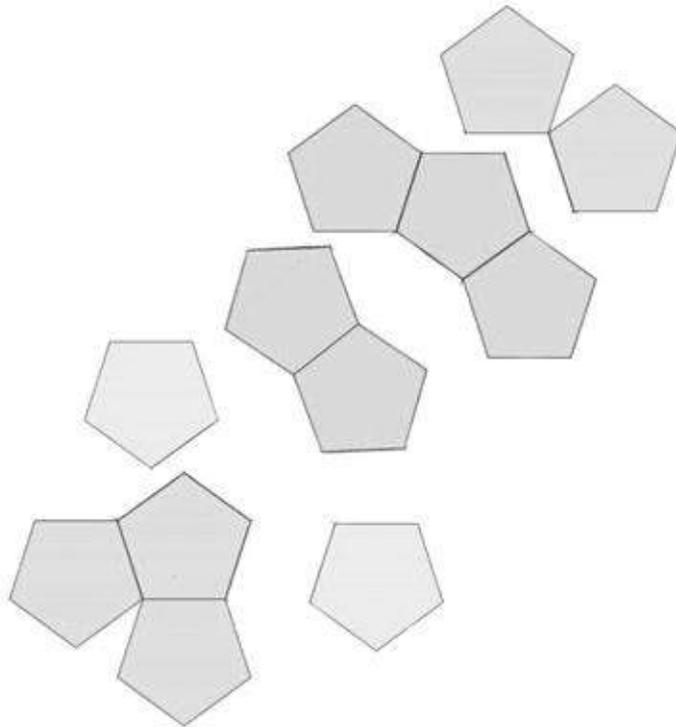
У додекаэдров также есть одно очень практичное применение: в качестве настольного календаря. Они прекрасно подходят для этого, поскольку имеют 12 граней, совершенно одинаковых, так что вы можете поместить по месяцу на каждой. В Интернете легко можно найти инструкции, как сделать такие календари, вырезав их из жесткой бумаги или картона.

Додекаэдр – красивая вещь, и к настоящему времени он стал нам близким другом.

Теперь предположим, что некий игривый дух хочет проверить наш характер или дать нам радость решения милой головоломки. Он разъединяет части схемы и убирает метки, и мы получаем загадку, изображенную на илл. 39.



Илл. 38. Этот красивый чертеж позволит вам сделать додекаэдр. Для этого нужно начертить такую схему на жесткой бумаге или картоне, затем вырезать по границам и согнуть вдоль внутренних сплошных линий так, чтобы одинаково обозначенные стороны оказались вместе



Илл. 39. С разделенной на части схемой изображение становится более трудным для интерпретации, но очевидные намеки на его происхождение остаются. Знакомство с додекаэдром приведет нас от этого набора кусочков обратно к илл. 38 и оттуда к нашему платонову додекаэдру

Здесь труднее понять, что мы видим. Большинство людей, которые в последнее время, возможно, не очень-то думали о додекаэдрах, не знало бы, что сделать с этой неполной схемой. Но те из нас, кто медитировал о красоте и ее воплощениях, подготовлены к этому испытанию. Двенадцать идентичных, правильных пятиугольников, у некоторых пар общая сторона, некоторые тройки готовы образовать вершины – это сразу наводит на мысль! Мы распознаем скрытый потенциал чертежа и готовы сделать из него что-то красивое.

Помня об этом триумфе, давайте теперь возвратимся к нашей Главной теории. Она описывает огромное изобилие фактов – точных количественных наблюдений о физическом мире – с помощью очень небольшого набора уравнений. Она является, как мы уже обсуждали, более чем достаточной основой для химии, инженерного дела, биологии (вероятно), астрофизики и большей части космологии. К тому же она изящна. У уравнений Главной теории есть глубокие корни в симметрии. Поэтому мы можем восстановить всю Главную теорию из нескольких

общих правил о том, к каким пространствам свойств имеют доступ различные частицы, и указаний о том, какой (локальной) симметрией должны обладать эти пространства. Мы можем указать необходимые данные на достаточно простых резюмирующих иллюстрациях (см. вклейки TT и UU).

Главная теория замечательно описывает Природу. Было бы трудно преувеличить ее точность, ее мощь или ее красоту. И все же ценители предельной красоты не будут удовлетворены. Именно *потому*, что она так близка к окончательному описанию Природы, мы должны поддерживать Главную теорию на максимально возможном уровне эстетических стандартов. Если тщательно исследовать ее в таком критическом духе, Главная теория обнаруживает недостатки.

- Она содержит три математически похожих взаимодействия: сильное, слабое и электромагнитное. Все они являются воплощением общего принципа: локальной симметрии пространств свойств. И гравитация – это четвертое взаимодействие. Она также основана на локальной симметрии, хотя и другого рода: локальной галилеевой симметрии. Гравитация также является намного более слабой, чем другие взаимодействия. Было бы убедительнее и красивее иметь одну основную симметрию и одно всеобщее взаимодействие, которые бы давали согласованное описание Природы. Три (или четыре) определенно больше одного, следовательно, мы еще не пришли к цели.

- Что еще хуже, даже после того, как мы установили частицы, которые «на самом деле» являются одной и той же сущностью, по-разному расположенной в своем пространстве, мы оказываемся с шестью не связанными между собой «фундаментальными» объектами. Шесть также определенно больше одного.

- У нас также есть утроевание семейств, которое представляется бессмысленным.

- У нас также есть флюид Хиггса, который играет уникальную и важную роль в теории, но пока выглядит еще одной независимой движущейся частью. Флюид Хиггса был введен, чтобы залатать дыры (что он и делает), а не для красоты (и он ее не добавляет).

Нужно признать, что в целом это, конечно, топорная громоздкая конструкция, и суровый критик мог бы назвать ее беспорядочной.

Мог ли Мастер, когда Он грубо высек Главную теорию, сказать, что уже хорошо поработал, и остановиться на этом?

Прежде чем согласиться с этой скандальной мыслью, давайте

возвратимся к уроку додекаэдра. Мы видели на его примере, как красота – и, в частности, симметрия – предлагает захватывающую интерпретацию того, что иначе могло бы показаться случайным беспорядком. Понимание возможных симметрий объектов в пространстве привело нас к осознанию того, что есть только горстка платоновых тел, и это знание позволило нам узнать лежащий в основе додекаэдр по частичным, искаженным признакам.

Главная теория основана на более сложных формах симметрии, чем вращения обычного трехмерного пространства, и на менее привычных нам объектах (пространства свойств), чем додекаэдр. Однако мы можем проверить похожую идею. Возможно ли, что фрагментарная симметрия Главной теории и выглядящие кособокими и разрозненными объекты, на которые она распространяется, является частью большей симметрии, действующей на больший объект, связи которого были скрыты от нашего взгляда?

Если мы найдем положительный ответ на этот математический вопрос, то это подскажет нам новые физические теории, которые могли бы преодолеть недостатки Главной теории. Янг и Миллс показали нам, как, сделав предположение о симметрии и о ее действии на пространства свойств, создать соответствующую теорию взаимодействий и частиц. В такой конструкции симметрии воплощаются их аватарами, калибровочными частицами (например, цветными глюонами, векторами, фотонами), с помощью которых переносятся взаимодействия. Наша гипотетическая большая симметрия даст нам все эти взаимодействия в Главной теории и даже больше.

Благодаря математикам конца XIX и начала XX вв. – Софусу Ли и его последователям – у нас есть полный набор кандидатов на роль той самой симметрии и того самого пространства, так что мы можем посмотреть, отвечает ли какой-то из кандидатов всем требованиям. Так же как существует всего несколько правильных многогранников, оказывается, что существует всего несколько кандидатов на роль большей симметрии, которые могли бы объединить симметрии Главной теории (подобно вращениям додекаэдра), и еще меньше разумных возможностей для пространств свойств, которые могут объединить таковые пространства Главной теории (как грани додекаэдра).

Когда возможности столь ограничены, успех сомнителен. Если перекошенное, разобщенное изображение на илл. 39 было бы перекошено и разъединено по-другому – скажем, три пятиугольника окружали бы треугольную дыру, или их было бы тринадцать, или пятиугольники были бы разных размеров, или там была бы смесь пятиугольников

и квадратов – наша попытка объяснить, что это такое, основываясь на скрытой симметрии, потерпела бы неудачу. Точно так же перекошенная, разобщенная структура Главной теории должна быть перекошена и разобщена тем самым правильным способом, чтобы соответствовать схеме большей симметрии. Поэтому, если мы действительно найдем схему, которая будет соответствовать, это вряд ли будет совпадением. Вероятно, находка будет что-то значить!

Поэтому приятно обнаружить, что одна из возможных симметрий Ли, действующих в красивом пространстве свойств, хорошо согласуется с действительностью. Объединяющая симметрия содержит сильно-слабо-электромагнитные симметрии Главной теории. Она может действовать в пространстве свойств, у которого именно тот правильный размер и форма, чтобы вместить известные кварки и лептоны. И самое главное, она не содержит ничего другого. (Для экспертов: симметрия основана на группе вращений в десяти измерениях, обозначаемой  $SO(10)$ . Пространство свойств основано на 16-мерном спинорном представлении этой группы. Эта структура была обнаружена Говардом Джорджи и Шелдоном Глэшоу.)

Пожалуйста, сделайте сейчас перерыв, чтобы хорошо рассмотреть вклейки VV и WW, которые документируют это открытие. Последующее обсуждение обстоятельно объясняет эти иллюстрации, являясь своего рода развернутой подписью к ним. Вы найдете в нем всю информацию, которую вам нужна, чтобы понять, как вклейки VV и WW кодируют содержание вклеек RR и SS, суммирующих Главную теорию. Основной поток нашей медитации полагается только на подробное описание в тексте. Более тонкие детали украшают последние страницы в примечаниях. Мне показалось важным сделать подробности этого изумительного результата доступными для ознакомления. Вы сами можете решить, насколько глубоко хотели бы в них погрузиться.

Частицы Главной теории в этой новой теории населяют шесть отдельных пространств свойств различной формы, как описано в предыдущей главе. Иначе мы можем сказать, что они образуют шесть различных сущностей.

В нашей объединенной теории большая симметрия соединяет эти пространства свойств, сводя все частицы в единую сущность, или мультиплет. Это объединение материи повторяет то объединение, которого мы достигли для разъединенных, кривых частей нашего таинственного рисунка, когда мы распознали их принадлежность к додекаэдру. Точно так же, как стороны додекаэдра все связаны

посредством соответствующих вращений, здесь все частицы связаны друг с другом математической симметрией – и так же посредством конкретных физических преобразований!

На вклейках VV и WW в верхнем левом углу страницы мы видим довольно абстрактную таблицу из знаков + и -. В ней 5 столбцов и 16 строк. Различные строки содержат все возможные распределения пяти знаков + и - с тем ограничением, что общее количество знаков + должно быть четным.

Верхний правый угол начинает процесс разворачивания этой абстрактной схемы в физическую реальность. Структура таблицы остается такой же, но теперь столбцы интерпретируются как представления различных сильных и слабых цветовых зарядов (позднее выяснится, что строки представляют частицы вещества). Первые три столбца соответствуют трем сильным цветовым зарядам: красному, зеленому и синему в указанном порядке. Последние два столбца отображают два слабых цветовых заряда: желтый и фиолетовый. Мы преобразуем нашу предыдущую таблицу со знаками + и - в новый формат, помещая небольшие закрашенные кружочки соответствующего цвета в ячейки, где были знаки +, и небольшие полые кружочки соответствующего цвета туда, где были знаки -.

Закрашенные кружочки (полученные из знаков +) будут интерпретироваться как  $\frac{1}{2}$  от единицы заряда. Таким образом, закрашенный красный кружок соответствует половине единицы красного цветового заряда и т. д. (Гениальность этого множителя,  $\frac{1}{2}$ , вскоре проявится.) Полые кружки (полученные из знаков -) будут интерпретироваться как  $-\frac{1}{2}$  заряда.

Под двумя верхними таблицами выписана математическая формула, определяющая величину  $Y$  как простую числовую комбинацию цветов. Помните, что в перечне компонентов вещества в Главной теории, изображенном на вклейках RR и SS, были странные числа, соответствующие электрическим зарядам. Эти странные заряды в рамках Главной теории были независимы от сильных и слабых цветов – их просто выбрали так, чтобы соответствовать результатам экспериментов. Совсем скоро вы увидите, как эти гадкие утята Главной теории вырастают в великолепных лебедей в нашей объединенной теории. А пока заметьте только, что я записал значения  $Y$ , которые мы получаем, применяя формулу к разным строкам, в среднем столбце между двумя верхними таблицами.

Левый нижний угол – всего лишь копия правого верхнего угла, продублированная там для простоты чтения. Точно так же воспроизведен

и средний столбец чисел.

Нижняя правая таблица – результат переработки и упрощения левой нижней с применением сильного и слабого правил «отбеливания». Позвольте мне пошагово показать вам этот процесс для первой строки; для остальных мы действуем таким же образом. Согласно сильному правилу «отбеливания», равная смесь красного, зеленого и синего зарядов никак не влияет на сильное взаимодействие. Поэтому мы можем упростить наше описание сильных цветовых зарядов частицы в первой строке, в той ее части, где мы имеем дело с сильным взаимодействием, добавляя половину заряда к каждому красному, зеленому и синему заряду. Эта операция уничтожает существовавшие до того отрицательные половинки зеленого и синего зарядов и увеличивает красный заряд до единицы. В правой нижней таблице мы изображаем результат – большой красный кружок – и уже ничего не проставляем на месте зеленого и синего. Возвращаясь к слабой части строки, мы добавляем по половинке заряда к желтому и фиолетовому и проводим затем слабое «отбеливание», чтобы получить полный желтый заряд и нулевой фиолетовый заряд.

И теперь волшебство раскрыто! Список частиц и свойств, к которому мы приходим, шаг за шагом перерабатывая начальную абстрактную таблицу в верхнем левом углу, точно соответствует перечню компонентов вещества Главной теории (вклейки RR и SS). Первая строка, например, соответствует верхней левой записи сущности A. Стандартные имена частиц показаны на вклейках VV и WW в последнем столбце правой нижней таблицы, и они помогут вам в поиске.

Это упражнение приносит истинную радость, и я настоятельно рекомендую вам проследить за каждым из 16 соответствий. Прежде чем вы попробуете его выполнить, есть одна, последняя тонкость, которая все еще нуждается в упоминании. Правые частицы Главной теории представлены здесь через их левые античастицы. Поэтому, если вы видите знак – перед названием, вы должны обратить знаки всех зарядов (включая Y) и искать соответствие среди правых частиц.

Это завершает нашу «подробную подпись» к иллюстрации.

Каков же итог? Глядя на строки таблиц на канонических объединительных вклейках VV и WW, мы находим в них идеальное соответствие частицам вещества Главной теории, показанным в ее каноническом синтезе на вклейках RR и SS! Там мы изучили мир – Реальный мир – и классифицировали его частицы. Здесь наш отправной пункт был совсем другим. Мы начали с Идеального – с пространства большей симметрии, выдвинутого в качестве кандидата на пространство

свойств, – и вывели математически свойства частиц, которые содержатся в его теории локальной симметрии (Янга – Миллса). Пройдя двумя столь разными путями, мы прибыли в один и тот же пункт назначения. Новый путь – это более объединенное, принципиальное описание. Оно содержит большую часть того, что мы знаем о мире Материи, в построении, созданном чистым Разумом. Это великолепный пример, когда:

*Реальное ↔ Идеальное.*

## Проверка реальностью

Если это верно, тогда это...

Математика симметрии открыла заманчивую перспективу. Она схематично изобразила путь, ведущий от красивых идей к управляющей миром Главной теории и за ее пределы. Все это напоминает своей эстетической вдохновенностью и смелостью атомизм Платона, но все же несравнимо более сложный и точный.

Но возникает две серьезные проблемы, когда мы пытаемся развить этот грубый эскиз до портрета реальности. Одну просто решить, другая – более сложная. Она завлечет нас в интересное приключение, конечная точка которого до сих пор не ясна.

Давайте начнем с более простой. Расширенная теория содержит гораздо больше калибровочных частиц (частиц взаимодействий), чем Главная теория, и поэтому гораздо больше трансформирующих взаимодействий. А именно: у нас имеются не только цветные глюоны, которые превращают один сильный цветовой заряд в другой, и виконы, которые превращают один слабый заряд в другой, но также и мутатроны, которые превращают единицу сильного цветового заряда в единицу слабого цветового заряда. (В литературе нет никакого устоявшегося названия для этих частиц, поэтому я придумал это. Смысл шутки в том, что мутатроны производят мутации.) Например, есть мутатрон, который преобразовывает единицу красного заряда в единицу фиолетового заряда. Эта операция преобразует первую строку вклеек  $VV$  и  $WW$  в 15-ю, как вы можете сами проверить. Следовательно, взаимодействие с этим конкретным мутатроном превратит красный кварк в позитрон. Но таких процессов никогда не наблюдалось. Если мутатроны существуют, почему мы не видели их эффектов?

К счастью, эта проблема очень похожа на проблему, с которой мы столкнулись в теории слабого взаимодействия и решили ее. Как вы можете вспомнить, «чистая» локальная симметрия предсказывает, что виконы, подобно фотонам и цветным глюонам, обладают нулевой массой. Но если бы это было так, то их влияние было бы намного более мощным, чем то, которое фактически наблюдается. Эту проблему решает механизм Хиггса. Заполняя пространство соответствующим веществом, теоретики сделали виконы тяжелыми и согласовали Реальное с Идеальным. До фактического открытия частицы Хиггса многие физики скептически

относились к этой смелой идее<sup>[80]</sup>, но теперь Природа очень красноречиво засвидетельствовала это сама.

Расширенная версия той же самой простой идеи способна придать очень большие массы нежелательным мутатронам объединенной теории и тем самым подавить все их нежелательные эффекты. Мы просто заполняем мир – или, если выразиться скромнее (и точнее), мы признаем, что мир уже заполнен – (выборочно) дающим массу веществом и идем дальше.

Теперь давайте обратимся к более сложной проблеме. Если мы рассчитываем установить симметрию среди различных взаимодействий, то у этих взаимодействий должна быть одинаковая интенсивность. Это прямое следствие их предполагаемой эквивалентности. Но вот незадача – это не так. Сильное взаимодействие действительно сильнее, чем другие взаимодействия. Три основных взаимодействия совершенно определенно *не* равны по силе (а гравитация, на первый взгляд, *безнадёжно* слаба по сравнению с ними).

(Важное, но немного техническое отступление: я должен приостановиться, чтобы объяснить, как делается сравнение. Основная идея – сама простота. Каждое из наших взаимодействий, основанных, как повелось, на уравнениях, похожих на уравнения Максвелла, действует между заряженными частицами. Для электромагнитных взаимодействий имеет значение электрический заряд, для сильных взаимодействий – цветовой заряд, а для слабых взаимодействий – слабый цветовой заряд. Для каждого из наших взаимодействий есть единица [квант] заряда. Поэтому, чтобы сравнить взаимодействия, обычно просто сравнивают силу взаимодействия между единичными зарядами.

На практике все немного сложнее по двум причинам. Во-первых, эффект слабого взаимодействия подавляется на расстояниях более 10–16 см, а действие сильного взаимодействия незаметно на расстояниях более 10–14 см по интересным, но непростым причинам, которые мы затронули ранее (механизм Хиггса и конфайнмент соответственно). Поэтому, чтобы сделать справедливое сравнение, следует сравнивать их только на расстояниях меньших, чем эти. Во-вторых, не слишком практично иметь дело с частицами в пространстве с таким высоким уровнем точности.

Что экспериментаторы делают в действительности, чтобы исследовать поведение на маленьких расстояниях, так это стреляют частицами друг по другу и изучают вероятность отклонения на (относительно) большие углы. Затем мы восстанавливаем картину, реконструируя по отклонениям

частиц те силы, которые их вызывали. Вы можете вспомнить, что именно такой была стратегия, которую Резерфорд, Гейгер и Марсден использовали для изучения внутреннего строения атомов около 1912 г. Основной принцип не изменился, но сегодня, сталкивая частицы с гораздо большей энергией, мы получаем доступ к более коротким расстояниям.

Сравнение других взаимодействий с гравитацией несколько хитрее. С одной стороны, насколько нам известно, нет никакой фундаментальной «единицы заряда» для гравитации – она реагирует на энергию. С другой стороны, мы используем пробные объекты, которые имеют различную энергию, чтобы сравнивать взаимодействия на различных расстояниях. Поэтому при оценке относительной силы гравитации на этих расстояниях мы просто подставляем в уравнения энергию, соответствующую этому расстоянию, и вычисляем гравитационную силу, с которой она действует. (Конец технического отступления.)

## **Переосмысление асимптотической свободы**

Однако, зайдя так далеко, мы не должны сдаваться так легко. И действительно, еще один большой урок Главной теории – асимптотическая свобода – подсказывает решение. В предыдущей главе мы видели, насколько важно для понимания сильного взаимодействия осознать, что сила этого взаимодействия меняется в зависимости от расстояния – становясь более интенсивной на больших расстояниях и менее ощутимой на коротких. Такая изменчивость свойств позволила нам увязать конфайнмент кварков, который указывает на мощную силу, препятствующую их большому удалению друг от друга, с их независимостью, которая указывает на незначительную силу на маленьких расстояниях.

Асимптотическая свобода ведет нас в правильном направлении. Поскольку интенсивность сильного взаимодействия становится слабее на более коротких расстояниях, различие между ним и другими взаимодействиями уменьшается.

Возможно ли, что они все объединятся?

Чтобы перейти от надежды к концепции, а затем от нее к расчету, будет полезно заново продумать асимптотическую свободу, используя образы и понятия, которые применяются в общей практике – отвлеченно от сильного взаимодействия и даже от Главной теории.

Давайте посмотрим на все более живыми и проницательными глазами.

Цветная вклейка ХХ показывает, что бы мы увидели, глядя на «пустое место», если бы наши глаза могли разрешить временные интервалы порядка 10–24 секунды и объекты или размеры порядка 10–14 см.

Эта иллюстрация, если быть точнее, представляет собой мгновенный снимок типичного распределения плотности энергии, являющейся результатом флуктуаций интенсивности глюонного поля. Флуктуации такого рода возникают самопроизвольно в любой точке пространства и в любой момент времени, будучи следствиями квантовой механики. (О них иногда говорят как о виртуальных частицах или нулевых колебаниях.) Спонтанная активность глюонного флюида ответственна за асимптотическую свободу, конфайнмент и за большую часть нашей с вами массы, как мы уже обсуждали. Поскольку они выступают как центральное звено в расчетах, которые были проверены на соответствие действительности очень точно и разными способами, существование этих колебаний является настолько бесспорным, насколько это может быть в науке. На этой «вычисленной» иллюстрации самые большие концентрации энергии обозначены «самыми горячими» цветами – красным и ярко-желтым, в то время как менее интенсивным участкам соответствуют бледно-желтый, зеленый и, наконец, голубой. Области, где плотность энергии ниже пороговой, оставлены без цвета на черном фоне. Увеличение этого изображения приблизительно 1027, так что отображаемая область, грубо говоря, столь же мала по сравнению с человеком, как человек мал по сравнению с видимой Вселенной. Приблизительно через 10–24 секунды картина флуктуаций меняется. Это время гораздо меньше по сравнению с секундой, чем секунда – по сравнению со временем, прошедшим после Большого взрыва.

Поскольку КХД была проверена с почти невероятной строгостью, можно с величайшей степенью определенности, возможной в науке, сказать, что эта картина точно изображает то, что происходило, происходит и будет происходить все время и повсюду.

Более того! Глюонный флюид ни в коем случае не является единственным квантовым флюидом. Мы также подтверждаем расчетом, что фотонный (электромагнитный) флюид флуктуирует и что флюиды викионов тоже флуктуируют. И то же происходит с флюидами, связанными с рождением и исчезновением частиц «вещества» – кварков и лептонов. Электронный флюид флуктуирует, флюид верхнего кварка флуктуирует и т. д. Физические последствия флуктуаций в этих других флюидах обычно меньше, чем эффект флуктуаций в глюонных флюидах, потому что глюонов

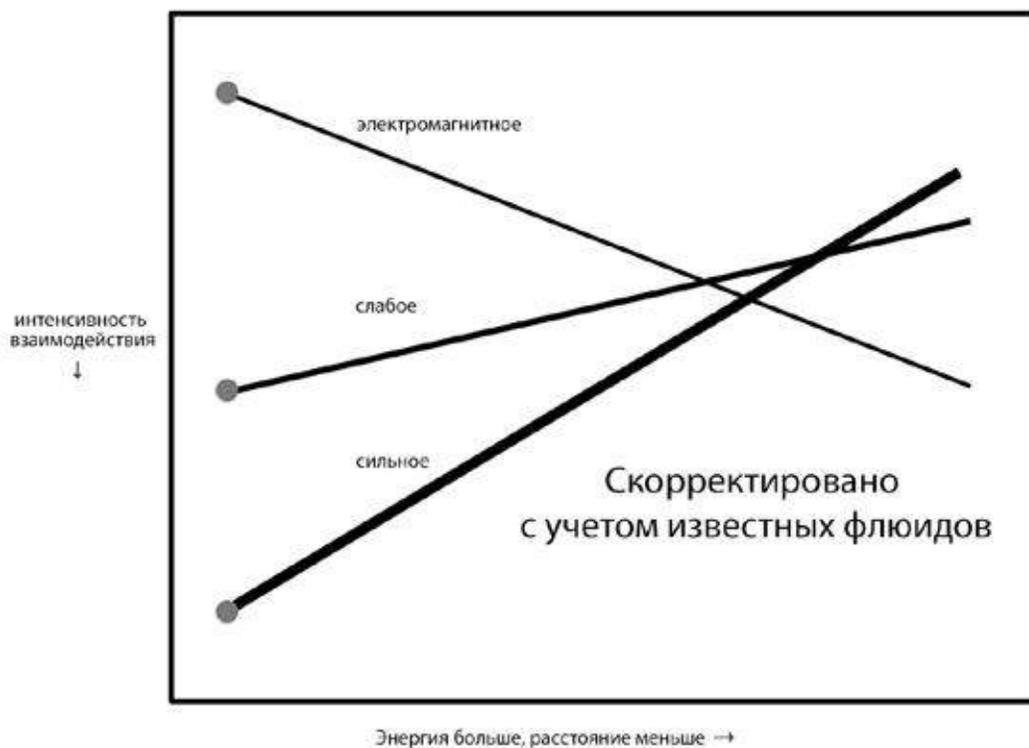
много (их восемь!) и они сильно взаимодействуют. Но общие принципы квантовой теории предсказывают флуктуации во всех квантовых флюидах, и есть многочисленные и надежные доказательства на базе точных измерений, что эти флуктуации имеют место. Чтобы откорректировать наш взгляд, мы должны принять их все во внимание.

Так же, как вода вносит искажения в то, как рыбы видят свой мир, так и среда пространства – в частности, активность квантовых флюидов, которые его заполняют, – искажает наше восприятие самых маленьких расстояний. Чтобы воспринять лежащие в основе фундаментальные принципы, мы должны сделать поправку на эти искажения. И в этом наша надежда. Различные взаимодействия *кажутся* неравными по интенсивности. Но возможно, как только мы исправим наше зрение, они окажутся равными.

## **Почти попали**

Вот что происходит, если выполнить эту программу (илл. 40). Как вы можете видеть, она почти работает – три линии, представляющие интенсивности различных взаимодействий, *почти* сходятся в одной точке. Но не совсем.

Я хочу дать некоторую дополнительную информацию об илл. 40 на случай, если вам захочется понять ее во всех деталях. Чтобы представить результат в настолько простом виде, насколько это возможно, – три прямых линии! – мне пришлось сделать два не самых обычных шага, которые обозначены в подписях к осям. Я сделал так, что по вертикали отложены обратные интенсивности, так что чем выше интенсивность взаимодействия, тем *ниже* точка на графике. (Этот, на первый взгляд, странный выбор имеет еще одно важное преимущество, которое проявится на илл. 41.) На горизонтальной же оси я использовал логарифмическую шкалу. Таким образом, каждый шаг вправо уменьшает расстояние и увеличивает энергию, которая нам нужна, чтобы получить доступ к таким расстояниям, в 10 раз! Следовательно, наш расчет, несмотря на его скромный вид, возносит нас далеко вверх от энергий, которых в настоящий момент достигают ускорители. Толщина линий обозначает их экспериментальную и теоретическую неопределенности.



Илл. 40. Как только внесены поправки на влияние известных квантовых флюидов, мы находим, что объединение почти имеет место и остается лишь незначительное отклонение

Мы надеялись обнаружить, что интенсивности основных взаимодействий становятся равными, когда их измеряют на коротких расстояниях или исследуют на высоких энергиях. Мы берем значения, измеренные на расстояниях (или энергиях), которые нам предоставляют самые мощные из имеющихся ускорителей, а затем используем теорию и расчет, чтобы сделать оценку значений на еще более коротких расстояниях (или более высоких энергиях). На этой иллюстрации опорные точки, представляющие реальные измерения, видны слева, они выделены большими точками. Более короткие расстояния, «доступные» путем расчета, простираются направо. Вы видите, что модель почти работает — эти три линии *почти* сходятся в точку, — но не совсем.

В этот кризисный момент мы могли бы искать утешение в идеях известного философа Карла Поппера. Поппер учил, что цель науки состояла в том, чтобы породить опровержимые (фальсифицируемые) теории. Мы создали теорию, которая является не просто *опровержимой*, а *опровергнутой*. Миссия выполнена!

Такое утешение звучит фальшиво. Мы разработали красивую идею,

которая казалась многообещающей, и она почти сработала. Красота драгоценна. Мы не должны сдаваться слишком быстро.

А теперь я хотел бы рассказать вам историю о том, как вместе с несколькими друзьями мы обнаружили возможное решение. Но сначала я должен представить вам еще одного друга: SUSY.

## Знакомство с SUSY

Суперсимметрия, или SUSY<sup>[81]</sup> для краткости, – это новый вид симметрии. Ее существование как математическая возможность стало большим сюрпризом для физиков. Она была впервые предложена в законченной форме в 1974-м Юлиусом Вессом и Бруно Дзумино.

Мы помним, что симметрия – это Изменение без изменения. Применительно к системам уравнений это идея о том, что мы можем выполнить преобразования величин в уравнениях, не изменяя следствия из этих уравнений. Суперсимметрия – частный пример этой концепции, в котором участвует особенно странный вид преобразований.

Мы уже обсудили много примеров физической симметрии. Трансляционная симметрия времени подразумевает преобразование того, что мы называем временем, путем добавления или вычитания константы. Галилеева симметрия, центральное понятие в специальной теории относительности, включает преобразование мира – т. е. пространства-времени – путем добавления или вычитания постоянной скорости. Она как бы дает ему толчок, или «буст».

Суперсимметрия расширяет специальную теорию относительности, чтобы учесть новый вид преобразования. Это квантовая версия галилеева преобразования, изменяющего скорость. Квантовые галилеевы преобразования, как и обычные галилеевы преобразования, включают в себя движение, но это движение в странные новые измерения или назад из них. Новые измерения суперсимметрии очень отличаются от измерений обычной геометрии. Мы называем их *квантовыми* измерениями.

Как мы выяснили ранее, в нашем обсуждении пространств свойств, *что* может зависеть от *где*. Та же самая сущность, находящаяся в различных положениях в пространстве свойств, часто проявляет себя как несколько «различных» частиц. Мы – или, точнее, глюоны, виконы и фотоны – по-разному откликаемся на этот объект в зависимости от того, где в пространстве свойств он находится. Если вы представите себе частицу, движущуюся в пространстве свойств, то она преобразуется во время путешествия из частицы одного вида в частицу другого вида.

Квантовые измерения суперсимметрии похожи на то, что мы описали. Новое в них – это радикальная природа преобразования, которое происходит, когда частица в них перемещается.

Главная теория делится на две части, которые мы назвали веществом

и взаимодействием (или поэтически – инь и ян). Сектор «вещества», включая кварки и лептоны, содержит частицы, обладающие определенной стабильностью и зернистостью: свойства, присущие земному веществу и материальности. Точное техническое понятие, которым описывается то общее, что имеют все эти частицы, состоит в том, что они являются *фермионами*, названными в честь Энрико Ферми.

- Фермионы рождаются и исчезают парами. Если у вас есть один фермион, вы не можете избавиться от него совсем. Он может превратиться в другой вид фермиона, или в три, или в пять, вместе с любым числом нефермионов (бозонов – см. ниже), но он не может раствориться полностью, не оставив следов.

- Фермионы подчиняются принципу запрета Паули. Грубо говоря, это означает, что двум фермионам того же самого вида не нравится делать одно и то же. Электроны являются фермионами, и принцип запрета для электронов играет важную роль в структуре вещества. Мы встретились с этим, когда исследовали богатый мир углерода.

Сектор «взаимодействий», включающий цветные глюоны, фотон, глюоны, а также частицу Хиггса и гравитон, содержит частицы, которые склонны легко появляться и исчезать – или, на физическом жаргоне, излучаться и поглощаться – и которые часто появляются по несколько сразу. Точное техническое понятие, которым описывается то общее, что имеют все эти частицы, состоит в том, что они являются *бозонами* (названы в честь Шатъендраната Бозе).

- Бозоны могут рождаться или исчезать по одному.

- Бозоны повинуются т. н. статистике Бозе – Эйнштейна. Грубо говоря, это означает, что два бозона одного и того же вида особенно счастливы делать одно и то же. Фотоны являются бозонами, и статистика Бозе – Эйнштейна для фотонов – это именно то, что делает возможными лазеры. Когда им выпадает шанс, весь набор фотонов старается делать одно и то же, составляя узкий луч спектрально чистого света.

Контраст между частицами вещества и взаимодействия – фермионами и бозонами – является очень резким. Потребовалось большое воображение и смелость, чтобы додуматься, что он может быть преодолен. Однако квантовые измерения именно это и делают. Когда частица вещества делает шаг в квантовое измерение, она становится частицей взаимодействия; когда частица взаимодействия делает шаг в квантовое измерение, она становится частицей вещества. Это своего рода математическое волшебство, которое я

не смогу рассмотреть должным образом здесь. Но я кратко опишу главную странность, которая весьма занимательна.

Мы ставим в соответствие обычным измерениям обычные, так называемые «действительные» числа. Мы выбираем точку отсчета, обычно называемую началом координат, и помечаем любую точку (действительным) числом, которое показывает, как далеко вы должны пройти, чтобы добраться до нее от начала координат. Действительные числа, одним словом, подходят для того, чтобы измерять расстояния и размечать континуумы. Они удовлетворяют коммутативному правилу умножения

$$xy = yx.$$

Квантовые размерности используют другой вид чисел, названных грассмановыми числами. Для них справедлив иной закон умножения:

$$xy = -yx.$$

Этот небольшой минус вносит огромную разницу! Заметим, что если мы положим  $x = y$ , то получим  $x^2 = -x^2$ , и мы обязаны заключить, что  $x^2 = 0$ . Это странное правило отражает в физической интерпретации квантовых измерений принцип запрета Паули: вы не можете поместить два объекта в одно и то же (квантовое) место.

После этих приготовлений мы готовы познакомиться с SUSY. Суперсимметрия – это заявление о том, что у нашего мира есть квантовые измерения и что существуют преобразования, которые меняют местами обычные и квантовые измерения (т. е. производят Изменение), сохраняя законы физики (без изменения).

Суперсимметрия, если она верна, будет новым глубоким воплощением красоты в мире. Поскольку преобразования суперсимметрии превращают частицы вещества в частицы взаимодействий и наоборот, суперсимметрия может объяснить на основе симметрии, почему ни одна из этих сущностей не может существовать без другой: обе они являются одной и той же сущностью, рассматриваемой с разных ракурсов! Суперсимметрия примиряет мнимые противоположности, в духе инь-ян.

## От «не вполне ошибочного» к (возможно) правильному

Савас Димопулос всегда от чего-нибудь в восторге. Весной 1981 г. это была суперсимметрия. Савас приехал в новый Институт теоретической физики Кавли в Санта-Барбаре, в котором я начал работать незадолго до этого. Мы сразу нашли общий язык. Из Саваса так и били ключом безумные идеи, и мне нравилось расширять свой кругозор, пытаюсь отнестись к ним серьезно.

Суперсимметрия была (и остается) красивой математической теорией. Проблема с применением суперсимметрии состоит в том, что она слишком хороша для этого мира. Она предсказывает новые частицы, причем во множестве. Мы пока не наблюдали частиц, которые она предсказывает. Мы не видим, например, частиц с тем же самым зарядом и массой, как у электрона, но при этом бозонов, а не фермионов.

Однако суперсимметрия требует, чтобы такие частицы существовали. Когда электрон делает шаг в квантовое измерение, он становится как раз такой частицей.

Основываясь на опыте с другими формами симметрии, мы имеем запасной аэродром под названием «самопроизвольное нарушение симметрии». Этот запасной вариант подразумевает, что уравнения для объекта нашего интереса – которым в фундаментальной физике является мир в целом – обладают симметрией, но их устойчивые решения ее уже не имеют.

Обычный магнит – классический пример этого явления. В фундаментальных уравнениях, описывающих кусок магнетита, любое направление равнозначно всякому другому. Но когда этот кусок представляет собой магнит, для последнего уже неверно, что все направления эквивалентны. Каждый магнит имеет полюса, его можно использовать для изготовления стрелки компаса. Как такая полярность согласуется с ненаправленной сущностью уравнений? Дело в том, что существуют силы, которые действуют таким образом, чтобы выровнять спины электронов в магните *друг с другом*. В ответ на эти силы все электроны должны выбрать общее направление, в котором будет указывать их спин. Силы – и уравнения, их описывающие, – будут верны при выборе любого направления, но *выбор должен быть сделан*. Таким образом, устойчивые решения этих уравнений имеют меньше симметрии, чем сами уравнения.

Спонтанное нарушение симметрии – это стратегия, чтобы и оставить

в руках наш метрический пирожок, и в то же время съесть его. Если нам это удастся, мы сможем применить красивые (суперсимметричные) уравнения, чтобы описать менее красивую (асимметричную – или следует сказать недосуперсимметричную?) действительность.

В частности, когда электрон делает шаг в квантовое измерение, его *масса* изменится. Если новая частица, которой он станет, так называемый селектрон<sup>[82]</sup>, достаточно тяжела, то неудивительно, что мы до сих пор ее не наблюдали. Это будет нестабильная частица, которая может существовать лишь краткий миг после своего рождения в ускорителе (очень) высокой энергии.

На границе неведомого использование спонтанного нарушения симметрии включает в себя полет фантазии. Вы должны придумать симметрию, которая не заметна в мире, заложить ее в свои уравнения, и показать, что мир – или, если быть более реалистичными, некоторый аспект мира, который вы пытаетесь объяснить, – внезапно возникает из их устойчивых решений.

Можем ли мы использовать этот запасной вариант для суперсимметрии? Создание моделей мира со спонтанно нарушенной суперсимметрией, которые соответствуют всему тому, что мы уже знаем, оказывается трудным делом. Я наскоро испытал свои силы в этом вопросе в середине 1970-х, когда суперсимметрия только была придумана, но после того, как кавалерийский наскок печально провалился, я сдался. Савас – гораздо более одаренный от природы разработчик моделей в двух решающих отношениях: он не настаивает на простоте, и он не сдается.

Это было интересное сотрудничество, напоминающее о *Странной Парочке*<sup>[83]</sup>. Когда я находил определенную трудность (назовем ее А), которая не находила отражения в его модели, он, бывало, говорил: «Это несерьезная проблема, я уверен, что смогу решить ее», и на следующий день приходил с более тщательно продуманной моделью, которая решала трудность А. Но затем мы обсуждали трудность В, и он мог решить ее с помощью совсем другой усложненной модели. Чтобы решить и А, и В одновременно, нужно было объединить эти две модели, и тут возникали новые проблемы: на колу мочало, начинай с начала. В самое короткое время все невероятно усложнялось.

В конечном счете нам удалось взять все крепости измором. Любой (включая нас самих), кто искал слабости в наших моделях и пытался отследить все усложнения, приходил в полное изнеможение раньше, чем мог обнаружить новую трудность. Когда я попытался подготовить эту

работу для публикации, я почувствовал себя скованным каким-то чувством неловкости за сложность и произвольность того, что мы придумали.

Савас, как я упоминал, упивается сложностью. Он уже говорил с другим коллегой, Стюартом Раби, о добавлении суперсимметрии к моделям объединения взаимодействий, которые сами по себе были сложны по другим причинам.

Я не испытывал энтузиазма по поводу этого нагромождения спекулятивных идей. По правде говоря, я хотел показать, что оно не может работать, чтобы я мог умыть руки и выйти из игры с чистой совестью. Мой план состоял в том, чтобы найти какое-нибудь определенное общее следствие, которое не зависело бы от деталей получившейся мешанины. Оно бы оказалось ложным, и это означало бы конец всему: баба с возу – кобыле легче.

Чтобы сориентироваться и сделать окончательный расчет, я предложил начать с того, чтобы сделать самое грубое приближение, которое состояло в том, чтобы проигнорировать всю проблему (спонтанного) нарушения симметрии, которое было источником большей части сложности и всей неопределенности. Это позволило нам сосредоточиться на хороших, простых и симметричных моделях ценой отказа от реализма. Мы смогли рассчитать, получается ли объединение взаимодействий в таких моделях. (Не догадываясь об этом, мы шли по следам Пифагора и Платона и, конечно, с учетом совета иезуита отца Мэлли.)

Результат стал большим сюрпризом, по крайней мере для меня. В те ранние годы соответствующие измерения были все еще довольно неточны, и поэтому линии на илл. 40 были толще, указывая на большую неопределенность. Эти более толстые линии действительно пересеклись. Другими словами, учитывая неопределенности, представлялось возможным, что силы различных взаимодействий действительно объединяются на малых расстояниях. Это было манящей подсказкой, известной теоретикам в этой области. К моему удивлению, наши расчеты показали, что, хотя суперсимметричные модели и содержали гораздо больше флуктуирующих флюидов, они также работали! Ответы отличались – в зависимости от того, учитывали вы суперсимметрию или нет, – но ни один не противоречил существовавшему экспериментальным данным.

Это послужило поворотным моментом. Мы отложили в сторону «не вполне ошибочные» сложные модели, в которых пытались соответствовать действительности в деталях. Вместо этого Савас, Стюарт и я написали короткую статью, которая, на первый взгляд, была

совершенно нереалистичной (т. е. неверной). Без нарушения суперсимметрии то, что мы предлагали, было слишком хорошо для этого мира. Тем не менее оно давало результат, который был настолько очевидным и успешным, что заставил считать идею об объединении объединений – т. е. о совмещении *объединения взаимодействий*

***сильное + слабое + электромагнитное***

*с суперсимметричным объединением*

***вещество + взаимодействие***

(возможно) правильной. Мы оставили вопрос о том, как нарушается суперсимметрия, на будущее.

Иногда самый важный шаг в понимании *чего-то* состоит в том, что надо понять, что вам не следует беспокоиться обо *всем*. Обычно лучше быть (возможно) правым в чем-то конкретном, чем иметь «не вполне ошибочную» теорию обо *во всем*.

## **Драгоценный венец?**

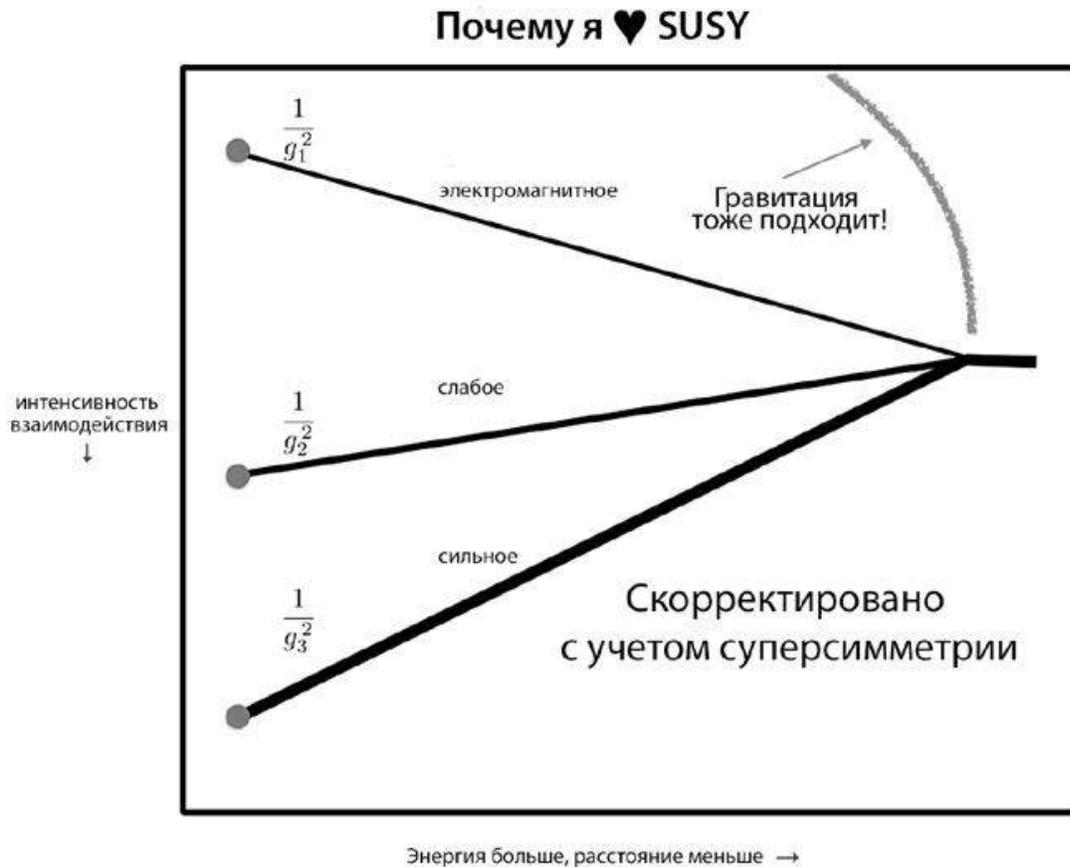
Илл. 41 демонстрирует, что выявили наши расчеты.

Суперсимметрия вводит новые источники активности в пространстве – новые виды квантовых флуктуаций (или виртуальных частиц). Поэтому мы должны вернуться к илл. 40, чтобы включить в нее дополнительные поправки на искажения от этих флуктуаций. Конечно, мы воспользуемся самыми лучшими из имеющихся экспериментальных данных, поэтому наши линии будут такими же тонкими.

Если сделать это, то все получается! Интенсивности различных взаимодействий – сильного, слабого и электромагнитного – сходятся в одной точке с впечатляющей точностью.

Более того, до сих пор мы оставляли четвертое взаимодействие, гравитацию, за скобками наших дискуссий об объединении. Это было стратегическим решением. Объединение трех других взаимодействий представляет собой намного более близкую к решению и более простую задачу. Сильное, слабое и электромагнитное взаимодействия описываются

очень похожими теориями. Каждое из них является воплощением локальной симметрии пространств свойств. И хотя наблюдаемые интенсивности этих взаимодействий отличаются, как видно из разброса точек на илл. 40 и 41, они не так уж безумно несоразмерны. По факту они отличаются менее чем в 10 раз.



Илл. 41. После добавления эффектов от новых квантовых флюидов, существования которых требует суперсимметрия, происходит точное объединение

Гравитация отличается от них в обоих отношениях. Описывающая его теория – общая теория относительности Эйнштейна – также является воплощением локальной симметрии, как мы уже говорили, но это симметрия (локальная галилеева симметрия) другого рода. Еще более устрасает его *абсурдная* несопоставимость по силе взаимодействия. Гравитационное взаимодействие между элементарными частицами при доступных нам энергиях гораздо, гораздо, *гораздо* слабее, чем другие взаимодействия. Если бы каждое слово «гораздо» соответствовало

множителю «10», нам бы пришлось произнести его 40 раз! И поэтому на илл. 41 не видно кружка, представляющего наблюдаемую интенсивность гравитационного взаимодействия. Ведь этот кружок в масштабе нашего графика находится далеко, далеко, *далеко* вне видимой Вселенной. Требуется приблизительно 27 множителей «10», чтобы перейти от размера нашего рисунка к размеру видимой Вселенной, и еще 13 множителей останется!

Тем не менее мы все же можем включить в игру и гравитацию. И если мы настойчивы, мы будем вознаграждены.

Тяготение реагирует *непосредственно* на энергию, поэтому, когда мы исследуем его (с помощью ума и карандаша) на все более высоких энергиях, его интенсивность увеличивается пропорционально. Этот прямой рост интенсивности – количественно намного более мощный эффект, чем изменения в интенсивностях других взаимодействий из-за квантовых флуктуаций. На илл. 41 дуга, изображающая величину, обратную интенсивности тяготения, резко ныряет вниз. Она не только возвращается в видимую Вселенную, но и довольно-таки близко подходит к трем другим взаимодействиям, когда они объединяются.

Следовательно, на уровне интенсивностей мы приходим к полному объединению между всеми четырьмя основными взаимодействиями

***сильное + слабое + электромагнитное + гравитационное.***

Это достижение само по себе не является действительно полной теорией объединения. Например, вы могли заметить, что, если бы мы продолжили прямые линии илл. 41 направо, взаимодействия «разъединились» бы снова! Для сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий мы можем описать объединение в деталях. Мы не можем вывести совершенно однозначную теорию – пока для этого недостаточно информации, – но возможные теории имеют много общего. В частности, они все требуют существования новых, очень тяжелых частиц, наподобие мутатронов, которые мы упоминали ранее. Флуктуации, связанные с этими частицами и не включенные в илл. 41, заставляют соединившиеся линии оставаться вместе после того, как они встретились. (А до этого момента они не оказывают существенного влияния.) Когда мы пытаемся включить сюда гравитацию, неопределенности становятся гораздо больше. Главная цель теории струн состоит в том, чтобы объяснить, как гравитация объединяется с другими взаимодействиями, но до настоящего времени эта

цель оказывалась недостижимой.

Несмотря на известные ограничения, это объединение взаимодействий – выдающийся результат. Оно появляется в результате поиска ответа на наш Вопрос о Красоте и венчает его. Оно подтверждает, с впечатляющей точностью и ясностью, что красота в конкретной форме глубокой симметрии действительно воплощается в мире.

Или не воплощается?

Чтобы завершить наше представление о мире, нам пришлось призвать на помощь суперсимметрию. Поскольку на сегодняшний день пока нет никаких прямых доказательств наличия суперсимметрии, это допущение остается сомнительным. (Но успех нашего расчета для меня является *сильным косвенным доказательством!*)

К счастью, мы можем ее протестировать. Если новые частицы, которые предсказывает суперсимметрия, собираются выполнить работу, которую мы им поручили, они не могут быть слишком тяжелыми. Большие массы подавляют их квантовые флуктуации, и они превратили бы илл. 41 обратно в илл. 40. Большой адронный коллайдер скоро – в течение следующих пяти лет – должен оказаться в состоянии сконцентрировать достаточно энергии, чтобы начать производить некоторые из этих частиц. Держу пари, что так и будет.

## Доверяем Красоте

*Богу доверяем, остальные платят наличными.*

*Джин Шеперд (заголовок книги [\[84\]](#))*

Мы доверяем красоте, когда создаем наши теории, но их «стоимость в наличных деньгах» зависит от других факторов. Их истинность является очень желательной, но это не единственный и даже не самый важный критерий. Механика Ньютона (основанная на сохранении массы) и его теория цветов (которая основана на сохранении спектральных типов), например, не являются строго истинными, и все же это чрезвычайно ценные теории. Плодотворность – способность теории предсказать новые явления и дать нам власть над Природой – также является важной частью уравнения.

Вера в красоту часто окупалась в прошлом. Теории гравитации Ньютона бросило вызов движение Урана, которое не подчинялось ее предсказаниям. Урбен Леверрье, а также Джон Коуч Адамс, верившие в красоту теории, решились предположить существование новой планеты, еще не наблюдавшейся, чье влияние могло бы все объяснить. Их вычисления подсказали астрономам, куда смотреть, и привели к открытию Нептуна. Выдающийся синтез Максвелла, как мы видели, предсказал новые цвета света, невидимые для наших глаз и еще не наблюдавшиеся. Доверяя красоте теории, Герц произвел и наблюдал радиоволны. Ближе к нашему времени Поль Дирак предсказал с помощью странного и красивого уравнения существование античастиц, которые еще никогда не наблюдались, но вскоре после этого были обнаружены. Главная теория, прочно основанная на симметрии, дала нам цветные глюоны,  $W$ - и  $Z$ -частицы, частицу Хиггса, очарованный кварк и частицы третьего семейства – все путем предсказаний, до их экспериментального наблюдения.

Но ведь были и неудачи. Теория атомов Платона и модель Солнечной системы Кеплера были красивыми теориями, которые в качестве описаний Природы полностью провалились. Другим провалом была теория атомов Кельвина, который предположил, что они являлись вихревыми узлами в эфире. (Замкнутые вихри имеют различные формы, и их не так легко разрушить, таким образом, они представляли собой, как могло бы

показаться, подходящий материал для атомов.) Эти «неудачи» были не без добра: теория Платона вдохновила более глубокое исследование геометрии и симметрии, модель Кеплера сподвигнула его на выдающуюся карьеру в астрономии, а модель Кельвина подсказала математику Питеру Тэту разработку теории узлов в математике, которая продолжает быть актуальной темой сегодня – но как теории материального мира они безнадежно ошибочны.

Судьба суперсимметрии еще не решена. Ее открытие, как я описал, вознаградило бы нашу веру в красоту как проводника к глубинным механизмам реальности. Есть серьезные основания думать, что открытие грядет, и красивые доводы надеяться на это, но пока этого не случилось.

Поживем – увидим.

## **Двойное Благословение**

Согласно истории о Фоме Неверующем, апостол Фома скептически отнесся к воскресению Иисуса, отказываясь верить при отсутствии доказательств:

Если не увижу на руках Его ран от гвоздей, и не вложу перста моего в раны от гвоздей, и не вложу руки моей в ребра Его, не поверю.

Когда затем Иисус явился Фоме, он позволил Фоме изучить свои раны, и Фома поверил. Иисус сказал:

Фома, ты поверил, потому что увидел Меня; блаженны невидевшие и уверовавшие.

Эта история вдохновила многие произведения искусства, включая картину Караваджо «Неверие Святого Фомы» (вклейка УУ), которую я считаю очень яркой. По-моему, интерпретация Караваджо передает две глубокие идеи, которые выходят за рамки скупого текста Евангелия. Видно, во-первых, что Иисус не сопротивляется любознательному исследованию Фомы, а скорее приветствует его. И видно, что Фома очарован и взволнован, обнаружив, что действительность соответствует его самым глубоким надеждам. Неверующий Фома – это герой и счастливый человек.

Те, кто верит без оглядки, утешаются радостной уверенностью. Но это хрупкая уверенность и ложная радость.

Те, чья вера не пассивна, а интересуется действительностью, получают второе, более полноценное благословение, основанное на гармонии веры и опыта. Блаженны те, кто веруют в то, что они видят.

## Красивый Ответ?

Не все красивые идеи о глубоких основах действительности верны. Модель геометрически идеальных атомов Платона и модель геометрической Солнечной системы Кеплера – примеры, которые мы уже обсудили. Необыкновенный «Человек по Витрувию» работы Леонардо да Винчи (вклейка ZZ) отсылает к идеям иного рода. Его рисунок предполагает, что есть фундаментальные связи между геометрией и (идеальными) человеческими пропорциями. Эта концепция восходит к еще более древним философским и мистическим традициям и намного более популярна, чем ход мысли Пифагора, которому мы следовали: к идее о том, что человеческое тело отражает структуру Вселенной, и наоборот. Возможно, к сожалению, ни мы, люди, ни наши тела не играют заметной роли в картине мира, которая вырисовывается из научных исследований.

И не все истины о глубинных основах реальности красивы. У Главной теории много слабых мест и невеликие перспективы разобраться с ними. Даже если мои мечты об аксионах, суперсимметрии и объединении сбудутся, запутанная система масс кварков и лептонов, а скорее ее отсутствие, и концептуально непрозрачная темная энергия останутся проблемами в обозримом будущем.

Тем не менее в заключение этой медитации вы согласитесь, я надеюсь, что единственный подходящий ответ на ее Вопрос

Воплощает ли мир красивые идеи?

это уверенное

«Да!».

Этот ответ проявлялся все сильнее и яснее с каждой новой страницей. Реальность далеко превзошла самые смелые надежды Пифагора и Платона найти концептуальную чистоту, порядок и гармонию в основе мироздания. Музыка сфер действительно звучит, воплощенная в атомах и в современной Пустоте, похожая на музыку в обычном смысле, но по-своему оригинальная и богатая. Солнечная система не воплощает изначальное видение Кеплера, но ведь он и обнаружил точность законов ее движения и, таким образом, открыл дорогу необыкновенной красоте небесной механики

Ньютона. Свет действительно несет гораздо больше, чем открывает нам даже наше поразительное зрительное восприятие, а наше воображение – и не только воображение! – открывает новые Двери восприятия. Основные силы Природы олицетворяют симметрию и осуществляются посредством ее воплощений.

Также и идеи да Винчи не были полностью ошибочны, если мы интерпретируем их в более широком смысле. Связь человеческое тело ↔ космос более не кажется краеугольной, но ее близкий родственник, связь

*микромир ↔ макромир*

процветает.

В этой медитации мы главным образом исследовали левую сторону этой пары понятий, теперь же давайте с помощью вклейки ААА посмотрим за ее пределы. Это изображение неба, каким оно предстало бы наблюдателю, глаза которого ощущают микроволновое излучение, а не видимый свет. Конечно, чтобы показать информацию в форме, которую люди могут воспринять, была сделана некоторая обработка изображения. Интенсивность излучения представлена цветом, причем темно-синий соответствует самой низкой интенсивности, ярко-красный – самой высокой, а промежуточные цвета, которые вы видите, отображают интенсивности между этими экстремальными значениями. Кроме того – важнейшая «деталь»! – мы вычли средний фон и увеличили контраст примерно в 10 тысяч раз<sup>[85]</sup>. Необработанное изображение было бы бесформенным туманом; то, что вы видите, – это картина малых отклонений от среднего.

Ведущая интерпретация этого изображения дает удивительные связи между микрокосмосом и макрокосмосом. Микроволновое небо – это снимок условий в ранней Вселенной, примерно 13,8 миллиардов лет назад и спустя лишь приблизительно 380 000 лет после Большого взрыва. Свет, излученный тогда, доходит до нас сейчас, пройдя очень длинный путь, и вот какую информацию он нам несет. 13, 8 миллиардов лет назад Вселенная была почти (но не совсем) полностью однородной. Она содержала отклонения от совершенной однородности величиной всего в несколько десятитысячных.

Эти отклонения от однородности выросли за счет гравитационной нестабильности (более плотные области притягивают материю из окружающих менее плотных областей, и контраст плотности растет).

В конечном счете они породили галактики, звезды и планеты, какими мы знаем их сегодня. Все это – довольно очевидная астрофизика, коль скоро у нас есть «зародыши» этих образований. Таким образом, возникает большой вопрос: как вообще возникли эти неоднородности?

Для уверенности нам нужно больше доказательств, но кажется вероятным, основываясь на ныне имеющихся данных, что они имели свое начало в виде квантовых флуктуаций, подобных тем, что показаны на вклейке ХХ. В современных условиях квантовые флуктуации играют существенную роль только на очень маленьких расстояниях, но этап очень, очень быстрого расширения в ранней истории Вселенной, посредством так называемой космической инфляции, мог увеличить их до вселенских пропорций.

Мы, люди, балансируем между Микромиром и Макромиром, содержим в себе первый, воспринимаем второй и постигаем оба.

## С небес на землю

Когда я завершал эту книгу, произошло неприятное событие, которое вернуло меня с небес на землю. Мой ноутбук, который был для меня почти как придаток мозга, был украден. Я был опустошен.

Но затем произошло чудо. У меня была резервная копия всех моих данных, и через несколько дней у меня был новый ноутбук со всеми восстановленными данными – изображениями, словами, расчетами, музыкой и т. д. Все это было закодировано в виде чисел – в строках нулей и единиц – настолько точно, что их можно было восстановить без ощутимой разницы. Мне пришло в голову, что едва ли можно желать более материальной, прямой и впечатляющей демонстрации истинности утверждения Пифагора:

Все вещи суть числа.

Это красивая реальность, за которую я приносил – и приношу – благодарность.

## Дополнительность как мудрость

*По-твоему, я противоречу себе?  
Ну что же, значит, я противоречу себе.  
Я широк, я вмещаю в себе множество разных  
людей.*

*Уолт Уитмен. Листья травы*



Илл. 42. Герб, придуманный Нильсом Бором

Наше исследование Природы показало нам множество новых перспектив. Нелегко согласовать их с каждодневным опытом, так же как и друг с другом. В результате погружения в квантовый мир, где противоречие и истина близко соседствуют друг с другом, Нильс Бор извлек урок *дополнительности*: ни один из взглядов не исчерпывает действительность; различные точки зрения могут быть ценными, хотя и взаимоисключающими.

Знак инь-ян – подходящий символ для взаимодополнительности, и он был принят в этом качестве Бором. Две его стороны равны, но они разные; каждая содержит другую и содержится в другой. Возможно, не случайно Нильс Бор был очень счастливо женат.

Будучи понятой, дополнительность – это мудрость, которую мы открываем вновь и подтверждаем как в материальном мире, так и вне его.

Это мудрость, которую я постиг и предлагаю вам. Давайте рассмотрим некоторые взаимно дополнительные пары:

### *Упрощение и Изобилие*

- Основные строительные блоки Природы немногочисленны и очень просты, их свойства полностью определяются уравнениями высокой степени симметрии.

- Мир объектов обширен, бесконечно разнообразен и неистощим.

Более глубокое понимание основ не может отменить богатство опыта. Оно может освещать и освещает опыт новым светом, что дает нам возможность обогащать его дальше.

### *Один мир и Многие миры*

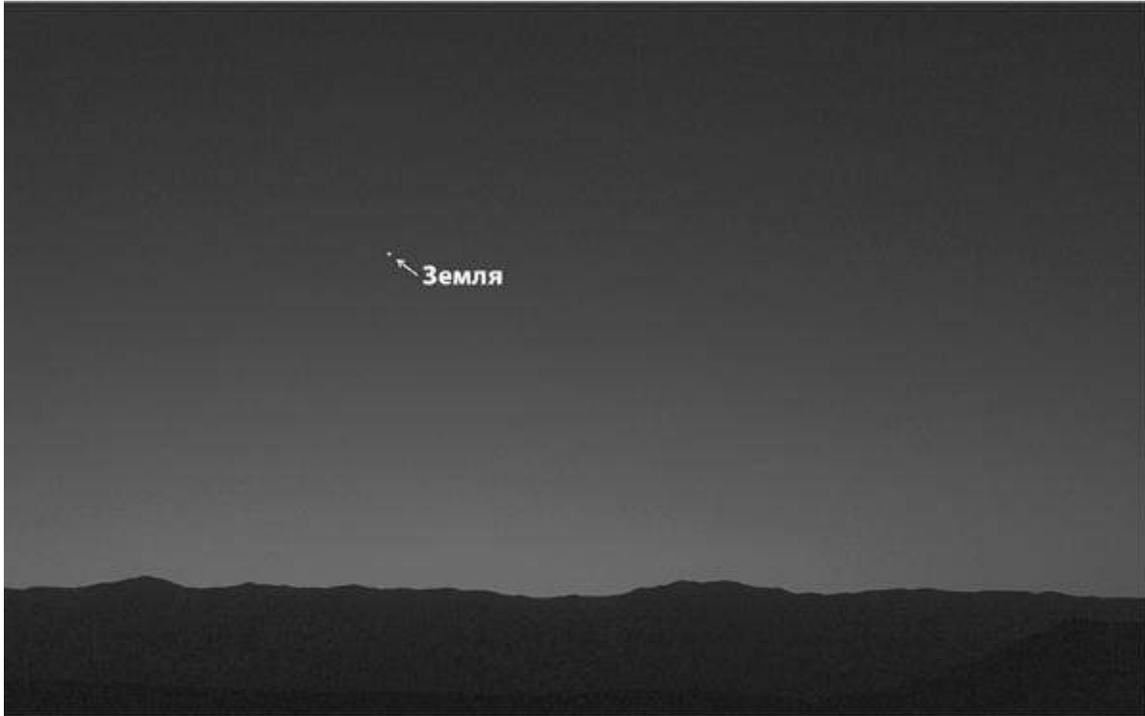
- Мозг одного человека – минимальноеместилище человеческого мышления. Он располагается внутри отдельной черепной коробки индивидуального живого тела здесь, на планете Земля. Большинство людей большую часть времени – когда они не философствуют и не занимаются астрономией – размышляют о событиях, которые происходят в маленькой области пространства вблизи поверхности Земли. Именно здесь вершится история человечества – великие войны, великое искусство и миллиарды захватывающих «обычных» жизней.

- Если смотреть на нее даже из ближнего космоса, Земля – это просто крошечное пятнышко отраженного света (илл. 43).

Недавние успехи в космологии позволяют думать, что часть Вселенной, которую мы можем в настоящее время исследовать даже самыми мощными инструментами, является всего лишь небольшой частью мультивселенной, далекие части которой могли бы выглядеть совершенно иначе. Если бы это стало точно известно, это подкрепило бы мысль, которая уже неоднократно звучала прежде: «мир», данный в ощущениях каждого человека, – лишь один из миллиардов таких же (по одному на человека по крайней мере); Земля – лишь одна из планет нашего Солнца; наше Солнце – лишь одна из миллиардов звезд в нашей Галактике по имени Млечный Путь; наша Галактика – лишь одна из миллиардов

в видимой Вселенной.

Существование окружающей необъятности не умаляет меня, вас или человечество в целом. Оно может окрылять и окрыляет наше воображение.



Илл. 43. Земля, как она видна с Марса

### *Объект и Человек*

- Я и вы – это набор кварков, глюонов, электронов и фотонов.
- Я и вы – это думающие люди.

### *Определенный и Свободный*

- Я и вы – это материальный объект, подчиняющийся законам физики.
- Я и вы – мы способны делать выбор. Я и вы – мы ответственны за него.

### *Преходящее и Вечное*

- Состояние мира – в вечном движении, и любой объект в нем подвержен изменениям.

- Понятия существуют вне времени, и, поскольку все вещи суть числа, они избавляют нас от его влияния.

На переднем крае физики и космологии эта дополнительность играет очень важную роль. В настоящее время мы делаем непростое разделение между законами физики и начальными условиями, которое должно быть преодолено. Понимание мира любым конечным наблюдателем развивается, но пространство – время в целом, которое является самой естественной ареной для описания мира, этого не делает. Квантово-механическая волновая функция системы в целом может быть постоянной во времени, в то время как ее части, рассматриваемые отдельно, испытывают относительные изменения. (Для экспертов: это регулярно происходит для энергетических собственных функций сложных систем.) Что-то вроде этого вполне могло бы быть верным и для мира в целом. Изменение без изменения, великий и плодотворный принцип симметрии, был бы тогда полностью воплощен, как парадоксально настаивал Парменид:

Одна история, одна дорога теперь  
Осталась: вот эта. И на ней есть знаки  
Во множестве, что бытие – это несотворенное  
и неразрушимое  
Целое, единое и непоколебимое, и завершенное.

Заключительная взаимодополняющая пара завершает нашу медитацию:

### ***Красивое и Некрасивое***

- Материальный мир воплощает красоту.
  - Материальный мир вмещает нищету, страдания и раздор.
- Размышляя о любом аспекте, мы не должны забывать о другом.

## Благодарности

Семя этого проекта было посажено в 2010 г., когда я принял предложение Дарвиновского колледжа в Кембридже прочитать лекцию о квантовой красоте. Я бы хотел поблагодарить Кристофера Джонсона и компанию ZPlay Media за подготовку чрезвычайно полезной расшифровки этой лекции, а Зоуи Лейнхардт, Филипа Дэвида и в особенности Лорен Аррингтон за их предложения и помощь в подготовке лекции в качестве главы для коллекции Beauty.

Я бы хотел поблагодарить взрастившего мою книгу из семени Джона Брокмана, который постоянно поощрял меня развивать и расширять идеи, выраженные здесь, и привлек к ним внимание издательства Penguin Press.

Скотт Мойерс и Мэлли Андерсон из Penguin Press были моими помощниками с самого начала, обеспечивая мудрое сочетание энтузиазма, конструктивной критики и творческих идей, которые вдохновляли меня писать больше и переписывать уже готовое. Мэлли хладнокровно провела проект через последние стадии, доведя его до совершенства. Я также благодарен художникам и техническому персоналу Penguin Press за их профессионализм и готовность посвятить себя идеалу создания прекрасного проекта.

Ал Шейпир сделал полезные комментарии по первым черновикам.

Моя жена и подруга жизни Бетси Дивайн прочитала всё и высказала много предложений, сделавших язык книги более прямым и сильным. Она также предложила и отстояла идею создания словаря терминов; без ее вмешательства этого раздела в его нынешнем виде просто не было бы. Бетси оказала поддержку и провела меня через все взлеты и падения, которые неизбежны в таком большом предприятии, как написание подобной книги.

Я благодарен моему родному Массачусетскому технологическому институту за надежную поддержку, которая сделала эту авантюру возможной, а также Университету штата Аризона за поддержку на завершающей стадии. Самая важная часть книги была написана во время моей поездки в Китай, особенно – во время волшебной недели на Западном озере. Влияние этой недели можно почувствовать во многих местах, начиная с фронтисписа. Я бы хотел поблагодарить Винсента Лю, Бяо У и Сюн Хунвэя за организацию этой поездки.

# Хронология

## I: Доквантовая физика

**Ок. 525 г. до н. э.** Пифагор (570–495 гг. до н. э.) разрабатывает численные законы геометрии и музыкальной гармонии.

**Ок. 369 г. до н. э.** Друг Платона (429–347 гг. до н. э.) Теэтет разрабатывает теорию правильных платоновых многогранников.

**Ок. 360 г. до н. э.** В диалоге «Тимей» Платон выдвигает атомистическую теорию и некоторые космологические представления.

**Ок. 300 г. до н. э.** «Начала» Евклида (323–283 гг. до н. э.) развивают геометрию как систему, выводимую путем умозаключений.

**Ок. 1400 г. н. э.** Филиппо Брунеллески (1377–1446) разрабатывает проективную геометрию как основу для художественной перспективы.

**Ок. 1500 г.** Леонардо да Винчи (1452–1519) предвосхищает слияние искусства, инженерного дела и науки.

**1543 г.** Николай Коперник (1473–1543) в трактате «Об обращении небесных сфер» предлагает гелиоцентрическую систему, основанную на математической эстетике.

**1596 г.** Иоганн Кеплер (1571–1630) в труде «Гайна мироздания» представляет коперниканскую модель Солнечной системы, основанную на платоновых телах. В его последующих работах были сформулированы эмпирические законы движения планет.

**1610 г.** Галилео Галилей (1564–1642) в «Звездном вестнике» сообщает о «мини-коперниканской» системе спутников Юпитера и заявляет, что поверхность Луны во многом напоминает земную, основываясь на наблюдениях с использованием своего первого телескопа.

**1666 г.** Исаак Ньютон (1642–1727) разрабатывает основополагающие теории в области математического анализа, механики и оптики.

**1687 г.** Ньютон в «Математических началах натуральной философии» разрешает загадки небесных и земных законов тяготения в соответствии с математическими принципами.

**1704 г.** Ньютон в «Оптике» сообщает об экспериментах и своих размышлениях о природе света.

**1831 г.** Открытие Майклом Фарадеем (1791–1867) электромагнитной индукции.

**1850-е и 1860-е гг.** С 1855 г. Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879) начинает публикацию работ о цветовом зрении. За ними следуют значительные работы по электродинамике: «О силовых линиях Фарадея»

(1855), «О физических силовых линиях» (1861), «Динамическая теория электромагнитного поля» (1864).

1887 г. Опыты Генриха Герца (1857–1894) по созданию и обнаружению электромагнитных волн подтверждают индукцию Максвелла и становятся теоретической основой для создания радио и, в конце концов, других видов дистанционной связи.

## II: Квантовая физика, симметрия и ядро

**1871 г.** Работы Софуса Ли (1842–1899) вводят понятия непрерывного преобразования и симметрии, которые он развивает и улучшает в дальнейших работах.

**1899 г.** Эрнест Резерфорд (1871–1937) открывает ядерный распад с излучением электронов («бета-распад») как особую форму радиоактивности, что положило начало экспериментальному изучению слабого взаимодействия.

**1900 г.** Макс Планк (1858–1947) вводит квантование для обмена энергией между веществом и светом.

**1905 г.** Альберт Эйнштейн (1879–1955) предлагает концепцию, в соответствии с которой сам свет существует в виде дискретных единиц (квантов, фотонов).

**1905 г.** Специальная теория относительности и общая теория относительности (**1915**) Эйнштейна – мощные физические теории, основанные на допущении симметрии. Они подготовили почву для более поздних работ по жесткой (глобальной) и анаморфной (локальной) симметрии соответственно.

**1913 г.** Ганс Гейгер (1882–1945) и Эрнест Марсден (1889–1970) по предположению Эрнеста Резерфорда проводят эксперименты по рассеянию, чтобы доказать существование атомного ядра.

**1913 г.** Нильс Бор (1885–1962) представляет успешную модель атома, основанную на квантовых идеях.

**1918 г.** Теорема Эмми Нётер (1882–1935) устанавливает связь между непрерывной симметрией и законами сохранения.

**1924 г.** Шатъендранат Бозе (1894–1974) выдвигает концепцию, в соответствии с которой фотоны – это примеры того, что мы сейчас называем бозонами.

**1925 г.** Вольфганг Паули (1900–1958) вводит свой принцип запрета.

**1925 г.** Энрико Ферми (1901–1954) и Поль Дирак (1902–1984) выдвигают концепцию, в соответствии с которой электроны – это примеры того, что мы сейчас называем фермионами.

**1925 г.** Вернер Гейзенберг (1901–1976) представляет современную квантовую теорию, в которой идеи Бора облечены в математически согласованную форму.

**1926 г.** Эрвин Шрёдингер (1887–1961) предлагает уравнение

Шрёдингера. Оно выглядит очень непохожим на более абстрактные предложения Гейзенберга, но оказывается эквивалентным им.

**1925–1930** гг. Поль Дирак (1902–1984) в серии великолепных работ предлагает уравнение Дирака для электронов и квантованную версию уравнений Максвелла. Благодаря его трудам квантовая электродинамика (КЭД) обретает жизнь как богатая физическая теория.

**1928** г. Герман Вейль (1885–1955) доказывает, что квантовая версия теории Максвелла (квантовая электродинамика) – это воплощение анаморфной симметрии.

**1930** г. Вольфганг Паули (1900–1958) постулирует существование новой частицы нейтрино, чтобы обеспечить сохранение энергии и импульса при слабых распадах.

**1931** г. Юджин Вигнер (1902–1995) доказывает силу глобальной симметрии в квантовой механике.

**1932** г. Энрико Ферми (1901–1954) применяет основные принципы специальной теории относительности и квантовой механики к слабым распадам, устанавливая их законность в этом новом мире.

**1947–1948** гг. Измерения эффектов, которые отклоняются от «прямолинейной» теории Дирака: смещение энергетических уровней водорода («лэмбовский сдвиг»), который наблюдает Уиллис Лэмб (1913–2008), и «аномальный» магнитный момент электрона, наблюдаемый Поликарпом Кушем (1911–1993), демонстрируют важность включения квантовых флуктуаций.

**1948** г. Ричард Фейнман (1918–1988), Джулиан Швингер (1918–1994) и Синъитиро Томонага (1906–1979) доказывают, что квантовая электродинамика Дирака при более точном решении включает квантовые флуктуации (виртуальные частицы).

**1950** г. Фримен Дайсон (р. 1923) придает предыдущей работе четкие математические основания и демонстрирует ее состоятельность.

**1954** г. Чжэньнин Янг (р. 1922) и Роберт Миллс (1927–1999) соединяют идеи Софуса Ли и Максвелла – Вейля и находят уравнения, которые воплощают более сложные формы анаморфной симметрии. Эти уравнения Янга – Миллса легли в основу нашей современной Главной теории.

**1956** г. Фредерик Райнес (1918–1988) и Клайд Коуэн (1919–1974) наблюдают взаимодействия нейтрино, доказывающие их материальную реальность.

**1956** г. Чжэндао Ли (р. 1926) и Чжэньнин Янг выдвигают предположение о том, что в слабом взаимодействии проявляется фундаментальное отличие между левым и правым («нарушение четности»).

Вскоре следует экспериментальное подтверждение.

**1957** г. Джон Бардин (1908–1991), Леон Купер (р. 1930) и Джон Роберт Шриффер (р. 1931) выдвигают эпохальную теорию сверхпроводимости, так называемую БКШ-теорию. Эта работа основана на мощных идеях спонтанного нарушения симметрии, включая механизм Хиггса.

**1961** г. Шелдон Глэшоу (р. 1932) предлагает анаморфную теорию, соединяющую слабые и электромагнитные силы.

**1961–1962** гг. Ёитиро Намбу (р. 1921<sup>[86]</sup>) и Джованни Йона-Ласинио (р. 1932) вводят идею спонтанного нарушения симметрии в конкретную теорию взаимодействия фундаментальных частиц. Джеффри Голдстоун (р. 1933) упрощает и обобщает их концепцию.

**1963** г. Филип Андерсон (р. 1923) утверждает важность для физики элементарных частиц уравнений для массивных фотонов, которые возникли в работах братьев Фритца (1900–1954) и Хайнца Лондона (1907–1970) в **1935-м**, а также Льва Ландау (1908–1968) и Виталия Гинзбурга (1916–2009) в **1950-м**.

**1964** г. Роберт Браут (1928–2011) и Франсуа Энглер (р. 1932); Питер Хиггс (р. 1929), а также Джеральд Гуральник (1936–2014), Карл Хаген (р. 1935) и Том Киббл (р. 1932) создают теоретические модели, увязывающие массивные частицы с анаморфной симметрией.

**1964** г. Мюррей Гелл-Манн (р. 1929) и Джордж Цвейг (р. 1937) предполагают существование кварков, являющихся составными частями адронов.

**1964** г. Абдус Салам (1926–1996) и Джон Уорд (1924–2000) проясняют анаморфную теорию электрослабого взаимодействия.

**1967** г. Стивен Вайнберг (р. 1933) включает в анаморфную теорию спонтанное нарушение симметрии, тем самым формулируя зрелую Главную теорию электрослабого взаимодействия.

**1970** г. Герард 'т Хоофт (р. 1946) совместно с Мартинусом Велтманом (р. 1931) придают предыдущей работе четкие математические основания и демонстрируют ее состоятельность.

**1970** г. Джером Фридман (р. 1930), Генри Кендалл (1926–1999) и Ричард Тейлор выполняют «просвечивание» протона и обнаруживают почти свободные кварки и неизвестное электрически нейтральное вещество.

**1971** г. Шелдон Глэшоу, Джон Илиопулус (р. 1940) и Лучано Майани (р. 1941) добавляют кварки к анаморфной электрослабой теории и предсказывают существование *s*-кварков (очарованных кварков).

**1973** г. Дэвид Гросс (р. 1941), Фрэнк Вильчек (р. 1951) и Дэвид

Политцер (р. 1949) выдвигают теории асимптотической свободы. Гросс и Вильчек формулируют точную теорию сильного взаимодействия – квантовую хромодинамику (КХД).

**1974 г.** Экспериментальное открытие мезонов с тяжелыми кварками обеспечивает полуколичественное доказательство асимптотической свободы и КХД.

**1974 г.** Йогеш Пати (р. 1937) и Абдус Салам, а также Говард Джорджи (р. 1947) и Шелдон Глэшоу предлагают унификацию главных теорий.

**1974 г.** Говард Джорджи, Хелен Квинн (р. 1943) и Стивен Вайнберг исследуют относительную интенсивность различных взаимодействий, используя асимптотическую свободу.

**1974 г.** Юлиус Весс (1934–2007) и Бруно Дзумино (1923–2014) формулируют суперсимметрию.

**1977 г.** Роберто Печчеи (р. 1942) и Хелен Квинн предлагают новую симметрию, чтобы решить « $\theta$ -проблему».

**1977 г.** Вильчек открывает возможность связывания бозона Хиггса с обычной материей через цветные глюоны.

**1978 г.** Вильчек и Вайнберг указывают, что симметрия Печчеи – Квинн предполагает существование важной новой легкой частицы – аксиона.

**1981 г.** Савас Димопулос (р. 1952), Стюарт Раби (р. 1947) и Фрэнк Вильчек демонстрируют количественные преимущества включения суперсимметрии в объединение взаимодействий.

**1983 г.** Несколько авторов предлагают аксионы на роль частиц, из которых, возможно, состоит темная материя.

**1983 г.** Карло Руббиа (р. 1934) и его коллеги в CERN<sup>[87]</sup> экспериментально наблюдают виконы ( $W^-$  и  $Z$ -бозоны), подтверждая анаморфную теорию электрослабых сил.

**1990-е гг.** Эксперименты на Большом электрон-позитронном коллайдере LEP ясно демонстрируют струи, обеспечивая мощное количественное подтверждение асимптотической свободы и КХД.

**2005 г.** На базе идей Кеннета Уилсона (1936–2013), Александра Полякова (р. 1945) и Майкла Кройца (р. 1944) с помощью сверхмощных компьютеров проводятся расчетные эксперименты для подтверждения КХД: теоретически вычисляются массы различных адронов, в том числе протона и нейтрона, очень близкие к определенным экспериментально.

**2012 г.** На Большом адронном коллайдере открыта частица Хиггса.

**2020 г.** Мои пари на открытие суперсимметрии на Большом адронном коллайдере истекают в полночь 31 декабря 2020 г.

## Термины

[88]

Этот раздел содержит определения и короткие комментарии к научным понятиям, которые могут быть не знакомы широкому кругу читателей и использованы в этой книге. В некоторых случаях (например, «энергия» или «симметрия») они объясняют общеупотребительные слова, которые мы используем особым образом – обычно в более узком и специальном значении, чем в их повседневном применении. Я старался, насколько было возможно, сделать его органичной частью единого целого, используя в комментариях темы и примеры из основного текста. Здесь вы также найдете несколько идей, некоторые из которых красивы – их мне очень хотелось включить в текст, но не удалось сделать это, сохранив гладкость повествования. Во многих случаях мне пришлось пожертвовать точностью и математической строгостью ради краткости и доступности.

Замечание по оформлению текста: *курсив* используется для обозначения заглавного слова или словосочетания каждой статьи, чтобы отметить основные места, где оно встречается в статье, а иногда для постановки смыслового ударения. **Жирный** шрифт указывает на существенное использование терминов, про которые есть отдельные статьи.

*Адрон*

*Hadron*

Будучи подверженными **сильному взаимодействию**, **кварки**, **антикварки** и **глюоны** могут связываться и образовывать большое количество разнообразных небольших объектов. *Адрон* – это общий термин для объектов такого типа. **Протоны** и **нейтроны** являются примерами адронов, так же как и атомные **ядра**. Все остальные известные адроны крайне нестабильны, их время жизни варьируется от нескольких наносекунд (миллиардная доля секунды, или  $10^{-9}$  секунд) до гораздо меньших времен.

Большую часть адронов можно полуколичественно понять в рамках **кварковой модели**. (См., если нужно, **Качественный**

**и количественный.**) Согласно кварковой модели, адроны делятся на два обширных класса: **барионы** и **мезоны**. Барионы (класс, включающий протоны и нейтроны) – это связанные состояния, содержащие три кварка, в то время как мезоны – это связанные состояния, содержащие один кварк и один антикварк. (Также существуют антибарионы, состоящие из трех антикварков. См. **Антивещество**.) В более точном представлении, основанном на **квантовой хромодинамике (КХД)**, эти две основные схемы должны считаться каркасом, который дополнен глюонами и дополнительными кварк-антикварковыми парами.

Широко распространено мнение о том, что существуют адроны, которые выходят за рамки обеих схем кварковой модели, такие как «глюболы»<sup>[89]</sup>, где глюоны преобладают над кварками и антикварками. Эта идея является предметом исследований в настоящее время.

(См. также статью **Квантовая хромодинамика (КХД)** и подробное обсуждение в главе «Квантовая красота III», часть 2.)

### *Альфа-частица*

### *Alpha particle*

На начальном этапе экспериментального изучения радиоактивности Эрнест Резерфорд разделил излучаемый материал на альфа-, бета- и гамма-лучи. Они различались по способности проникать в вещество, по восприимчивости к отклонению магнитным полем и по другим свойствам. Дальнейшие исследования показали, что альфа-лучи состоят из ядер атома гелия-4, т. е. являются связанными комбинациями двух протонов и двух нейтронов. Мы называем эти ядра альфа-частицами.

### *Аксиальный вектор*

### *Axial vector*

См. **Четность**, где это понятие появляется в естественном для него контексте.

## Аксиальный ток

## *Axial current*

Аксиальные токи – специальный класс токов, которые не меняют знак при пространственной инверсии (преобразовании четности). Таким образом, аксиальные токи определяют **поля аксиальных векторов**. Я упомянул это довольно хитрое понятие, когда искал убедительный для редакторов журнала *Physical Review Letters* повод для введения термина «**аксион**».

## Аксион

## *Axion*

Аксион – это гипотетическая частица, чье существование сделало бы Главную теорию еще красивее. В настоящее время аксионы также являются превосходными кандидатами на космологическую темную материю.

**Главная теория** имеет множество достоинств, но также обладает некоторыми эстетическими недостатками. Среди последних есть следующий.

Мы экспериментально наблюдаем, что законы физики в очень хорошем приближении (но не полностью) **инвариантны** относительно изменения направления времени. Проще говоря, если взять видеозапись любого физического эксперимента и просмотреть ее задом наперед, то запись все равно будет показывать события, которые подчиняются фундаментальным законам физики. Конечно, если вы возьмете видеозапись из повседневной жизни и развернете ее задом наперед, то, что вы увидите, *не будет* похоже на повседневную жизнь. Но в субатомном мире, где самые фундаментальные законы действуют очевиднее всего, это различие пропадает. Поэтому мы говорим, что законы физики практически полностью инвариантны относительно обращения времени вспять или, по-другому, что они обладают **симметрией** относительно обращения времени (*T*-симметрией).

Свойство законов обладать *T*-симметрией согласуется с Главной теорией, но вообще-то последняя этого не требует. Существует такое

взаимодействие между цветными **глюонами**, которое согласуется со всеми известными общими принципами, включая **квантовую теорию, теорию относительности и локальную симметрию**, а следовательно, согласно Главной теории, оно «возможно» – но его существование нарушало бы *T*-симметрию.

Просто заявить, что в действительности такого взаимодействия не происходит, было бы последовательно, но неубедительно. Более уместным представляется ответ, который впервые предложили Роберто Печчеи и Хелен Квинн – они объяснили это «совпадение», расширив Главную теорию таким образом, чтобы она включала дополнительную симметрию. Если сделать это подходящим образом, то можно объяснить малость нарушения *T*-четности. (Выдвигались и другие возможные объяснения, но ни одно из них не прошло испытание временем.) Это расширение Главной теории не остается без последствий: как заметили мы со Стивеном Вайнбергом, из него следует существование новой, очень легкой частицы с замечательными свойствами – *аксиона*.

Аксионы пока не открыты экспериментально, но то, что мы их не наблюдаем, ни о чем не говорит, так как теория предсказывает, что аксионы должны очень слабо взаимодействовать с обычным веществом, и на сегодняшний день ни один эксперимент не достиг нужной чувствительности. Во время написания этой книги несколько групп экспериментаторов по всему миру активно работали над тем, чтобы найти подтверждения существования аксионов или доказательно исключить их существование.

Можно подсчитать, сколько аксионов образовалось в момент Большого взрыва. Из этих вычислений следует, что Вселенная пронизана аксионным газом, из которого также может состоять космологическая темная материя.

## *Анализ*

## *Analysis*

В физике, химии и математике словом «анализ» обычно называют процесс изучения чего-либо путем исследования его частей. В этом значении «холистический (целостный) анализ» – это оксюморон, а психоанализ – что-то совсем другое.

Два интересных примера анализа – разделение света на спектральные

цвета и анализ функций путем изучения их вариаций на небольших масштабах, как в (дифференциальном) **исчислении**.

### *Анализ и Синтез*

### *Analysis and Synthesis*

«Анализ и Синтез» – это фраза Ньютона, описывающая стратегию достижения полного и глубокого понимания некоторого класса объектов путем досконального изучения поведения его простейших составляющих (анализ) и затем построения целого из частей (синтез). Ньютон сам с большим успехом применил эту стратегию при изучении света, при изучении движения и при изучении математических функций.

Анализ и Синтез – это более изящный, уместный и исторически обоснованный способ выразить то, что часто называют редукционизмом, и который следует предпочесть вне спора.

### *Аналоговый*

### *Analog*

Если некая величина может изменяться гладко или, как часто говорят, непрерывно, мы говорим, что это аналоговая величина. Аналоговые величины противопоставляются цифровым, которые могут принимать только дискретный ряд значений, и таким образом могут изменяться только скачками. В современных основаниях физики длина и продолжительность времени – аналоговые величины.

Девиз Пифагора «Число есть сущность всех вещей» в пределе можно интерпретировать так, что все величины являются в своей основе цифровыми. Однако невозможность выразить одновременно сторону и диагональ квадрата как кратные одной и той же единицы, а также апории Зенона о движении стали первыми предупреждениями о том, что у такого взгляда есть трудности.

Цифровые величины обладают большими преимуществами для вычислений и передачи информации, так как позволяют исправлять небольшие ошибки. Так, например, если вы знаете, что правильный

результат вычисления может быть только 1 или 2, а ваш приближенный расчет дает 1,0023, вы можете заключить, что правильный ответ 1, если только ваше приближение не очень плохое.

Если единица дискретности достаточно мала, цифровая величина может стать хорошим приближением для величины, которая на самом деле является аналоговой. Например, цифровая фотография может состоять из черных точек, которые расположены так близко, что для человеческого глаза, с его несовершенным разрешением, они будут казаться плавно меняющимися оттенками серого, которые зависят от плотности точек.

Математическое описание аналоговых величин обычно использует **действительные числа**, в то время как простейшие цифровые величины описываются **натуральными числами**.

### *Антиматерия, античастицы*

### *Antimatter/antiparticle*

В 1928 г. Поль Дирак предложил новое уравнение, которое мы сегодня называем уравнением Дирака, для описания поведения электронов в квантовой механике. Из этой работы вытекало существенное предсказание: должна существовать античастица, позитрон, с такими же массой и спином, как и у электрона, но с противоположным зарядом. Этот позитрон, который также называют антиэлектроном, является античастицей электрона. Более поздние работы показали, что это явление – куда более общий результат квантовой механики и специальной теории относительности: для каждой частицы существует соответствующая ей античастица, которая имеет те же массу и спин, но противоположные значения электрического заряда, а также слабого заряда, цвета сильного взаимодействия и спиральности.

Антиэлектроны (позитроны) были открыты экспериментально в 1932 г. Антипротоны впервые наблюдались в 1955 г. Сейчас было бы крупным потрясением обнаружить частицу, у которой нет античастицы. **Фотоны** являются собственными античастицами. (Это возможно потому, что они являются электрически нейтральными и не несут никаких других зарядов.)

Когда частица встречается со своей античастицей, они могут аннигилировать в «чистую энергию» – что означает на практике любую

из широкого разнообразия групп частиц и их античастиц. Например, любая частица и ее античастица могут аннигилировать в два фотона или в пару **нейтрино-антинейтрино**, хотя это обычно не самые вероятные исходы. Задачей Большого электрон-позитронного коллайдера LEP<sup>[90]</sup> в CERN, который был предшественником **Большого адронного коллайдера** LHC и занимал тот же самый огромный тоннель, было изучение аннигиляции электронов и позитронов, разогнанных до больших скоростей и движущихся в противоположных направлениях.

Хотя термин *античастица* имеет ясное и точное научное значение, термин *антивещество*, хотя и бывает полезен, немного более сомнительный, или лучше сказать немного наивный. Чтобы понять это словоупотребление, мы должны начать с (такого же сомнительного и наивного) определения «вещества», противоположностью которого оно является. В этом определении мы говорим, что некоторые частицы, из которых мы состоим и с которыми встречаемся в обычной жизни – т. е., *u* и *d* кварки и электроны, – это «вещество». В соответствии с этим определением мы включаем в понятие вещества их близких родственников – т. е. все виды **кварков** и все виды **лептонов** (кварки *u, d, s, t, b*; лептоны *e, μ, τ, νe, νμ, ντ*), в то время как их античастицы мы называем антивеществом. Фотоны при таком делении не попадают по своей природе ни в одну из групп, так как они являются собственными античастицами. В указанном смысле единственное, что отличает «вещество» от «антивещества», это то, что первое более распространено, по крайней мере в нашей части Вселенной. Если бы мы вдруг заменили все частицы в мире их античастицами (и одновременно совершили бы преобразование четности, поменяв местами правое и левое), было бы очень сложно сказать, в чем разница!

Мне кажется, что термин «антивещество» скорее способен запутать, а не прояснить что-либо, и в этой книге я его избегал. Когда я говорю о «веществе», без пояснений, я имею в виду все формы вещества, включая (к примеру) антикварки, фотоны и **глюоны**.

***Антисимметричный***

***Antisymmetric***

Мы говорим, что некоторая величина *симметрична* относительно

преобразования или что величина обладает **симметрией**, когда она не меняется при этом преобразовании. Мы говорим, что величина *антисимметрична* относительно преобразования, когда она меняет знак при этом преобразовании. Это применимо к численным величинам, а также к **векторам** и к **функциям**, потому что во всех этих случаях можно говорить об изменении знака.

Примеры: **Координаты** точек на прямой антисимметричны относительно поворота прямой на  $180^\circ$  относительно начала координат. **Электрический заряд** антисимметричен относительно преобразования, которое превращает частицы в их **античастицы** (см. **Антивещество**).

Фундаментальная характеристика **фермионов** состоит в том, что квантово-механическая **волновая функция**, описывающая систему идентичных фермионов, антисимметрична относительно преобразований, в которых любые два из них меняются местами.

### ***Антропный аргумент, антропный принцип***

### ***Anthropic argument / anthropic principle***

Антропный аргумент в первом приближении имеет следующую форму:

«Мир должен быть таким, какой он есть, чтобы я мог существовать».

Перед тем как обсуждать более сложные тонкости, давайте рассмотрим *антропный принцип* в этой самой простой форме.

Важно разделять два аспекта этого базового антропного аргумента: его истинность и его объяснительную силу. (См. связанное с этим обсуждение в статье **Непротиворечивость и противоречие**.) В зависимости от того, насколько узко определено понятие «Я», в антропном принципе может быть немалая доля тривиальной истины. Если «Я» подразумевает углеродную форму жизни с человеческой физиологией, которая жила подобно тому, как живу я (что, помимо прочего, включает чтение научных книг, в которых делаются сильные, конкретные утверждения об окружающем мире), тогда, пожалуй, конечно, законы физики, как мы их знаем, не говоря уже о многих других фактах о планете Земля, истории Европы, цвете глаз моих детей и т. д., не могут сильно отличаться от тех, что есть, так как эти отличия вскоре исключат мое существование. Так что базовый антропный аргумент, если воспринимать

его буквально, верен. Но этот истинный аргумент имеет очень небольшую объяснительную силу, в основном потому, что существование «меня» – это такое всеобъемлющее предположение, включающее все, что я испытал или когда-либо испытаю, что оно не оставляет ничего, что нужно было бы еще объяснять!

Более сложные версии антропного аргумента должны основываться на менее жестких определениях «Я». Мы можем, например, потребовать, чтобы мир с его основными законами и историей давал возможность появления какому-то виду разумных или обладающих сознанием наблюдателей. Если бы это было не так, то его нельзя было бы наблюдать – да и черт бы с ним! Однако очень сложно определить, что имеется в виду под разумными наблюдателями, а также очень сложно понять, после того как вы определились с формулировкой, какого рода законы и история обуславливают появление разумных наблюдателей. Мне трудно представить, что такие размытые, скользкие идеи приведут нас к значительной объяснительной силе.

Примечательно, что самые глубокие достижения в понимании мира, такие как **Главная теория**, включают в себя такие концептуальные понятия, как **относительность**, **локальная симметрия** и основы **квантовой теории**, которые абстрактны по форме и универсальны по возможности применения. Эти принципы совсем не выглядят похожими на антропный принцип! Очевидно, что в мире происходят вещи, которые выходят за рамки его желания произвести «меня».

В целом антропные аргументы по своей природе смещают центр дискуссии от объяснения к допущению. Так как они компрометируют объяснительную силу, их в принципе следует избегать. Но в подходящих, очень специальных обстоятельствах аргументы в духе антропных могут быть одновременно правомерными и полезными<sup>[91]</sup>. Для ознакомления с примерами, которые могут оказаться интересными, см. **Темная энергия**, **Темная материя**.

*Aromat*

*Flavor*

Существует шесть различных видов, или *ароматов*, **кварков**. В порядке возрастания массы они обозначаются *u* (от английского up –

верхний),  $d$  (down – нижний),  $s$  (strange – странный),  $c$  (charm – очарованный),  $b$  (bottom или beauty – прелестный),  $t$  (top – топ-кварк). Каждый из них «обитает» в трехмерном цветовом **пространстве свойств**, и (следовательно) все они ведут себя одинаково, если говорить о **сильном взаимодействии**. Кварки  $u$ ,  $c$  и  $t$  имеют **электрический заряд**, равный  $2/3$  заряда протона, тогда как  $d$ ,  $s$  и  $b$  имеют электрический заряд, равный  $-1/3$  заряда протона. Они по-разному и немного сложно ведут себя относительно слабого взаимодействия – см. **Семейство**.

Глубокое значение этого избытка видов кварков если и существует, то на настоящий момент неясно. Из всех кварков только  $u$  и  $d$  играют большую роль в современном природном мире, поскольку обильно представлены в **протонах и нейтронах**.

Также есть аналогичный избыток лептонов; в этом случае говорят о различных *ароматах* лептонов.

### *Асимптотическая свобода*

### *Asymptotic freedom*

**Сильное взаимодействие** между двумя **кварками** изменяется под действием непрерывной спонтанной активности квантовых полей, которыми пронизано пространство. Сила взаимодействия ослабевает при сближении кварков и увеличивается при их удалении друг от друга. Это называется *асимптотической свободой*.

У асимптотической свободы есть множество следствий и применений, которые подробно изложены в тексте.

См. также **Конфайнмент** и **Перенормировка (ренормализационная группа.)**

### *Атомное число*

### *Atomic number*

Атомное число **ядра** – это число протонов, которое оно содержит. *Атомное число* ядра определяет его **электрический заряд** и, таким образом, его влияние на **электроны**, а следовательно, его роль в химии тех

атомов и молекул, где оно фигурирует. Ядра, которые имеют одинаковые атомные числа, но разное число нейтронов, называются **изотопами** одного и того же химического элемента.

Пример: ядра углерода-12 ( $^{12}\text{C}$ ) содержат 6 протонов и 6 нейтронов, в то время как ядра углерода-14 ( $^{14}\text{C}$ ) содержат 6 протонов и 8 нейтронов. У этих ядер практически одинаковые химические свойства, поэтому и те и другие называются «углеродом», – но разная масса. Ядра углерода-14 нестабильны, и их распады можно использовать для датирования биологических образцов. (Когда организм умирает, он перестает получать извне новый углерод; следовательно, отношение количества углерода-14 к количеству углерода-12 в останках постепенно уменьшается. В атмосфере углерод-14 возобновляется благодаря столкновениям с космическими лучами.)

### *Барион*

См. Адрон.

### *Бегущая волна*

См. Стоячая волна и бегущая волна.

### *Бесконечно малые*

### *Infinitesimal*

В современной физике и математике мы определяем такие величины, как **скорость** и **ускорение**, с помощью операции взятия предела. Чтобы определить скорость частицы, мы рассматриваем перемещение за короткий промежуток времени, берем отношение и рассматриваем его предельное значение, беря все меньшие и меньшие интервалы. Это предельное значение по определению является скоростью.

В ранний период развития исчисления у его основоположников не было прочных оснований и четких определений. Они руководствовались интуицией и догадками. Лейбницу, в частности, очень нравилась идея

о том, что вместо взятия предела можно рассматривать просто «бесконечно малое» приращение времени и соответствующее ему перемещение и брать отношение этих *бесконечно малых*. Однако ни Лейбниц, ни его последователи не сформулировали эту идею достаточно отчетливо. Она лежала без дела и была практически забыта многие десятилетия, пока математики XX в. не показали, что ее можно **строго** описать несколькими способами.

Идея о бесконечно малых похожа по духу – хотя и противоположна по направлению – на идею, приводящую нас к **бесконечно удаленным точкам** в **проективной геометрии**. В обоих случаях мы заменяем *процедуру* взятия предела *конечными* объектами.

Бесконечно малые предоставляют нам новый способ воплощения Идеального. Они пока еще не сыграли значительной роли в описании физического мира, но являются красивой идеей и поэтому заслуживают ее сыграть.

***Бесконечно удаленная точка, точка схода***

***Point at infinity / vanishing point***

Если мы встанем вертикально на плоской поверхности и посмотрим на две параллельные линии на этой плоскости, простирающиеся вдаль от нас, то увидим, что кажется, будто они сходятся, приближаясь к горизонту. Если мы мысленно нарисуем то, что видим, или если **спроецируем** геометрически эти линии на холст, естественно будет добавить как элемент изображения ограничивающую точку, где они действительно сходятся. Это будет **бесконечно удаленная точка**, или **точка схода**. Мы изображаем, углубляем и размышляем о приложениях этой конструкции в основном тексте.

***Бозоны и фермионы***

***Boson/fermion***

Элементарные частицы делятся на два обширных класса: бозоны и фермионы.

В **Главной теории** к бозонам относятся **фотоны, виконы** (бозоны слабого взаимодействия), цветные **глюоны, гравитоны** и **бозоны Хиггса**. В тексте я часто называю их **частицами взаимодействия (силы)**. Бозоны могут быть созданы или уничтожены поодиночке.

Бозоны подчиняются принципу Бозе<sup>[92]</sup>. Грубо говоря, это значит, что два бозона одного вида особенно счастливы делать одно и то же. Фотоны являются бозонами, и именно принцип Бозе для фотонов делает возможным существование лазеров. Когда им дается такой шанс, вся совокупность фотонов пытается делать одно и то же, создавая узкий пучок спектрально чистого света.

В Главной теории **кварки и лептоны** являются *фермионами*. В тексте я часто называю их **частицами материи**.

Фермионы образуются и исчезают парами. В результате, если у вас есть один фермион, вы не можете просто так избавиться от него. Он может превратиться в другой вид фермиона, или в три, или в пять, а также в любое число не-фермионов (т. е. бозонов; см. выше) – но он не может раствориться, превратиться в ничто, не оставив следа.

Фермионы подчиняются **принципу запрета Паули**. Грубо говоря, это значит, что два фермиона одного вида не любят заниматься одним и тем же. **Электроны** являются фермионами, и принцип запрета Паули для электронов играет ключевую роль в структуре вещества. Он будет нашим проводником в главе «Квантовая красота II», в которой мы исследуем богатый мир углерода.

## ***Большой адронный коллайдер***

## ***Large Hadron Collider***

Большой адронный коллайдер, или БАК (LHC) – инструмент лаборатории CERN около Женевы. Главной целью проекта является исследование фундаментальных процессов при высоких энергиях, а следовательно, при меньших расстояниях и временах, чем это было когда-либо доступно ранее.

Это достигается следующим образом. **Протоны** ускоряют до очень высокой **энергии движения** и формируют из них два узких пучка. Пучки находятся внутри гигантского подземного кольца окружностью 27 км, где они циркулируют в противоположных направлениях, удерживаемые

на траектории мощными магнитами. (Кольцо должно быть большим, а магниты мощными, потому что трудно отклонить такие высокоэнергетичные протоны от прямолинейного движения!) В нескольких точках наблюдения пучкам дают пересечься. Близкие прохождения высокоэнергетичных протонов, летящих в противоположных направлениях, приводят к «столкновениям», при которых огромное количество энергии концентрируется в очень небольшой области пространства, воссоздавая экстремальные условия, последний раз наблюдавшиеся во время самых ранних моментов Большого взрыва. Огромные, сложные «детекторы» – установки величиной десятки метров во всех трех измерениях, набитые ультрасовременной электронной техникой, – извлекают физическую информацию из последствий этих столкновений, которую затем анализируют большие команды высококвалифицированных ученых с помощью глобальной сети мощных компьютеров.

БАК – это более чем значимое дополнение нашей цивилизации к египетским пирамидам, римским акведукам, Великой Китайской стене и соборам Европы: все они являются потрясающими памятниками коллективным усилиям и технологическим достижениям людей.

В июле 2012 г. ученые, работающие на БАК, объявили об открытии бозона Хиггса. Чтобы узнать об этом больше, см. главу «Квантовая красота III», часть 3. В будущих экспериментах, при более высоких энергиях, будут проверены заманчивые идеи об **объединении** взаимодействий и о **суперсимметрии**, которые описаны в главе «Квантовая красота IV».

### *Буст*

### *Boost*

В научной литературе все чаще можно встретить термин «буст» по отношению к преобразованию, которое мы совершаем над системой, когда мысленно прибавляем некоторую постоянную скорость к движению всех частей системы или отнимаем ее. Этот термин, как мне кажется, произошел от первых ступеней<sup>[93]</sup> ракет-носителей, которые придают скорость полезному грузу. В книге я называю такие преобразования не бустом, а **преобразованиями Галилея**, в честь Галилео Галилея, который незабываемо подчеркнул их важность изящным мысленным экспериментом, в котором он приглашает нас на борт парусного судна

в изолированную кабину (как описано в основном тексте).  
См. преобразования Галилея.

## *Вакуум, Пустота*

## *Vacuum, Void*

Под словом «вакуум» обычно понимают «пустое пространство, лишенное материи». Таким образом, говорят о «создании вакуума» путем выкачивания воздуха из сосуда, или о «вакуумных трубках» электронных ламп, или о «вакууме межзвездного пространства». Такое использование может стать неоднозначным по следующим причинам.

- То, что вы найдете, зависит от того, насколько вы готовы искать. «Вакуум» межзвездного пространства, например, пронизан микроволновым фоновым излучением; таким излучением, которое наши глаза ощутили бы как звездный свет; космическими лучами; потоками различных нейтрино; темной энергией и темной материей. На Земле инженеры вакуумной техники могут, приложив усилия, исключить первые две категории из некоторой области пространства и большую часть третьей, но никак не последние три. К счастью, причина того, что это настолько трудно, является также и причиной, почему это не имеет никакого значения для практических целей: потоки нейтрино, темная энергия, темная материя – и, возможно, нечто иное, о чем мы даже еще не знаем! – очень слабо взаимодействуют с **обычным веществом**.

- Что, как вам кажется, там есть, зависит от того, как упорно вы готовы думать. В нашей Главной теории даже идеально «пустое» пространство пронизывают множество **квантовых флюидов: электромагнитный флюид, метрический флюид, электронный флюид, флюид Хиггса** и т. д., а также метрическое поле и **поле Хиггса**.

Что именно имеют в виду люди, когда говорят «вакуум», обычно ясно из контекста, но в размышлении о фундаментальных принципах следует ясно осознавать, что слово «вакуум» не обозначает никакого четко определенного понятия. В частности, философское понятие *Пустоты*<sup>[94]</sup> – пространства, совершенно ничего не содержащего, – очень отличается от любого разумного понимания физического пространства где бы то ни было в современном физическом мире.

В современной физической космологии важно принять во внимание,

что заполняющие пространство поля, такие как **поле Хиггса**:

- производят глубокие физические воздействия, как изменяя поведение материи, так и внося вклад в *темную энергию*;
- присутствуют в любом физически определенном *вакууме* (потому что они являются повсеместно распространенными и повсюду проникающими);
- могут – в экстремальных условиях – изменить свою интенсивность.

Комбинируя эти наблюдения, мы приходим к пониманию того, что могут существовать существенно отличающиеся реализации физического вакуума, где пронизывающие их поля отличаются по величине. Поведение материи в этих различных вакуумах может решительно отличаться, так же как и соответствующие плотности **темной материи** и **темной энергии**.

Будет интересно и изящно сказать, подытоживая эту ситуацию, что пространство само по себе – это материя такого рода, которая может существовать в различных фазах, так же как вода может существовать в виде жидкости, льда или пара. (См. **Вселенная, видимая Вселенная и мультивселенная**.)

### ***Вектор, векторное поле***

### ***Vector/vector field***

Векторы можно определить либо геометрически, либо алгебраически.

Геометрически вектор – математический объект, у которого есть одновременно величина и направление. Примеры:

- Если мы имеем две точки, скажем  $A$  и  $B$ , то прямолинейное перемещение, которое переводит  $A$  в  $B$ , является вектором. Его величина – это расстояние между  $A$  и  $B$ , а его направление – это направление от  $A$  к  $B$ .

- **Скорость** частицы является вектором.

- **Электрическое поле** в любой точке является вектором.

Алгебраически вектор – это просто последовательность чисел.

Эти два определения можно связать друг с другом, введя понятие **координат**. Векторы в примерах выше – это векторы в обычном трехмерном пространстве, которые соответствуют тройкам действительных чисел. Несколько интересных и важных вариаций на эту тему упомянуты в словарной статье о **координатах**.

Когда у нас имеется векторная величина, определенная в каждой точке пространства, мы говорим, что у нас есть *векторное поле*. Примеры:

- Если рассмотреть объем воды, ее различные части будут двигаться с разными скоростями. Эти скорости определяют векторное поле.
- Электрические и магнитные поля – это векторные поля.
- В каждой точке на экране компьютера интенсивности, с которыми светятся на экране красный, зеленый и синий цвета, являются последовательностью из трех чисел и, следовательно, определяют вектор. Таким образом, на экране вашего компьютера имеется векторное поле цветов.

### *Викон*

### *Weakon*<sup>[95]</sup>

Частично прелесть *виконов* состоит в том, что их можно определить несколькими **дополнительными** способами:

- Виконы – это *W*- и *Z*-частицы, которые наблюдаются в детекторах на **ускорителях элементарных частиц**.
- Виконы – это **кванты флюида** слабого взаимодействия, чья реакция на движение слабых зарядов вызывает **слабое взаимодействие**.
- Виконы – это воплощение особой **локальной симметрии**, симметрии вращения в **пространстве свойств** слабого заряда. Таково их наиболее красивое определение: оно показывает родство виконов с цветными **глюонами**, **фотонами** и **гравитонами**. Все они – воплощения **локальной симметрии**. Это напоминает нам о нашем Вопросе и ответе на него в Главной теории. Мы обнаруживаем связь «Реальное ↔ Идеальное» по мере того, как объекты и события реальности все более соответствуют понятиям, которые мы вводим, чтобы нарисовать анаморфную картину локальной симметрии.

### *Виртуальная частица*

См. **Квантовые флуктуации, виртуальная частица, поляризация вакуума и нулевые колебания**.

## Волновая функция

### Wave function

В классической механике частицы в любой момент времени занимают некоторое определенное положение в пространстве. В квантовой механике описание частицы совершенно иное. Чтобы описать, скажем, электрон в **квантовой теории**, мы должны определить *волновую функцию* электрона. Волновая функция электрона задает его **облако вероятности**, плотность которого в некоторой области пространства обозначает относительную вероятность найти там этот электрон.

Здесь я набросаю более точное описание волновых функций электронов. Чтобы это описание не пропало для вас даром, вам понадобится по крайней мере мимолетное знакомство с **комплексными числами** и теорией вероятностей. Заключительная ремарка в этой словарной статье, обозначенная звездочкой (\*), – это самая важная ее часть, с которой вам следует ознакомиться, даже если вы решили лишь бегло просмотреть или пропустить абзацы, ей предшествующие.

Волновая функция электрона – это **поле** комплексных чисел. Иначе говоря, каждой точке пространства в любой момент времени волновая функция приписывает комплексное число. Данное комплексное число называют величиной, или иногда амплитудой, волновой функции в данном месте и в данное время. Волновая функция подчиняется (относительно) простому уравнению, **уравнению Шрёдингера**, но сама по себе не имеет никакого очевидного физического смысла.

Что действительно имеет прямой физический смысл, так это поле положительных (или равных нулю) действительных чисел, которые мы получаем из волновой функции, возводя в квадрат модуль ее величины. Эта математическая операция позволяет нам перейти от волновой функции электрона к связанному с ним облаку вероятности. Вероятность обнаружения электрона в данной точке пространства и в данное время пропорциональна квадрату модуля величины волновой функции в этом месте и в это время.

Хотя он и описывается функцией, заполняющей пространство, не следует думать, что электрон – это протяженный объект. Когда мы наблюдаем электрон, он всегда наблюдается как цельный объект, со своей полной массой, электрическим зарядом и т. д. Волновая функция несет информацию о вероятности обнаружения целой частицы,

не о распределении частей частицы.

Квантово-механическое описание двух или более частиц, как и следовало ожидать, также основано на волновых функциях. Оно вводит новое важное свойство: *запутанность*. Существенная новизна возникает уже для двух частиц, поэтому, чтобы изложить концепцию, насколько это возможно, конкретно и просто, я остановлюсь на этом случае.

Чтобы пояснить контекст, в котором возникает запутанность, позвольте мне начать с изложения предположительного описания двух частиц, которое могло бы показаться разумным, но на самом деле оказывается неправильным. Можно было бы предположить, что волновая функция для двух частиц имеет форму волновой функции одной частицы, умноженной на волновую функцию другой частицы. Отталкиваясь от такого предположения, если мы возьмем квадрат, чтобы получить облако вероятности, мы обнаружим, что совместная вероятность найти первую частицу в точке  $x$ , а также вторую частицу (скажем) в точке  $y$ , равна *произведению* вероятностей найти первую частицу в  $x$  и вторую в  $y$ . Другими словами, эти вероятности независимы. С физической точки зрения это неприемлемый результат, поскольку следует ожидать, что положение в пространстве первой частицы влияет на положение второй.

Правильное описание использует волновую функцию, являющуюся полем в **шестимерном** пространстве, **координаты** которого – это три координаты, описывающие положение первой частицы, и три координаты, описывающие положение второй частицы. Когда мы возводим этот объект в квадрат, чтобы получить совместную вероятность, мы обычно обнаруживаем, что две частицы больше не являются независимыми. Измерение положения одной из них влияет на вероятность того, где мы найдем другую. Поэтому мы говорим, что они запутаны.

Запутанность вовсе не является ни редким явлением в квантовой механике, ни непроверенным закоулком этой теории. Она возникает, например, когда мы вычисляем волновую функцию для двух электронов атома гелия. **Спектр** гелия был как измерен, так и рассчитан с большой точностью, и мы видим, что очень запутанные волновые функции квантовой механики дают результаты, которые соответствуют действительности.

\* В контексте нашего Вопроса почти чудо – обнаружить, что шестимерное пространство, прекрасный плод творческого воображения, воплощено в чем-то столь определенном и конкретном,

как атом гелия. Спектр этого атома, когда мы знаем, как его нужно читать, шлет нам открытки из шести измерений!\*

Чтобы взглянуть на волновые функции еще с одного ракурса, см. в особенности обсуждение в статье о **Квантовой теории**.

(Заключительное замечание и предупреждение: термин «волновая функция» – это не самый лучший выбор для понятия, которое он обозначает. «Волна», вообще говоря, предполагает колебание, поэтому «волновая функция» предполагает функцию, которая колеблется, или функцию, которая описывает колебания в некоторой среде, но квантово-механические волновые функции не должны колебаться, и они не описывают колебания чего-то еще. Более подходящим названием могло бы быть «поле квадратного корня из вероятности электрона», но «волновая функция» слишком глубоко укоренилась в языке и литературе, чтобы всерьез рассматривать возможность изменения термина.)

### *Вселенная, видимая Вселенная и мультивселенная*

### *Universe/visible Universe/multiverse*

Современная физика открыла для космологии впечатляющие возможности, которые превосходят возможности обычного языка. Чтобы должным образом описать их, мы должны одновременно усовершенствовать и расширить повседневное употребление понятий. В частности, уже не годится расплывчатое использование слова «вселенная» в значении «все вокруг». Хотя даже научная литература еще не полностью последовательна в этих вопросах, я считаю, что было бы возможно и полезно различать три понятия, которые отражают наиболее современное научное употребление. Они, вероятно, дорастут до стандарта использования.

*Видимая Вселенная* состоит из всего, что доступно для наблюдения. Принципиальное ограничение возникает из-за конечной скорости света, которая (как мы полагаем) является предельной скоростью передачи информации, и из-за того, что прошло конечное время с момента Большого взрыва, который (как мы полагаем) является событием, раньше которого нельзя ничего увидеть. Ограниченные конечной скоростью и конечным временем, мы осознаем, что имеем доступ не дальше некоторого конечного

расстояния, так называемого горизонта<sup>[96]</sup>. Надо отметить два момента:

- Горизонт растет по мере того, как время, прошедшее после Большого взрыва, становится больше. Таким образом, видимая Вселенная была меньше в прошлом, и мы можем ожидать, что она станет больше в будущем.

- Если мы обнаружим, что скорость света не является фундаментальным ограничением для передачи информации, или если мы научимся видеть то, что было до Большого взрыва, нам придется заново обдумать, что мы подразумеваем под видимой Вселенной.

Видимая Вселенная, которую мы видим сегодня, кажется примерно одинаковой повсюду. Астрономы находят звезды того же типа, организованные в виде примерно таких же типов галактик, повинующихся физическим законам такого же типа, как бы далеко и в каком бы направлении они ни смотрели<sup>[97]</sup>. Если мы предположим, что так и будет продолжаться дальше, по мере роста горизонта в будущем, мы придем к тому, что обычно называют Вселенной. Вселенная в этом смысле является консервативным логическим распространением нашего прошлого опыта наблюдения видимой Вселенной на неопределенное будущее.

Современная физика, однако, дала основания думать, что материальный мир может существовать в **качественно** различных формах, или фазах, примерно в таком же духе, как вода может существовать в виде льда, жидкости или пара. В этих отличающихся фазах пространство пронизано другими **полями** (или теми же самыми полями с другими интенсивностями). (См. **Вакуум**.) Поскольку эти поля в значительной степени определяют свойства материи, которая в них движется, эти различные фазы в сущности реализуют разные законы физики. Если такие отличающиеся области пространства существуют, то «Вселенная», как мы определили ее, – это не вся полнота действительности. Мы называем всю полноту действительности множественной Вселенной, или *мультивселенной*.

Идея о том, что существует мультивселенная, так что законы физики, которые мы наблюдаем, являются отчасти лишь особенностью того места, где нам случилось возникнуть, играет заметную роль в **антропных аргументах**.

## *Harmony*

Мы говорим, что музыкальные звуки находятся в *гармонии* или являются гармоничными, когда они хорошо звучат вместе. Происхождение этого психологического явления в физиологии в настоящее время остается неясным; в основном тексте схематично описана одна из возможных теорий. Музыкальное понятие о гармонии часто бывает расширено, по примеру Пифагора, до более общего понятия «о том, что хорошо сочетается».

## *Геодезическая линия*

## *Geodesic*

На искривленной поверхности может не быть никаких прямых линий, но *геодезические* линии являются для них самой близкой заменой. Геодезическая линия имеет свойство предоставлять кратчайший путь между любыми двумя ее соседними точками. Мы должны ограничиться «соседними» точками, поскольку после длительного «путешествия» геодезическая линия может вновь пройти рядом со своими более ранними частями, и тогда может существовать более короткий путь, идущий наперерез ее длинной траектории.

Пример: геодезические линии на сфере – это ее *большие круги*, получаемые сечением сферы плоскостью, проходящей через ее центр. Следовательно, экватор является большим кругом – и геодезической линией – на Земле, так же как и все меридианы. Трансполярные авиарейсы приблизительно следуют геодезическим линиям для экономии топлива.

Понятие геодезической линии, определенное таким образом, не ограничено поверхностями. Мы можем найти геодезические линии в искривленных пространствах с большим количеством измерений, а также – при соответствующем определении расстояния – в пространстве-времени.

## *Гиперзаряд*

## *Hypercharge*

Средний электрический заряд каждой сущности **Главной теории** называется *гиперзарядом*. (Эти сущности определяются в главе «Квантовая красота III», часть 4.)

Существует сложная связь между **слабым взаимодействием, гиперзарядом и электромагнетизмом**, которую я обошел вниманием в основном тексте. Потребовалось бы несколько страниц сухого текста, чтобы ее объяснить, и это объяснение пролило бы не слишком много света на наши основные вопросы. В примечаниях в конце книги я даю две ссылки, воспользовавшись которыми, вы сможете найти больше информации на эту тему.

### *Главная теория*

### *Core theory*

В этой книге *Главной теорией* называются господствующие теории **сильного, слабого, электромагнитного и гравитационного взаимодействий**, воплощающие принципы **квантовой теории и локальной симметрии** (включая **общую теорию относительности** – локальную версию **галилеевой симметрии**).

Главная теория, или часть ее, не включающая гравитацию, часто называется Стандартной моделью. По причинам, которые я объяснил в тексте книги, ей нужно лучшее название.

(Почему кому-то может прийти в голову исключать гравитацию при определении Главной теории? Часто говорят, что существует фундаментальный конфликт между квантовой механикой и общей теорией относительности, а иногда также заявляют, что этот конфликт влечет за собой парализующий физику кризис. Оба этих утверждения являются преувеличением, а второе явным образом вводит в заблуждение. Например, астрофизики регулярно сочетают общую теорию относительности и квантовую механику в своей работе, не встречая серьезных затруднений.)

Общую теорию относительности можно ввести в уравнения Главной теории особым, искусственным способом, используя тот же самый глубокий принцип – локальную симметрию, – который мы привыкли использовать для остальных взаимодействий. Правила квантовой теории при этом продолжают действовать.

Определенная таким образом Главная теория не способна дать убедительные ответы на мысленные эксперименты касательно некоторых аспектов физики черных дыр, и ее уравнения становятся сингулярными и непригодными, когда мы осуществляем экстраполяцию к началу космологического Большого взрыва, а значит, это не есть Теория всего. Но мы и так это знаем благодаря проблемам **семейств, темной энергии, темной материи** и некоторым другим. Тем не менее это последовательная, **фальсифицируемая, сильная и экономная теория**. Вполне возможно и разумно включить общую теорию относительности в Главную теорию, и я это сделал.)

### *Глобальная симметрия*

### *Rigid symmetry*

Мы говорим, что симметрия физического закона является *глобальной*, если она требует выполнения одного и того же преобразования в каждой точке (и в любой момент времени) в пространстве-времени. **Локальная симметрия**, в отличие от нее, допускает преобразования, которые изменяются от точки к точке в четырехмерном пространстве-времени.

### *Глюон, цветной глюон*

### *Gluon/color gluon*

Глюоны – это наименьшие единицы, или **кванты, глюонного флюида**.

### *Глюонный флюид, глюонное поле*

### *Gluon fluid/gluon field*

*Глюонный флюид* – это активная, заполняющая пространство субстанция, ответственная за **сильное взаимодействие**. *Глюонное поле*

в некоторой точке – это мера воздействия глюонного флюида в этой точке, усредненная по достаточно малому объему пространства и отрезку времени.

## *Гравитация*

## *Gravity*

Пока она действует между элементарными частицами, *гравитация* является гораздо более слабым взаимодействием по сравнению с тремя остальными взаимодействиями **Главной теории**. Однако остальные взаимодействия реагируют на **заряды**, которые могут иметь разные знаки, и поэтому имеют склонность взаимно уничтожаться, когда рядом оказывается множество частиц. Гравитация же реагирует главным образом на энергию и скорее приобретает большую силу, когда множество частиц оказывается рядом. В **небесной механике** гравитация является преобладающим взаимодействием.

Практически при любых обстоятельствах гравитация приводит к притяжению между телами. **Темная энергия** в этом смысле исключительна. В примечаниях в конце книги я предлагаю две ссылки на источники, в которых вы сможете найти больше информации по этой теме. Здесь я просто упомяну три следствия для настоящего, будущего и прошлого Вселенной в целом.

- В настоящее время гравитация **обычного вещества** вместе с **темной материей** преобладает над гравитационным влиянием темной энергии в нашем ближайшем окружении вплоть до масштабов нашей Галактики и немного за ее пределами. Однако на космологических масштабах обычное вещество и темная материя распределены неоднородно, в то время как темная энергия, хотя и имеет гораздо меньшую плотность в нашем ближайшем окружении, вездесуща, и ее влияние накапливается. В результате гравитация темной энергии, которая по существу является гравитацией отталкивания, играет преобладающую роль в эволюции Вселенной в целом. Расширение Вселенной, которое должно было бы замедляться гравитационным притяжением, на деле ускоряется.

- Прямая экстраполяция современной космологии на далекое будущее предполагает, что через сотни миллиардов лет наша Галактика, слившись с галактикой Андромеды и, возможно, с несколькими другими

близлежащими карликовыми галактиками, образует изолированный остров, а всё остальное обычное вещество с темной материей во Вселенной удалится настолько далеко и настолько быстро, что будут недоступны для наблюдения из-за ограниченной скорости света.

Конечно, это очень грубая экстраполяция, учитывая то, насколько сильно менялись взгляды ученых на космологию на гораздо меньших временных масштабах. Ведь прошло меньше *ста* лет с тех пор, как было открыто расширение Вселенной!

- На протяжении большей части из 13 миллиардов лет (или около того) после Большого взрыва гравитация обычной и темной материи доминировала над влиянием темной энергии даже на космологических масштабах. Однако эти виды материи «разбавлялись» расширением Вселенной, а плотность темной энергии оставалась постоянной, и (примерно) в последние два миллиарда лет последняя начала доминировать. Однако существуют веские причины подозревать, что в *очень* ранней истории Вселенной все было по-другому, и темная энергия играла главную роль, так что ее гравитация отталкивания привела к периоду быстрой космологической *инфляции*.

Ньютоновская теория гравитации была эпохальным событием в истории человеческой мысли. Предоставив точное объяснение многим аспектам движения небесных тел и основываясь на нескольких четко сформулированных математических принципах, она установила новые стандарты научной точности и амбициозности. Однако в начале XX в. теория Ньютона была вытеснена **общей теорией относительности** Эйнштейна, которая остается основополагающей по сей день.

### **Гравитон**

### **Graviton**

Гравитоны – это наименьшие единицы, или **кванты**, возмущений в **гравитационном флюиде**, также называемом **метрическим флюидом**. Таким образом, гравитоны для **гравитации** – то же самое, что **фотоны** для **электромагнетизма**. Предсказывается, что отдельные гравитоны должны крайне слабо взаимодействовать с **обычным веществом**, и шансы наблюдать их непосредственно как индивидуальные объекты очень малы. Гравитационные волны, которые потенциально возможно

зарегистрировать, состоят из огромного количества гравитонов.

***Грассмановы числа***

***Grassmann numbers***

Эти числа удовлетворяют **антисимметричному** правилу умножения

$$xy = -yx.$$

Грассмановы числа выступают в суперсимметрии в качестве координат квантовых измерений.

***Графен***

***Graphene***

*Графен* – это химическое вещество, состоящее целиком из углерода. В графене атомы углерода формируют двумерный лист из **ядер**, расположенных по образцу медовых сот. Графен имеет выдающиеся механические и электрические свойства.

***Группа (преобразований), непрерывная группа, группа Ли***

***Group of transformations, continuous group, Lie group***

Часто бывает полезно рассматривать преобразования, в результате которых некоторая структура остается в целом неизменной, или **инвариантной**, тогда как ее части обычно перемещаются – другими словами, **преобразования симметрии** или просто **симметрии** этой структуры – не только по отдельности, но и все вместе. Такие совокупности преобразований симметрии называются *группами преобразований*.

Группы преобразований бывают очень разнообразны. К примеру, некоторые позволяют плавное изменение, некоторые дискретны. (См. **Непрерывная симметрия.**) Но все группы объединяет несколько важных свойств:

- Мы можем комбинировать два преобразования симметрии, производя сначала одно, а затем другое. В результате такого объединенного преобразования структура также останется инвариантной, следовательно, оно тоже задает преобразование симметрии.

- Для каждого преобразования симметрии существует противоположное ему, или (как обычно говорят) *обратное*, преобразование. Если исходное преобразование превращает  $x$  в  $x'$ , то обратное ему преобразование превращает  $x'$  в  $x$ .

- Если мы скомбинируем некоторое преобразование с обратным ему преобразованием (в любом порядке), следуя нашему первому правилу, то результатом будет тривиальное *тождественное преобразование*, которое «превращает» любой  $x$  в себя же.

Норвежский математик Софус Ли начиная с конца XIX в. глубоко изучал группы преобразований, которые позволяют плавное изменение и могут быть исследованы методами дифференциального и интегрального **исчисления**. В его честь эти группы симметрий называют *группами Ли*. Группы симметрий для кругов, сфер и их обобщений на случай большего числа измерений, состоящие из всех преобразований, которые мы можем получить путем комбинации вращений вокруг всех возможных осей и на все возможные углы, называются группами Ли.

Эти группы вращений, так же как и другие группы Ли, находят большое применение в современной квантовой физике. Прежде всего группы симметрий **пространств свойств**, основанных на различных видах **зарядов**, которые являются краеугольными для наших **Главных теорий сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий**, являются группами Ли – так же как и более обширные *группы симметрии*, на которые мы рассчитываем в нашей попытке объединить эти теории. См. также **Локальная симметрия**.

*Давление*

*Pressure*

Это понятие возникает, когда мы обсуждаем силы применительно к непрерывным средам (в противоположность частицам). Каждая часть сплошной среды прилагает силы к ее соседним частям, действуя на разделяющих их поверхностях. (Эти поверхности вводятся как воображаемые объекты и не обязаны быть реальными границами.) Давление определяется в таких случаях как сила, действующая на единичную площадь.

### *Дальнодействие*

### *Action at a distance*

*Дальнодействие* – это особенность ньютоновской теории **гравитации**: тела гравитационно воздействуют на другие, даже сильно удаленные тела, мгновенно через пустое пространство. Самому Ньютону не нравилась эта особенность его теории, но математические выкладки привели его именно к этому. Успех теории Ньютона, основанной на принципе дальнодействия, был столь абсолютным, что эта идея была молчаливо принята и первыми исследователями электричества и магнетизма.

Фарадей разработал альтернативный взгляд, согласно которому электрические и магнитные силы передаются как давление посредством заполняющих пространство флюидов. Максвелл развил интуитивные догадки Фарадея математически и таким образом пришел к флюидной или, иначе, полевой теории электромагнетизма, которой мы пользуемся по сей день.

Астрология постулирует мощное дальнодействие, но, мягко выражаясь, нет никаких достоверных свидетельств ее правомерности.

### *Действительные числа*

### *Real numbers*

На интуитивном уровне *действительные числа* – это числа, которые допускают непрерывное изменение. Подобно тому, как **натуральные числа** естественно возникают в процессе счета предметов, *действительные числа* действительно возникают в процессе измерения

длины.

Длины могут быть разделены на очень маленькие кусочки. Поскольку не существует *очевидного* предела этому процессу деления, математики предполагают в качестве рабочей гипотезы, что никакого предела нет. Как эта гипотеза отражена в числах? Поскольку каждая последующая цифра в десятичной дроби по мере движения направо отвечает все более мелкому разбиению величины, напрашивается мысль, что нам следует допустить бесконечные десятичные дроби.

Ньютон был чрезвычайно впечатлен бесконечными десятичными дробями, которые в его время были свежим изобретением. Они послужили прямым источником вдохновения для его работ с бесконечными рядами и в исчислении бесконечно малых величин:

Меня удивляет поэтому, что никто... не направил своего внимания на приложение к буквам принципов недавно открытого учения о десятичных дробях, особенно потому, что при этом открывается путь к более трудным и более важным открытиям. В самом деле, это учение о буквенных выражениях находится в таком же отношении к алгебре, как учение о десятичных дробях к обычной арифметике, и кто учитывает аналогию, существующую между десятичными числами и бесконечно продолжающимися алгебраическими выражениями, сможет тогда легко изучить сложение, вычитание, деление, умножение и извлечение корней<sup>[98]</sup>.

Другими словами, Ньютон считал своим основным нововведением то, что он решился использовать вместо конкретных чисел неизвестное  $x$  алгебры в таких же разложениях, как и для десятичных дробей. Самые глубокие достижения гения часто кажутся выросшими, как в данном случае, из детской непосредственности и желания позабавиться.

«Десятичные числа, которые продолжаются бесконечно» – отличное описание действительных чисел, и оно соответствует тому, как большинство математиков и по существу все физики обычно думают о них. Но это не **строгое** определение. Проблема создания точного определения состоит в том, чтобы зафиксировать главную идею о том, что нечто «продолжается бесконечно», используя предложения, которые бесконечно не продолжаются. На самом деле довольно трудно дать строгое определение действительных чисел. Это удалось сделать только в конце XIX в., хотя люди использовали действительные числа в течение сотен лет

до того.

В современной физике благодаря открытию атомов и странностям **квантовой теории** корректность гипотезы о том, что не существует предела для деления отрезка, совсем не очевидна. Однако действительные числа продолжают обеспечивать интеллектуальный материал, из которого отчеканены наши Главные теории. Почему? Это кажется очень странным, по крайней мере мне. (См., чтобы узнать об этом, **Бесконечно малые**.)

### *Динамический закон, динамическое уравнение*

### *Dynamical law/dynamical equation*

Динамические законы – это законы, которые определяют, как величины меняются во времени. Динамические законы формулируются в виде *динамических уравнений*.

Пример: Второй закон движения Ньютона определяет **ускорение** тел, которое показывает, как их **скорости** меняются со временем.

Контрпример: **Законы сохранения**, напротив, констатируют, что величины не меняются со временем.

Основные законы нашей **Главной теории** являются динамическими законами, но они подразумевают законы сохранения для нескольких особых величин.

Второй контрпример: в Главной теории существует некоторое число так называемых *свободных параметров*. Это величины, участвующие в уравнениях, чьи значения не фиксированы никаким общим принципом, но скорее берутся из эксперимента. Они молчаливо считаются постоянными во времени.

Возможный контрпример: основная идея физики **аксионов** состоит в том, что один из этих параметров, так называемый параметр  $\theta$ , подчиняется динамическому уравнению более общей теории. В этой более общей теории «случайность» того, что наблюдаемое значение  $\theta$  очень мало, становится следствием решения *динамического уравнения*. В целом можно надеяться, что другие свободные параметры Главной теории будут когда-нибудь определены из решений динамических уравнений в рамках более фундаментальных теорий.

(См. также **начальные условия**.)

## Длина волны

## Wavelength

Волны, которые повторяются или, как мы говорим, **периодически** изменяются в пространстве, особенно важны – одновременно потому, что они возникают естественным путем, и потому, что они предоставляют нам основные элементы, из которых мы можем воссоздать более сложные волновые движения, в духе **Анализа и Синтеза**. Чистые музыкальные тона среди звуковых волн и чистые спектральные цвета для случая **электромагнитных волн** являются периодическими в пространстве, так же как и во времени. (См. **Тон, чистый тон**.)

Расстояние между повторениями в простой волне называют ее *длиной волны*. Таким образом, *длина волны* играет ту же роль для изменения в пространстве, что и **период** для изменения во времени. Примеры:

- Самые низкие тона, которые люди могут слышать, имеют длины волн (в воздухе) около 10 метров, в то время как самые высокие тона, которые люди могут услышать, имеют длины волн (в воздухе) приблизительно один сантиметр. Не случайно размеры большинства музыкальных инструментов сопоставимы со средней длиной волны в этом промежутке, ведь они предназначены для воспроизведения звуковых волн, которые люди могут услышать. Басовые трубы духовых органов на одном краю и флейты-пикколо на другом лежат на границах этого диапазона. Свистки для собак находятся слегка за его пределами!

- Спектральные цвета, которые могут видеть люди, имеют длины волн в пределах приблизительно от 400 нанометров (что эквивалентно  $4 \times 10^{-7}$  метрам, или 0,4 микрона) на синем краю, до 700 нанометров на красном краю спектра. Этим маленьким длинам волн сложно поставить в соответствие какие-либо механические приспособления. «Музыкальные инструменты» для света – это атомы и молекулы.

Конечно, можно расширить двери восприятия<sup>[99]</sup> искусственно, с помощью соответствующих приборов.

## Дополнительный, дополнительность

## Complementary/complementarity

Мы говорим, что два подхода к одной и той же задаче *дополнительны* (или *комплементарны*), если каждый из них правомерен и логичен сам по себе, но они не могут применяться одновременно, поскольку мешают друг другу. Это распространенная ситуация в **квантовой механике**. Например, можно выбрать, измерять положение частицы в пространстве или ее **импульс** – но невозможно измерять обе эти характеристики одновременно, так как эти измерения мешают друг другу. Отчасти вдохновленный подобными примерами, но также и своим обширным жизненным опытом, Нильс Бор предположил, что будет разумно применять понятие *дополнительности* гораздо более широко в качестве оригинального метода решения трудных задач и преодоления очевидных противоречий. Такое более широкое понятие *дополнительности*, которое кажется мне полезным и раскрепощающим, лучше всего объяснить на примерах. Вы найдете несколько таких примеров в нашем заключительном постскрипту «Красивый ответ?».

### *Закон Ампера (Закон Ампера – Максвелла)*

### *Ampère's law/Ampère – Maxwell's law*

Закон Ампера сейчас считается частью одного из **уравнений Максвелла**, хотя исторически он был открыт раньше. Закон Ампера в его оригинальной формулировке гласит, что **циркуляция магнитного поля** по замкнутому контуру равна потоку электрического тока через любую поверхность, ограниченную этим контуром. Чтобы разобраться в этом, ознакомьтесь со статьями **Циркуляция**, **Поток** и **Ток**. Также вам будет полезна цветная вклейка N.

Максвелл, руководствуясь соображениями математической логики и красоты, видоизменил закон Ампера, добавив в него еще один член<sup>[100]</sup>. Согласно полному закону Ампера – Максвелла циркуляция магнитного поля по замкнутому контуру равна потоку электрического тока через любую поверхность, ограниченную этим контуром, *плюс* скорость изменения потока электрического поля через эту поверхность.

Новое слагаемое Максвелла в каком-то смысле можно назвать дуальным к **закону Фарадея**. Закон Фарадея гласит, что изменяющееся магнитное поле может создавать электрическое поле, тогда как поправка Максвелла означает, что изменяющееся электрическое поле может

создавать магнитное поле.

### ***Закон сохранения, сохраняющаяся величина***

### ***Conservation law/conserved quality***

Мы говорим, что некая величина *сохраняется*, если ее значение не меняется со временем. *Закон сохранения* – это утверждение о том, что некоторая величина сохраняется. Многие из наших важнейших озарений об устройстве мира могут быть выражены в виде законов сохранения. Эмми Нётер доказала важную теорему, подробно описанную в тексте книги, которая проводит тесную связь между законами сохранения и наличием **симметрии**, или инвариантности.

Примеры: сохранение **энергии**, сохранение **импульса**, сохранение **момента импульса** и сохранение **электрического заряда** – это законы сохранения; энергия, импульс, момент импульса и электрический заряд – это сохраняющиеся величины.

Фраза «сохранение энергии» заслуживает особого внимания, поскольку ее использование в науке отличается от общепринятого. Нам часто советуют сохранять – беречь – энергию, например, выключая электрический свет ночью, или снижая температуру на наших обогревателях, или гуляя пешком вместо того, чтобы использовать машину. Но действительно ли миру нужна наша помощь, чтобы его основные законы соблюдались? Смысл в том, что, когда нас побуждают сохранять энергию, на самом деле нас просят удерживать энергию в таких формах, которые могут быть использованы позже для выполнения полезной работы, и не позволять ей переходить в бесполезные (тепло) или вредные (химические реакции, в которых выделяются токсины) формы. Понятие *свободной энергии* в термодинамике отражает некоторые из этих различий. Свободная энергия, которая является обобщенно-полезным видом энергии, не сохраняется. Она имеет тенденцию уменьшаться, или, как часто говорят, рассеиваться, со временем.

### ***Закон Фарадея***

### ***Faraday's law***

Этот закон утверждает, что **циркуляция электрического поля** по замкнутому контуру равна скорости изменения **потока магнитного поля** через любую поверхность, натянутую на этот контур, взятой со знаком минус. *Закон Фарадея* увековечен в одном из **уравнений Максвелла**.

## *Измерение и размерность*

### *Dimension*

Интуитивно, *измерение* – это возможное направление движения. Так, мы говорим, что прямая или кривая имеет одно измерение. Плоскость или поверхность имеет два измерения, поскольку требует движения в двух независимых направлениях – например, мы можем назвать их «горизонтальное» и «вертикальное», или «север-юг» и «запад-восток», – чтобы достичь любой точки из любой другой. Обычное пространство, в котором мы живем, или твердое тело имеет три измерения.

Более гибкое понятие «пространства» и измерения возникает естественным образом при введении координат. Здесь вам следует обратиться к статье о **координатах**, где обсуждается это понятие. Размерность<sup>[101]</sup> пространства, в котором введены координаты, равна необходимому для него числу координат. Это понятие в приложении к простым, гладким геометрическим объектам согласуется с предыдущей интуитивной идеей.

Математики обобщили эти более или менее интуитивные понятия измерений многими способами. Два примечательных обобщения – это **комплексные измерения** и дробные, или *фрактальные*, размерности. Комплексные измерения добавляют больше координат, но таких координат, которые являются **комплексными числами**. Дробные размерности могут возникнуть при рассмотрении объектов, содержащих очень богатую локальную структуру и очень далеких от понятия гладкости (см. **Фракталы**). В последние годы в связи с **суперсимметрией** физики ввели понятие **квантовых измерений**. Координаты квантовых измерений являются **грассмановыми числами**.

Есть и еще одно, совершенно отличное использование слова «размерность» в науке. В этом употреблении мы говорим о единицах, в которых измеряется какая-либо величина, как о ее размерности. В этом

смысле площадь имеет размерность длины в квадрате, тогда как у **скорости** размерность длины, поделенной на время, у **силы** – размерность массы, умноженной на длину и поделенной на квадрат времени, и т. д. Чтобы не допустить возможной путаницы, я избегал использования слова «размерность» в этом смысле.

### *Изотоп*

### *Isotope*

Ядра с одинаковым числом протонов, но с различным числом нейтронов называются *изотопами*. Ядра, которые являются изотопами, имеют одну и ту же величину **электрического заряда**, что приводит к практически одинаковому химическому поведению, хотя они значительно отличаются по **массе**.

### *Импульс*

### *Momentum*

Импульс вместе с **энергией** и **моментом импульса** является одной из выдающихся сохраняющихся величин классической физики. Каждая из них также развилась в основополагающий столп современной физики.

*Импульс* тела является мерой его количества движения. Количественно он равен **массе** тела, умноженной на его **скорость**. (Это нерелятивистская версия, верная для небольших скоростей. **Специальная теория относительности** приводит к родственной, но более сложной формуле.)

У импульса есть направление, так же как и величина. Таким образом, это векторная величина.

Импульс системы тел равен сумме импульсов тел по отдельности.

Импульс сохраняется в самых разнообразных обстоятельствах. Этот результат лучше всего понятен в рамках общей теоремы Нётер, которая связывает **законы сохранения** с **симметрией**. В этой парадигме сохранение импульса отражает симметрию (инвариантность) физических законов относительно **трансляции (сдвига)** в пространстве – т. е. относительно преобразований, которые перемещают все в рассматриваемой

системе на одинаковое расстояние. Другими словами, мы имеем сохранение импульса, если законы, управляющие нашей системой, не зависят ни от какого внешне заданного, фиксированного положения в пространстве.

В квантовом мире импульс остается правомерным понятием и приобретает дополнительные, очень изысканные и красивые свойства.

### *Инвариантность*

### *Invariance*

Мы называем что-то *инвариантным* относительно некоторого преобразования, если такое преобразование не изменяет его.

Примеры:

- Расстояние между объектами инвариантно, если вы перемещаете все объекты в одном и том же направлении на одинаковое расстояние (инвариантность расстояния относительно **трансляции** в пространстве).

- Форма круга является инвариантной, если вы поворачиваете его вокруг его центра (инвариантность круга относительно вращения).

- Скорость, с которой распространяется луч света, является инвариантной, если вы движетесь с любой постоянной скоростью. Таким образом, мы говорим, что скорость света является инвариантной относительно **преобразований Галилея** или, что эквивалентно, относительно **бустов**, которые преобразуют координаты между системами отсчета, связанными с платформами, движущимися с различными скоростями.

Третий из этих примеров описывает ключевое положение **специальной теории относительности Эйнштейна**.

### *Интенсивность (света)*

### *Intensity of light*

*Интенсивность* света – точное понятие, которое соответствует воспринимаемой степени яркости. *Интенсивность* луча света, падающего на поверхность, – это количество энергии, которую луч доставляет на эту

поверхность, в единицу времени и на единичную площадь<sup>[102]</sup>. Это определение позволяет нам обобщить понятие интенсивности на все части электромагнитного спектра, такие как радиоволны, инфракрасное излучение, ультрафиолетовое излучение и рентгеновские лучи.

## *Исчисление*

## *Calculus*

Русским словом *исчисление* принято переводить английское *calculus*, которое, в свою очередь, происходит от латинского слова, обозначающего камень или гальку. Его современное использование в математике восходит к операции счета или учета расходов и доходов с помощью счетных камешков (так же как многие люди делают это, даже в наши дни, с помощью счет). Мы видим след этого происхождения в общем английском термине «*calculation*», который используется для обозначения множества различных методов и операций для обработки информации, и в русской «*калькуляции*» с несколько более узким значением.

Математика признает несколько видов исчисления (например, исчисление высказываний, лямбда-исчисление, вариационное исчисление). Но один конкретный метод обработки математических данных настолько важен и произвел такой эффект на ученые умы, что когда люди произносят «*calculus*» без каких-либо пояснений, то подразумевается именно он – математический анализ.

В этом понимании «*calculus*» – это метод **Анализа и Синтеза** в применении к изучению гладко меняющихся процессов, или **функций**. Две ветви математического анализа, дифференциальное и интегральное исчисление, отражают этот метод. Дифференциальное исчисление снабжает нас методами для анализа поведения на очень малых отрезках, тогда как интегральное исчисление предоставляет методы для синтеза такой локальной информации в глобальное понимание.

Выдающимся приложением математического анализа, которое имел в виду Ньютон, развивая этот предмет, является описание движения. Можно ввести такие понятия, как **скорость** и **ускорение**, для того, чтобы охарактеризовать движение на очень коротких отрезках времени (дифференциальное исчисление), или, наоборот, можно использовать информацию о скорости и ускорении, чтобы вычислять орбиты

(интегральное исчисление). В классической механике законы о **силах** предоставляют информацию об ускорении тела. Важной задачей в классической физике является задача о том, как использовать эту информацию: понять, как движется тело в ответ на известное ускорение. Это задача интегрального исчисления: понять что-то большее из знания малого.

### *Калибровочная симметрия*

### *Gauge symmetry*

Это еще один термин для **локальной симметрии**.

### *Калибровочная частица*

### *Gauge particle*

Чтобы обеспечить выполнение **локальной** (калибровочной) **симметрии**, необходимо ввести соответствующие **флюиды**, чьи свойства специально подобраны для этой цели. В **Главной теории** по этой причине появились **гравитационный, сильный, слабый и электромагнитный флюиды**. Наименьшие единицы, или кванты, этих флюидов – **гравитоны, цветные глюоны, виконы и фотоны** – по этой причине называются **калибровочными частицами**. Этот термин звучит обыденно, однако за ним скрывается глубокий и красивый факт: частицы, с помощью которых передаются фундаментальные взаимодействия Природы, являются **воплощениями симметрии**.

### *Качественный и количественный*

### *Qualitative/quantitative*

Мы говорим, что понятие, теория, представление или измерение являются **количественными**, когда они выражаются числами. В противном

случае они *качественные*. «Числа», используемые в количественном описании, могут быть **натуральными числами, действительными числами, комплексными числами** или какими-то другими, в зависимости от задачи.

Мы также говорим о *полуколичественных* концепциях, теориях, представлениях или измерениях, когда они выражены с использованием чисел, но не вполне точно или последовательно. Мы можем обнаружить, что различные ученые-практики, используя ту же самую полуколичественную физическую теорию, выводят из нее различные следствия в зависимости от того, каким образом они дополняют плохо определенные части теории.

Слово «качественный» может также использоваться для усиления следующим образом. Говоря, что идея или явление *качественно* новы, мы подразумеваем, что это не просто дальнейшая разработка или углубление того, что было известно прежде, а нечто принципиально другое, так что старое и новое нельзя сравнивать количественно. Например, **волновые функции квантовой теории** качественно отличаются от **орбит** классической физики, чье место они заняли теперь.

**Квант (единица материи), кванты**

**Quantum (unit of matter)/quanta**

Объекты, которые мы обычно называем **элементарными частицами**, считаются, согласно нашей **Главной теории**, возмущениями в **квантовых флюидах**. Таким образом, **фотоны** – это возмущения в **электромагнитном флюиде**, **электроны** – возмущения в **электронном флюиде**, **глюоны** – возмущения в **глюонном флюиде**, **частицы Хиггса** – возмущения в **флюиде Хиггса** и т. д. Если мы рассматриваем движение этих флюидов согласно правилам классической физики, мы видим, что их энергия может принимать непрерывный ряд значений. Но когда мы рассматриваем их согласно правилам **квантовой теории**, мы обнаруживаем, что разрешенные возмущения существуют в виде неделимых единиц, а именно в виде чего-то, что мы признаем элементарными частицами!

См. главным образом статью о **Фотоне**, чтобы узнать больше о **кванте электромагнитного поля** – исходных «квантах света» Планка и Эйнштейна.

## Квантование

## Quantization

Этот термин используется в трех различных смыслах: в общем, в конкретном специальном значении и как элемент жаргона.

Общий смысл: когда мы отображаем, или, как мы говорим, **проецируем** непрерывную величину на набор дискретных значений, мы говорим, что подвергли эту величину *квантованию*. Другими словами, процесс квантования превращает **аналоговую** величину в ее **цифровое** представление. Квантование в этом смысле является самой обычной практикой в современной инженерии и обработке информации, потому что цифровые величины легче передать и хранить их точные значения, чем аналоговые величины. (См. **Аналоговый** и **Цифровой**, чтобы узнать больше.) За некоторыми, очень специальными исключениями современные компьютеры работают лишь с цифровой информацией, и поэтому значения аналоговых сигналов, таких как **интенсивность** света, квантуются еще до того, как они будут введены. Эта операция называется *квантованием*.

Важный результат квантовой механики состоит в том, что она квантует (в вышеуказанном смысле) многие величины, которые в классической физике были непрерывны. (За этим стоит Природа, или Творец, а не какой-то человек-инженер!) Примеры квантуемых в узком смысле величин и объектов:

- **Энергия** в электромагнитной волне. См. **Фотон**.
- **Энергия** в атоме. Согласно классической механике отрицательно заряженный электрон может двигаться вокруг положительно заряженного протона по многим слегка отличающимся орбитам, что позволяет ему иметь непрерывный диапазон энергий. В квантовой механике разрешенные орбиты отличаются дискретно, т. е. являются квантованными, и, следовательно, разрешенные энергии тоже. (См. **Стационарное состояние, Спектры (атомный, молекулярный и прочие)** и подробное обсуждение с рисунками в главе «Квантовая красота I».)
- **Элементарные частицы** как таковые. См. **Квант (единица материи), кванты**.

Жаргон: физики часто называют процедуру применения квантовой механики к физической системе «квантованием» этой системы. Это существенно иное использование термина, которое может вызвать путаницу. Профессионалы в своих беседах могут использовать его

без опаски, но в этой книге я избегаю такого использования.

## **Квантовая теория, квантовая механика**

## **Quantum theory/quantum mechanics**

Великое открытие начала XX в. состоит в том, что законы физики, используемые для описания больших тел и воплощенные в ньютоновской механике и электродинамике Максвелла, не подходят для того, чтобы описать атомы и их **ядра**. Чтобы описать поведение материи на атомных и субатомных масштабах, оказалось необходимым не просто дополнить то, что было известно раньше, а сконструировать радикально иную систему взглядов, в которой многие идеи, которые считались давно устоявшимися, пришлось отбросить. Обобщающий термин *квантовая теория*, или *квантовая механика*, относится к этой новой платформе. Она была сформирована в общих чертах к концу 1930-х гг. С тех пор наши возможности справиться с математическими вызовами, которые бросает нам квантовая теория, несравнимо улучшились (см. **Перенормировка**), и мы пришли благодаря нашим **Главным теориям** к значительному детальному пониманию основных взаимодействий Природы. Но эти разработки имели место в *рамках* квантовой теории.

Многие физические теории могут быть сформулированы в виде достаточно конкретных предположений о физическом мире. **Специальная теория относительности**, например, является по сути результатом объединения двух предположений: предположения о **галилеевой симметрии** и предположения об **инвариантности** скорости света. Каждая из наших **Главных теорий** на деле является предположением о наличии **локальной симметрии** – вместе со специфическими подробностями того, как связанные с ней **преобразования симметрии** воздействуют на пространство-время и материю.

Квантовая теория в ее современном понимании устроена иначе. Квантовая теория не является какой-то определенной гипотезой, а представляет собой сеть тесно связанных и переплетающихся идей. Я вовсе не хочу внушить вам, что квантовая теория определена нечетко – это не так. За редкими и, как правило, временными исключениями все сведущие ученые, занимающиеся квантовой механикой, столкнувшись с любой конкретной физической проблемой, придут к согласию о том,

как следует подходить к этой проблеме, используя квантовую теорию. Но я сомневаюсь, что многие из них (а может, и вовсе никто) смогли бы точно сказать, какие предположения они сделали, чтобы к этому прийти.

Хотя точное определение дать тяжело, но все же возможно (и полезно для ясности) указать здесь несколько качественно новых тем, которые квантовая теория привносит в наше описание материального мира:

- В описании материи элементарные объекты – это не частицы, занимающие положение в пространстве, и даже не **поля** (наподобие **электрических полей**), которые заполняют все пространство скалярными числами или векторами, а **волновые функции**. Волновые функции приписывают **комплексные числа**, называемые **амплитудами**, возможным конфигурациям объекта, который они описывают.

Таким образом, волновая функция отдельной частицы приписывает амплитуду всем возможным положениям частицы – в каждой точке пространства. Волновая функция пары частиц приписывает амплитуду парам точек в пространстве, т. е. точкам в шестимерном пространстве парных положений. Волновая функция электрического поля – это объект ошеломляющей необъятности. Поскольку она приписывает амплитуду любому возможному значению электрического поля в целом, волновая функция электрического поля – это функция от (векторных) функций!

- На любой допустимый физический вопрос о физической системе можно ответить, посмотрев на ее волновую функцию. Но связь между вопросом и ответом не так уж проста. И способ, которым волновые функции отвечают на вопросы, и ответы, которые они дают, имеют удивительные, если не сказать таинственные свойства.

Чтобы быть конкретнее, давайте сначала рассмотрим это в относительно простом контексте отдельной частицы. (Здесь мы частично резюмируем обсуждение из основного текста.) Чтобы задать вопросы, мы должны выполнить определенные эксперименты, которые исследуют волновую функцию различными способами. Мы можем выполнить, например, эксперименты, которые измеряют положение частицы, или эксперименты, которые измеряют **импульс** частицы. Эти эксперименты отвечают на вопросы «Где находится частица?», «Как быстро она перемещается?».

Как волновая функция отвечает на эти вопросы? Сначала она делает некоторую обработку и затем выдает вам вероятности.

Что касается вопроса о положении, обработка довольно проста. Мы берем значение, или амплитуду, волновой функции – комплексное число, не забывайте – и возводим ее модуль в квадрат. Для каждого

возможного положения это дает нам положительное число или ноль. Это число – вероятность найти частицу в данной точке пространства. (Строго говоря, это плотность вероятности, но не будем умножать сложности.)

Что касается вопроса об импульсе, процесс обработки значительно более сложен. Чтобы узнать вероятность наблюдения некоторого импульса, вы должны сначала выполнить взвешенное усреднение волновой функции – точный способ выполнить взвешивание зависит от того, каким импульсом вы интересуетесь, – а затем возвести в квадрат это среднее значение.

Здесь три важных момента:

- Вы получаете вероятности, а не определенные ответы.
- Вы не получаете доступ к самой волновой функции, вы только мельком видите ее обработанные версии.
- Получение ответов на различные вопросы может потребовать обработки волновой функции разными способами.

Каждый из этих трех моментов чреват серьезными проблемами.

Первый ставит проблему *детерминизма*. Действительно ли вычисление вероятностей – это лучшее, что мы можем сделать?

Второй ставит проблему *многих миров*. Что описывает полная волновая функция, когда мы не делаем выборку? Представляет ли она гигантское расширение действительности или это только мысленный инструмент, не более реальный, чем сон?

Третий поднимает вопрос о *дополнительности*. Получение ответов на различные вопросы может требовать обработки волновой функции различными способами, которые взаимно несовместимы. В этом случае, согласно квантовой теории, невозможно ответить на оба вопроса одновременно. Вы не можете сделать это, даже если каждый вопрос в отдельности будет совершенно законным и будет иметь содержательный ответ. Именно эта ситуация возникает для нашего вопроса о положении и вопроса об импульсе, это называется принципом неопределенности Гейзенберга: вы не можете измерить и положение, и импульс частицы одновременно. Если бы кто-то придумал, как сделать это экспериментально, он бы опроверг квантовую теорию, поскольку квантовая теория говорит, что это невозможно. Эйнштейн неоднократно пытался изобрести эксперименты такого рода, но ему это так и не удалось, и в конечном счете он сдался.

Каждая из этих проблем пленяет воображение, и первым двум из них

уделили много внимания. Однако мне кажется, что третья особенно хорошо обоснована и значима. Дополнительность как свойство физической реальности и урок мудрости занимает в нашей медитации важное место.

Хотя я объяснил эти проблемы на примере отдельных частиц, все они проявляются в полной мере и тогда, когда мы задаемся вопросами о более сложных системах.

- Поскольку волновая функция дает нам вероятности, а не точные ответы, мы получим различные ответы, если будем много раз задавать тот же вопрос одной и той же волновой функции. Это тесно связано с той интуитивной моделью, которая мне очень нравится и к которой я часто прибегаю, суть ее в том, что квантовые объекты проявляют спонтанную активность. См. **Квантовые флуктуации**.

- Многие непрерывные согласно классической физике величины становятся дискретными в квантовой теории. См. **Фотон и Спектры**.

- И последнее, но никак не менее важное: хотя квантовая теория обычно приводит к вероятностным ответам, она в то же время делает много предсказаний, которые являются совершенно определенными. Например, квантовая механика лежит в основе теорий, предсказывающих спектр водорода, прочность и электрическую проводимость нанотрубок, массы и свойства адронов – причем с удивительной точностью. Все это точно определенные значения, не вероятности. Эти блестящие результаты являются яркими страницами в новейшей истории нашего Вопроса, как это обсуждается в главах «Квантовая красота I», «Квантовая красота II» и «Квантовая красота III».

### ***Квантовая точка***

### ***Quantum dot***

Физики разрабатывают усовершенствованные методики создания очень маленьких материальных структур со стороны всего в несколько атомов. Эти структуры называют *квантовыми точками*. Квантовые точки – это, по сути, молекулы, сделанные вручную.

### ***Квантовая хромодинамика (КХД)***

## *Quantum chromodynamics (QCD)*

*Квантовая хромодинамика*, или *КХД*, является нашей **Главной теорией сильного взаимодействия**.

*КХД* привносит много новых идей в описание Природы, включая **кварки, цветовой заряд, цветные глюоны, асимптотическую свободу, конфайнмент и струи**.

*КХД* в своей сфере действия дает четкий положительный ответ на волнующий нас Вопрос: воплощает ли мир красивые идеи? А именно *КХД* воплощает красивый принцип **локальной симметрии** в необыкновенно богатом контексте **пространства свойств** сильного **цветового заряда**.

## *Квантовая электродинамика (КЭД)*

## *Quantum electrodynamics (QED)*

*Квантовая электродинамика*, или *КЭД*, является нашей **Главной теорией электромагнетизма**.

*КЭД* основана на **уравнениях Максвелла** в неизменной форме, но интерпретируемых в соответствии с правилами **квантовой теории**. Это значит, что возмущения в **электромагнитном флюиде** возникают в виде дискретных единиц, или **квантов**, – **фотонов**, а во флюиде наблюдается также самопроизвольная активность – **квантовые флуктуации**.

*Квантовая электродинамика* предоставляет твердый и законченный фундамент для «всей химии и большей части физики», как сказал Поль Дирак.

## *Квантовые измерения*

## *Quantum dimension*

*Квантовые измерения* – это **измерения**, **координаты** которых являются **грассмановыми числами**. *Квантовые измерения* – это душа

суперсимметрии.

*Квантовые флуктуации, виртуальные частицы, поляризация вакуума и нулевые колебания*

*Quantum fluctuation/virtual particle/vacuum polarization/zero-point motion*

В теории **квантовых флюидов**, которая лежит в основе нашего наиболее глубокого понимания Природы, мы пришли к новому взгляду на частицы. Они являются минимальными возмущениями, или **квантами**, в квантовых флюидах. Таким образом, **фотоны** – это кванты **электромагнитного флюида**, **электроны** – кванты **электронного флюида** и т. д.

В этих флюидах, однако, заключено нечто большее, чем частицы, которым они служат основой, так же как и вода есть нечто большее, чем волны на ее поверхности. В частности, у флюидов есть самопроизвольная активность: *квантовые флуктуации*. Поскольку самопроизвольная активность и возмущения в квантовом флюиде, которые мы распознаем как частицы, тесно связаны – это два свойства одного и того же флюида, – принято говорить, что эта спонтанная активность состоит из *виртуальных частиц*. Таким образом, виртуальные частицы – игра нашего собственного ума, чтобы представить активность в виде объектов. Это воображаемые объекты.

На спонтанную активность квантового флюида может влиять присутствие частиц, и наоборот. Таким образом, свойства частиц меняются из-за обратной связи с квантовыми флюидами: присутствие частицы влияет на активность флюида, а эта активность в свою очередь влияет на частицу. Такую петлю обратной связи называют *поляризацией вакуума*. Мы можем представить себе простую и понятную картину этого эффекта, используя понятие виртуальных частиц. Виртуальные частицы образуют газ, заполняющий пространство, и свойства любой реальной частицы меняются за счет соударений с частицами этого газа.

*Нулевые колебания* – еще одно название спонтанной активности квантовых флюидов. Фраза «нулевые колебания» подчеркивает, что такая активность, или движение, присутствует даже тогда, когда устранены все источники энергии, т. е. даже при абсолютном нуле температуры.

Частицы, будучи возмущениями во флюидах, проявляющих

спонтанную активность, наследуют эту спонтанность. У них тоже есть нулевые колебания, и они осложняют эксперименты, разработанные для обнаружения малых эффектов, таких как гравитационные волны или космическое фоновое **аксионное** излучение, через их влияние на **обычное вещество**: появляется источник фонового «шума», как будто наш измерительный прибор «покачивается» и «трясется»<sup>[103]</sup>. Этого квантового шума, возникающего из-за фундаментальных физических процессов, невозможно избежать путем охлаждения нашего измерительного прибора до низких температур или его изоляции. Лучшее, что можно сделать, – это понять, с чем мы имеем дело, и попытаться как-то обойти это затруднение.

Влияние квантовых флуктуаций на наблюдаемое поведение частиц, т. е. *поляризация вакуума*, является основным пунктом в нашем понимании глубинных законов Природы. **Асимптотическая свобода** – это следствие поляризации вакуума, и количественные аспекты **объединения** взаимодействий также основаны на ней. Большая часть глав «Квантовая красота III» и «Квантовая красота IV» посвящена этим идеям.

См. также **Перенормировка (ренормализационная группа)**.

### ***Квантовый переход, квантовый скачок***

### ***Quantum jump/quantum leap***

См. **Стационарное состояние**, где эти понятия обсуждаются в своем естественном контексте. Здесь я отмечу только, что *квантовые скачки* – это на самом деле очень маленькие прыжки. Таким образом, если кто-то хвастается тем, что совершил «квантовый скачок в мышлении», и знает, о чем он говорит, то его заявление в действительности очень скромно.

### ***Квантовый флюид, квантовое поле***

### ***Quantum fluid/quantum field***

В **квантовой теории** свойства **флюидов** или **полей** существенно отличаются от свойств сред, с которыми мы встречаемся в доквантовой,

классической физике. Наиболее значительные отличия таковы:

- *Квантовые флюиды* проявляют спонтанную активность даже в отсутствие внешнего влияния или «причин». См. **Квантовые флуктуации, виртуальная частица, поляризация вакуума и нулевые колебания.**

- Возмущения или возбуждения в *квантовых флюидах* не могут быть сколь угодно малыми, а возникают в виде минимальных единиц – **квантов.**

Квантовые флюиды – это основные компоненты, из которых строится наша **Главная теория.**

*Кварк*

*Quark*

Понятие *кварков* было независимо введено Мюрреем Гелл-Манном и Джорджем Цвейгом в 1964 г. Они представили основные компоненты **модели кварков**, которая внесла порядок в «зоологию» **адронов.** Непрерывная нить исследований соединяет их пионерскую работу с современными представлениями о кварках, которые стоят на почетном месте среди **частиц вещества** в нашей **Главной теории.**

*Кварковая модель*

*Quark model*

*Кварковая модель* – это полуколичественная модель **адронов.** Исторически она сыграла важную роль в упорядочивании данных о **сильном взаимодействии.** Чтобы узнать больше о кварковой модели, см. главу «Квантовая красота III», часть 2.

*Кинетическая энергия.*

См. Энергия.

## *Колебание*

## *Oscillation*

Мы называем физический процесс, который проходит через много циклов повторяющихся состояний, причем через фиксированный интервал времени, *колебанием*. Вибрации после щипка струн или удара по камертону, знакомые из музыки, являются примерами колебаний.

## *Комплексное измерение*

## *Complex dimension*

Обычные («вещественные») **измерения** естественным образом описываются с помощью чисел – **координат**, – которые являются **действительными числами**. К примеру, позиция точки на экране компьютера задается двумя действительными координатами, обозначающими ее положение по вертикали и по горизонтали, в то время как точка в обычном пространстве задается тремя координатами. Во многих математических и физических контекстах бывает удобно рассматривать пространства, в которых координаты задаются **комплексными числами**. В этом случае мы говорим, что у нас имеется комплексное пространство и что необходимое число координат равно числу комплексных измерений в этом пространстве. Поскольку комплексное число может быть задано двумя действительными числами – а именно величинами его действительной и мнимой частей, – комплексное пространство можно также рассматривать как вещественное пространство (с дополнительной структурой). Если рассматривать его таким образом, то число его вещественных измерений будет равно удвоенному числу его комплексных измерений.

## *Комплексные числа*

## *Complex numbers*

Мнимая единица, обозначаемая  $i$ , это число, которое в результате умножения на себя дает  $-1$ . Или, в виде уравнения,  $i^2 = -1$ . *Комплексные числа* – это числа вида  $z = x + iy$ , где  $x$  и  $y$  – **действительные числа**;  $x$  называется действительной частью  $z$ , а  $y$  – мнимой частью.

Комплексные числа можно складывать, вычитать, умножать и делить, подобно тому, как это делается с действительными числами.

Комплексные числа были введены в математику, чтобы уравнения общего вида, включающие суммирование и возведение в степень, – так называемые полиномиальные уравнения – могли иметь решения. Так, например, уравнение  $z^2 = -4$  не имеет решения в действительных числах, но оно имеет решение  $z = 2i$  (и  $z = -2i$ ). Можно доказать, что комплексные числа в том виде, как мы их определили, полностью пригодны для этой задачи. (Этот результат, так называемая основная теорема алгебры, отнюдь не очевидна и ее доказательство было важным событием в математике.)

Как подсказывает название «*мнимые*» (и его явное противопоставление термину «*действительные*»), математики с большим трудом примирились с таким видом чисел. Их «существование» почему-то казалось сомнительным. Лишь несколько смельчаков мудро вняли совету отца Джима Малли – «Более достойно благословения просить прощения, чем разрешения» – и использовали их. Привычка и дальнейшие успехи в конце концов привели к тому, что комплексные числа стали пользоваться большим уважением. Математика XIX в. в большой степени была исследованием ослепительных перспектив того, что комплексные числа могут дать **исчислению** и геометрии.

В XX в. способ введения новых видов *объектов* путем составления списка их желательных *свойств* и объявления, что такие объекты существуют, – способ, который был так успешен с комплексными числами, стал обычной рабочей процедурой. Эмми Нётер сыграла большую роль в развитии такого образа мыслей. Если бы Платон узнал о таких изменениях, он, возможно, почувствовал бы себя оправданным, учитывая, что математики полностью приняли его философию и познали радость Идеалов.

(Позволю себе небольшое отступление, которое стоит читать как поэзию. Действительно, *идеалы*, которые так и называют, являются важным классом математических объектов. Возможно, произведением искусства в чистой математике, сравнимым по глубине и значению с теоремой сохранения, которой мы пели хвалу в основном тексте, является понятие нётерова кольца. Что такое нётерово кольцо? Это кольцо, в котором любая цепь возрастающих *идеалов* в итоге заканчивается. Конец

отступления.)

Другой полезный способ представления комплексного числа заключается в том, чтобы записать его как  $z = r \cos \varphi + ir \sin \varphi$ , где  $r$  – это положительное действительное число либо ноль, а  $\varphi$  – угол;  $r$  называется модулем комплексного числа, а  $\varphi$  называется его фазой<sup>[104]</sup>. Таким образом, либо  $(x, y)$ , либо  $(r, \varphi)$  могут служить **координатами** комплексных чисел.

**В квантовой теории** комплексные числа встречаются повсеместно.

Комплексные числа – это божественные числа.

### *Конфайнмент*

### *Confinement*

Основные ингредиенты **квантовой хромодинамики (КХД)**, нашей теории **сильного взаимодействия**, – это **кварки** и **глюоны**. Есть огромное количество доказательств (частично описанных в главе «Квантовая красота III») того, что эта теория верна. Но ни кварки, ни глюоны не наблюдаются в виде отдельных частиц. Они обнаруживаются только как составные части более сложных объектов – **адронов**. Описывая эту ситуацию, мы говорим о *конфайнменте* (удержании) кварков и глюонов.

Мы можем представить себе попытку освободить («вырвать») кварк из протона либо постепенно, разделяя протон на части пинцетом, либо облучая протон частицами с высокой энергией и разбивая его (протон) таким образом на составные части. Каждая из этих попыток проваливается интересным – и я бы сказал, *красивым* – образом.

Если мы будем делать это медленно, мы обнаружим, что существует непреодолимая **сила**, которая тянет кварк обратно внутрь.

Если мы сделаем это быстро, мы получим **струи**.

Чтобы узнать об этом больше, см. «Квантовая красота III», особенно вторую часть.

### *Координаты*

### *Coordinates*

Когда мы используем наборы чисел для задания точек в пространстве, мы называем эти числа *координатами*.

Введение координат связывает понятия счета и количества, которые относятся к работе левого полушария мозга, с понятиями формы и очертаний, которые обрабатываются в правом полушарии. Хотя лежащая в основе этого психология туманна в деталях, нет сомнений, что метод координат помогает разнообразным модулям нашего мозга общаться друг с другом и объединять усилия.

Самый простой, самый базовый пример использования координат – описание прямой с использованием **действительных чисел**. Чтобы сделать это, нам нужно выполнить три шага:

- Выбрать точку на прямой. (Подойдет любая точка.) Эта выбранная точка будет называться началом координат.
- Выбрать длину. (Можно использовать метры, сантиметры, дюймы, футы, версты, световые годы и т. д.) Эта выбранная длина называется единицей длины. Для определенности выберем метры.
- Выбрать направление на прямой. (Есть всего две возможности.) Это выбранное направление называется положительным направлением.

А теперь, чтобы определить координату точки  $P$ , мы измеряем расстояние в метрах между точкой  $P$  и началом координат. Это положительное действительное число. Если направление от начала координат до  $P$  – положительное направление, то это число и есть координата точки  $P$ . Если направление от начала координат до точки  $P$  противоположно положительному направлению, то координатой точки  $P$  является это число со знаком минус. Координата самого начала координат – это ноль.

Таким способом мы устанавливаем точное соответствие между действительными числами и точками на прямой: каждая точка имеет единственную действительную координату и каждое действительное число – координата единственной точки.

Похожим образом мы можем задать точки на плоскости, используя пары действительных чисел, или точки в модели трехмерного пространства, используя тройки действительных чисел. Мы называем эти числа *координатами* точек. Также мы можем использовать **комплексные числа** в качестве координат для описания плоскости. Действительно, представление  $z = x + iy$  задает два действительных числа  $x$ ,  $y$  – и, следовательно, точку на плоскости – с помощью одного комплексного числа  $z$ .

Конечно, если у нас есть только отрезок прямой, мы все равно можем

использовать действительные числа, чтобы задать его точки, но не все действительные числа будут на нем представлены, аналогично и для других случаев.

Опыт построения карт демонстрирует нам, как с помощью подходящей **проекции** мы можем представить кривые поверхности на плоскости (например, на плоском листе бумаги). Таким образом мы можем использовать координаты для задания точек на искривленных поверхностях.

Базовая идея координат допускает многие вариации и обобщения:

- Мы можем использовать больше чисел! Хотя нам сложно представить больше трех измерений, работать с пятерками или еще большими наборами действительных чисел не сильно сложнее, чем работать с тройками. Таким образом, пространства более высокой размерности оказываются поддающимися осмыслению. См. **Измерение**.

- Мы можем проделать обратную процедуру! Координаты вводятся для того, чтобы позволить нам описать геометрические объекты с помощью наборов действительных чисел. В то же время в человеческом цветовосприятии мы обнаруживаем, что любой воспринимаемый **цвет** можно повторить и, что существенно, единственным образом, используя смесь трех базовых цветов, скажем, красного, зеленого и синего. Разные интенсивности красного, зеленого и синего обозначаются тремя положительными действительными числами, и каждая комбинация интенсивностей соответствует своему воспринимаемому цвету. Мы можем интерпретировать эти тройки как координаты трехмерного **пространства свойств**, а именно – *пространства* воспринимаемых цветов. Существует много примеров такого общего типа. Пространства, основанные на **цветовых зарядах**, играют центральную роль в нашей **Главной теории**.

- Мы можем определить, что мы имеем в виду под искривленными трех– (или более) мерными пространствами! Опять же, эти понятия сложно непосредственно представить. Но методы, которые мы используем для представления расстояний на картах, где мы изображаем поверхности на плоскости, могут быть выражены алгебраически, с использованием **метрики**, и после этого легко обобщены.

- Мы можем определить пространство-время, включая время в тот же базис, что и пространство! Чтобы это сделать, нам нужно всего лишь рассматривать *дату* события вместе с *местом* события как дополнительную координату. (Забавно заметить, что отрицательные числа незаметно появляются в датах до нашей эры. Можно, и пожалуй, нужно <sup>[105]</sup> было бы назвать пятый год до нашей эры минус пятым годом

и писать –5 г.) В **общей теории относительности** мы объединяем эту идею с предыдущей, чтобы дать определение искривленному пространству-времени.

- Мы можем использовать разные виды чисел! Координаты, основанные на комплексных числах, широко используются в квантовой теории, а координаты, основанные на **грассмановых числах**, позволили нам сформулировать многообещающую идею **суперсимметрии**.

## *Космические лучи*

## *Cosmic rays*

Когда мы говорим, что «видим» космос – звезды, туманности, галактики и т. д., – мы обычно имеем в виду, что мы принимаем часть электромагнитного излучения, которое эти объекты источают на Землю. (См. **электромагнитный спектр**.) На языке квантовой теории мы можем сказать, что мы видим их с помощью **фотонов**. Фотоны свободно распространяются через огромные пустые области пространства, и мы знаем, как управлять ими, используя линзы, чтобы получить изображения их источников. Под «пустыми» здесь я понимаю области, лишенные **обычного вещества**. Поскольку обычное вещество – по сути своей то, что возмущает движение фотонов, это определение отчасти закольцовано, – но смысл в том, что такие области существуют. Как мы обсудили в определении **вакуума**, пространство, которое является «пустым» в этом смысле, тем не менее содержит **темную энергию**, часто **темную материю**, одно или несколько **полей Хиггса** и беспрестанное бурление спонтанной квантовой активности (см. **Квантовая флуктуация**).

Космические объекты испускают, кроме фотонов, и другие частицы: **электроны**, **позитроны**, **протоны** и ряд более тяжелых атомных **ядер**, среди которых следует отметить ядра железа. Некоторые из этих частиц имеют огромную энергию – гораздо большую, чем энергия, достигнутая, например, на **Большом адронном коллайдере**, и некоторые из них добираются до Земли. Эти другие частицы, а также самые энергичные фотоны (гамма-излучение) мы называем *космическими лучами*. Те космические лучи, которые представляют собой электрически заряженные частицы, движутся по искривленным траекториям, поскольку они отклоняются галактическими магнитными полями. Это усложняет

определение их источника.

В пионерские годы физики высоких энергий, до появления мощных **ускорителей** и коллайдеров, космические лучи были самым лучшим доступным источником частиц высоких энергий. В результате изучения космических лучей было сделано несколько фундаментальных открытий, включая существование позитронов, мюонов ( $\mu$ ) и пионов ( $\rho$ ). Возможно, что близкие контакты между частицами темной материи заставляют их аннигилировать в энергичные сгустки, которые могут быть источником необычных космических лучей. Сейчас проводится несколько экспериментов, исследующих такую возможность.

### ***Коэффициент ветвления***

### ***Branching ratio***

Когда частица может распадаться несколькими разными способами, мы говорим, что у нее есть несколько каналов распада, или ветвей распада. Относительная вероятность, с которой происходит какой-то конкретный распад, называется *коэффициентом ветвления* (или парциальной шириной распада). Так, если частица  $A$  распадается на  $B + C$  в 90 % случаев, а в  $D + E$  в 10 % случаев, то мы говорим, что коэффициент ветвления  $A$  в  $B + C$  равен 0,90, в то время как коэффициент ветвления в  $D + E$  равен 0,10.

### ***Лептон***

### ***Lepton***

Электрон  $e$  и его нейтрино  $\nu_e$  вместе с их родственниками мюоном  $\mu$  и его нейтрино  $\nu_\mu$  и  $\tau$ -частицей и ее нейтрино  $\nu_\tau$  имеют общее название лептоны. Их античастицы являются антилептонами.)

### ***Локальная симметрия***

### ***Local symmetry***

Мы говорим, что симметрия *локальна*, когда она допускает, чтобы ее **преобразования** производились независимо друг от друга в различных точках пространства и в разные моменты времени.

Локальная симметрия вместе с **квантовой теорией** является основой **Главных теорий** всех четырех взаимодействий, которые объединяют наши современные познания об основных законах Природы. Вместе с **суперсимметрией** (и в рамках квантовой теории) она также является основой для одной заманчивой попытки унифицировать и улучшить Главную теорию, как описано в главе «Квантовая красота IV».

Локальная симметрия соотносится с общей (**глобальной**) симметрией, как анаморфное изображение со стандартной графической перспективой.

Локальная симметрия – один из важных фокусов нашего размышления, который преобладает в его последующих частях.

### *Магнетизм, магнитное поле, магнитный флюид*

### *Magnetism/magnetic field/magnetic fluid*

«Магнетизм» – это нестрогий термин для описания широкого круга явлений, связанных с силами воздействия **электрических токов** друг на друга и их взаимодействиями с немногими особыми магнитными веществами, которые обнаруживают подобные силы. Магнитные вещества, которые часто содержат железные руды, применяются, чтобы сделать всем известные магниты, используемые для стрелок компаса, магнитных держателей записок на холодильнике и для многого другого.

Техническое обсуждение точного определения магнитного поля и сил, которые оно вызывает, было бы в целом сходно с нашим обсуждением в статье про **Электрическое поле, электрический флюид**, но его детали значительно более сложны и расплывчаты. Я предлагаю два легко доступных издания, где вы можете найти больше информации на эту тему (см. в примечаниях в конце книги).

### *Масса*

### *Mass*

Научное понятие *массы* развивалось с течением времени, и это слово теперь используется в нескольких тесно связанных, но не полностью согласованных смыслах. Здесь я опишу три самых важных.

1. Самое раннее достаточно точное, научное использование понятия *массы* встречается в механике Ньютона. В ней масса воспринимается как основное свойство материи, которую невозможно создать, или уничтожить, или объяснить чем-то более простым. Масса – это мера инерции тела или его сопротивления **ускорению**. Тело с большой массой будет стремиться поддерживать постоянную скорость, если его не подвергнуть большим внешним воздействиям (**силам**). Такое понятие массы становится количественным во втором законе движения Ньютона, который гласит, что ускорение тела равно силе, действующей на него, разделенной на его массу. Понятие массы Ньютона все еще очень широко используется и все еще называется «массой», поскольку ньютоновская механика, хотя и не вполне точная, часто является достаточно хорошим приближением и ее легче использовать, чем более точную релятивистскую механику.

2. В эйнштейновской модификации механики, чтобы согласовать ее со специальной теорией относительности, масса стала другим понятием. В релятивистской механике масса – это свойство отдельных частиц, но масса может быть создана или уничтожена, когда частицы взаимодействуют друг с другом. В релятивистской механике масса является мерой вклада частицы в **массовую энергию** и определяет ее **энергию движения**. Масса – это свойство частиц, но это не четко определенное (**сохраняющееся**) свойство мира в целом.

У каждой из **элементарных частиц** нашей **Главной теории** есть определенная масса, но утверждение о том, что сумма масс частиц, вступающих во взаимодействие, равна сумме масс частиц после него, очень далеко от истины<sup>[106]</sup>. В столкновениях между **электронами** и **позитронами** высоких энергий обычно обнаруживается, что полная масса частиц после столкновения в сотни тысяч раз больше, чем полная масса частиц, участвовавших в нем изначально.

В релятивистской механике сохраняется не масса, но **энергия**. Мне нравится кратко подытоживать роль массы и энергии в релятивистской механике фразой: «У частиц есть масса, у мира есть энергия».

3. В космологии говорят о доле массы во Вселенной за счет различных составляющих: **обычная материя** (5 %), **темная материя** (27 %), **темная энергия** (68 %). Это – небрежное использование термина «масса». (У темной энергии, в частности, нет массы ни в одном из двух более

привычных пониманий этого термина, определенных выше.) Но оно очень широко распространено как в научной, так и в популярной литературе, поэтому и нам от него никуда не деться. Это означает следующее: используя **общую теорию относительности**, мы можем связать скорость, с которой изменяется темп расширения Вселенной со временем – грубо говоря, его ускорение, – со средней плотностью энергии в ней. Мы можем разделить эту среднюю плотность энергии на квадрат скорости света, чтобы получить нечто измеренное в единицах плотности массы. Проценты, упомянутые выше, являются относительными вкладами в это «нечто», привнесенными различными видами материи.

Поскольку масса не сохраняется, по большому счету у нас есть надежда объяснить ее с точки зрения чего-то более простого. И действительно, есть чрезвычайно красивое объяснение источника большей части массы **обычной материи**, которое возникает из **квантовой хромодинамики (КХД)**. Все важные элементы строения протонов – верхний и нижний **кварки** и цветные **глюоны** – имеют массу намного меньшую, чем масса протона, следовательно, у массы протона должен быть какой-то другой источник.

Ключевым шагом к пониманию происхождения массы протона будет как следует понять, *что такое* протон. Так что такое протон? С точки зрения современных представлений протон – это устойчивое, ограниченное в пространстве *состояние возмущения* в кварковом и глюонном **флюидах**. Такое состояние может перемещаться – **галилеева симметрия** уверяет нас в этом, – и, если мы смотрим на него издали (по сравнению с его размером), оно будет похоже на частицу. Существует **энергия поля** глюонов, связанная с этим возмущением, и **энергия движения** кварков в состоянии конфайнмента. Если мы обозначим энергию стационарного возмущения за  $\epsilon$ , то  $\epsilon/c^2$  будет массой частицы, которой, как мы считаем, оно является, т. е. протона. И это – поразительным образом – источник *вашей собственной* массы. Это «масса без массы», возникающая из заключенной внутри энергии.

### **Массовая энергия**

См. Энергия.

### **Мезон.**

См. Адрон.

## *Метрика, метрический флюид*

### *Metric/metric fluid*

Мы говорим, что у пространства есть метрика, когда можно сказать, каково расстояние между двумя очень близкими точками. Сама *метрика* – это секретный соус, который превращает набор точек в структуру, имеющую размер и форму.

Давайте предположим для начала, что мы знаем, как измерить расстояние между двумя соседними точками в обычном пространстве, например, используя небольшие линейки. Тогда мы сможем измерить такими же линейками и расстояния между соседними точками на любой достаточно гладкой поверхности. Ограничение короткими линейками и близлежащими точками важно здесь потому, что, если мы имеем искривленную поверхность и длинные плоские линейки, тогда линейки могут плохо прилегать к поверхности на больших расстояниях, и мы не будем знать, как их правильно приложить.

Теперь давайте рассмотрим представление нашей поверхности с использованием обычной, плоской бумажной карты. Мы можем, конечно, сделать это разными способами, просто устанавливая соответствие между этими двумя множествами точек: точек на поверхности и точек на карте. Мы помещаем Прагу здесь, Нью-Дели там и т. д., заботясь о том, чтобы поместить по соседству на карте точки, которые находятся близко в действительности. Имеется немалая свобода в том, как это сделать, и в атласах можно найти много очень отличающихся представлений одной и той же области.

Без дальнейших указаний, однако, карта не говорит нам, насколько далеко представленные на ней точки в действительности разнесены на реальной поверхности. Метрика, дополнение к карте, и предоставляет эту информацию. Если быть немного точнее, метрика – это **функция** от положений на карте: она присваивает «вещь», или значение, каждой точке на карте. В каждой точке значение метрики – это инструмент, который дает вам для любого направления, в котором вы можете двигаться из этой точки, масштаб, который вы должны использовать на маленьких линейках, чтобы расстояние, которое вы измеряете между соседними

точками на карте, было таким же, как расстояние между точками, которые они изображают на реальной поверхности.

Рассмотрев, что нужно сделать, чтобы превратить плоскую поверхность (нашу карту) в поверхность, обладающую размером и формой, мы можем творчески подойти к этой идее и развить ее или исполнить вариации на эту тему. Чтобы осознать концепцию метрики, наиболее важную для физики, мы должны сделать две вещи.

Во-первых, мы переключаем внимание с проблемы измерения поверхности, которая побудила нас ввести понятие метрики, к понятию метрики как таковому. Поэтому мы называем любой инструмент, показывающий нам масштабы, которые мы должны присвоить маленьким линейкам, метрикой на нашей карте, независимо от того, появился ли этот инструмент из самой поверхности или нет. (Делая этот шаг, мы следуем тем путем, которым Бернхард Риман [1826–1866] обобщил работу своего учителя Карла Гаусса [1777–1855].) Другими словами, мы даем такому понятию метрики собственную жизнь.

Во-вторых, мы добавляем некоторые **измерения**. Ничто не мешает нам добавить такой же тип определяющего масштаб механизма к точкам во всем трехмерном пространстве, а не только к точкам на плоском листе бумаги. Развивая эту мысль далее, мы можем использовать метод **координат**, чтобы представить трехмерное пространство и время как объединенное четырехмерное пространство-время, и рассмотреть добавление инструмента метрики к нему. Таким образом, мы нашли очень гибкую процедуру, которая может показывать – или, можно было бы сказать, определять, – что мы должны подразумевать под искривленным трехмерным пространством, или искривленным пространством-временем, делая это «наглядно правильным» образом, который обобщает то, как мы поступаем с поверхностями, где наша интуиция вполне ясна.

Скажем немного относительно математического понятия метрики. Это – абстрактный механизм, который заполняет пространство (или пространство-время), т. е. абстрактное **поле**. Среди других полей существуют: **электрические поля**, **магнитные поля** и **поле скоростей** в массе воды. В этих случаях и многих других мы обнаруживаем, что поля – важные элементы реальности. Они танцуют под музыку **динамических уравнений**, испытывают влияние материи и, в свою очередь, влияют на поведение материи. Мы можем сказать – не строго, но вполне справедливо, – что они *физически* существуют. Эйнштейн в его **общей теории относительности** постулировал, что *метрика пространства-времени*, так же как и эти другие поля, представляет собой

физическую сущность, имеющую собственную жизнь. Мы называем ее *метрическим флюидом* или также **гравитационным флюидом** ввиду той роли, которую она играет в **общей теории относительности**.

Есть много вариантов и обобщений понятия «метрики», описанного в этой статье, которые полезны в различных приложениях. Общее между ними в том, что все они имеют дело с каким-либо расстоянием. Описанная выше версия в настоящий момент наиболее полезна в физике, и именно она фигурирует в нашей медитации.

Не во всех пространствах есть очевидное понятие расстояния, или же пространство может предлагать несколько различных возможностей, чтобы определить расстояние. В таких случаях мы можем или обойтись без метрики, или попробовать различные **дополнительные** возможности. Трехмерное пространство цветового восприятия является интересным примером в этом отношении.

Возможно ли определить точным количественным образом расстояние между различными воспринимаемыми цветами? Несколько серьезных мыслителей сражались с этой проблемой, включая, в частности, Эрвина Шрёдингера (известного благодаря **уравнению Шрёдингера**). Они придумали несколько разных ответов. Каждый из них внутренне непротиворечив, но пока еще ни один не оказался таким уж необычайно полезным или явно превосходящим остальные.

### *Механизм Хиггса*

### *Higgs mechanism*

Мы хотели бы использовать красивые уравнения **локальной симметрии** для описания **слабого взаимодействия**. Но эти уравнения, если применить их к пустому пространству, предполагают, что **кванты флюида** слабого взаимодействия – **виконы** – должны быть безмассовыми частицами, подобно **фотонам**. В действительности виконы имеют массы, превышающие массу протона в несколько десятков раз. *Механизм Хиггса* позволяет нам оставить красивые уравнения, при этом не впадая в противоречие с реальностью. Основная идея механизма Хиггса состоит в том, что пространство пронизано полем – **полем Хиггса**, которое видоизменяет поведение частиц по сравнению с тем поведением, которое бы они демонстрировали в случае его отсутствия.

Согласно *механизму Хиггса*, мы живем внутри **сверхпроводника** для **токов** слабого заряда.

См. **Поле Хиггса, флюид Хиггса; Частица Хиггса, бозон Хиггса**, а также подробное обсуждение в главе «Квантовая красота III», часть 3.

### *Микроволны, микроволновое фоновое излучение*

### *Microwaves/microwave background radiation*

Электромагнитные волны с длинами волн в диапазоне примерно от миллиметра до метра называют микроволновым излучением или просто микроволнами.

На ранней стадии своей истории материя в нашей Вселенной была настолько горячей и плотной, что атомы не могли существовать как целостные объекты. Плазма из протонов, **ядер гелия** и **электронов** была раскаленной добела, и Вселенная была заполнена светом. По мере того как Вселенная расширялась и охлаждалась, постепенно смогли сформироваться атомы, удерживающие свои электроны, и в результате – достаточно внезапно – Вселенная стала прозрачной для света и других форм электромагнитного излучения, каковой она остается и сегодня. Вездесущий свет продолжал наполнять Вселенную, но за счет продолжающегося расширения спектр света смещался к более длинным волнам.

К сегодняшнему дню большая часть того света оказалась смещенной в микроволновую часть **электромагнитного спектра**. Он превратился в *микроволновое фоновое излучение*<sup>[107]</sup>.

Микроволновое фоновое излучение было обнаружено экспериментально Арно Пензиасом и Робертом Уилсоном в 1964 г., и с того момента оно является предметом интенсивных исследований. Благодаря его происхождению микроволновое фоновое излучение дает нам доступ к ничем не искаженной информации об условиях в очень ранней Вселенной.

### *Многогранник, или полиэдр*

### *Polyhedron*

*Многогранник* – трехмерное тело с плоскими **многоугольными** поверхностями, прямыми ребрами, где сходятся грани, и острыми вершинами, где сходятся ребра.

### *Многоугольник, правильный многоугольник*

### *Polygon/regular polygon*

Многоугольник – это фигура, полученная соединением последовательности точек на плоскости отрезками прямых линий, так, чтобы образовать замкнутый контур. Треугольники и прямоугольники – всем известные примеры *многоугольников*. Задающие точки многоугольника – те точки, где его стороны сходятся, – называются его вершинами.

Правильный многоугольник – это многоугольник, стороны которого имеют одинаковую длину и сходятся под равными углами во всех вершинах. Равносторонние треугольники – это правильные многоугольники с тремя сторонами, квадраты – правильные многоугольники с четырьмя сторонами и т. д.

### *Момент импульса*

### *Angular momentum*

Момент импульса наряду с **энергией** и **импульсом** (обычным импульсом, или количеством движения) является одной из выдающихся сохраняющихся величин классической физики. Каждая из них также развилась в основополагающий столп современной физики.

Момент импульса – наиболее сложная для определения и понимания из этих величин, и не стоит надеяться постичь всю его сложность без существенных усилий. Например, завораживающее, часто кажущееся нелогичным поведение волчков и гироскопов – следствие наличия у них момента импульса. Как следствие, наша медитация не слишком опирается на это понятие!

Момент импульса тела – это мера его углового движения (вращения) вокруг выбранного центра. Количественно он равен удвоенной скорости,

с которой замечает площадь линия, нарисованная из центра тела, умноженной на массу тела. (Это нерелятивистская версия, верная для небольших скоростей. **Специальная теория относительности** приводит к похожей, но более сложной формуле.)

У момента импульса есть направление и величина. (Таким образом, это **векторная** величина – а именно это **аксиальный вектор**.) Чтобы определить направление, мы должны сначала определить моментальную ось вращения – т. е. направление, перпендикулярное к площади, замечаемой отрезком, – а затем выбрать положительное направление оси, используя правило правой руки. См. **Четность**.

Момент импульса системы тел равен сумме моментов импульса составляющих ее тел.

Существует широкий спектр обстоятельств, при которых момент импульса сохраняется. Этот результат лучше всего объясняется через общую теорему Нётер, которая связывает **законы сохранения** с **симметрией**. С этой точки зрения сохранение момента импульса вокруг некоторого центра вращения отражает симметрию (инвариантность) физических законов относительно преобразований, при которых происходит вращение пространства вокруг этого центра. Другими словами, момент импульса сохраняется, если законы не зависят ни от какого указанного внешним образом фиксированного направления.

Второй закон орбитального движения Кеплера, согласно которому отрезок, проведенный между планетой и Солнцем замечает одинаковую площадь за одинаковые отрезки времени, – это один из примеров сохранения момента импульса.

В квантовом мире момент импульса не теряет своего смысла и приобретает новые черты утонченности и красоты. Именно математические свойства момента импульса в квантовой теории больше всего привлекли меня в физику, когда я был учеником и выбирал свой карьерный путь. Если вы хотите глубже изучить этот вопрос, вы можете обратиться к «Рекомендуемой литературе». Здесь я упомяну только то, что квантовые частицы зачастую проявляют непреодолимую вращательную активность, именуемую **спином**, похожим в каком-то смысле на нулевые колебания (см. **Квантовая флуктуация**) или на спонтанную активность квантовых полей.

См. Вселенная, видимая Вселенная и мультивселенная.

*Мутатрон*

*Mutatron*

В теориях, которые объединяют сильное и слабое взаимодействие, существуют частицы, которые вызывают преобразования между сильными и слабыми цветами. Мы (или, точнее, я) называем эти гипотетические частицы *мутатронами* [\[108\]](#).

*Нанотрубка*

*Nanotube*

Нанотрубки – это класс молекул, состоящих целиком из углерода. Как можно догадаться из названия, они имеют форму трубок и могут тянуться бесконечно в одном направлении. *Нанотрубки* могут иметь много разных размеров и форм, и они обладают замечательными механическими и электрическими свойствами. Например, некоторые классы нанотрубок чрезвычайно прочны в продольном направлении. Волокна, сделанные из таких нанотрубок, могут быть легкими, но более прочными, чем сталь. Более подробное обсуждение и иллюстрации см. в главе «Квантовая красота II».

*Натуральные числа*

*Natural numbers*

Числа 1, 2, 3, ... – числа, которые естественным образом возникают в результате счета, – называют натуральными числами. Это тот вид чисел, которые Пифагор одобрял больше всего. Натуральные числа формируют дискретный ряд. Их следует отличать от **действительных чисел**.

## *Начальные условия*

## *Initial conditions*

Основные законы физики в рамках современного понимания являются **динамическими уравнениями**. Иными словами, они определяют, как состояние мира в один момент времени связано с его состоянием в другие моменты времени. Они, однако, не указывают нам, что мы должны принять в качестве начальной точки. Таким образом, мы должны задать начальные «условия», чтобы начать разворачивать наше описание.

## *Небесная механика*

## *Celestial mechanics*

Первоначально термин *небесная механика* означал приложение классической механики вместе с ньютоновской теорией **гравитации** к описанию движения больших тел – по большей части планет, их лун и комет – в Солнечной системе. Сегодня термин «небесная механика» используется более широко для обозначения приложения механики к астрофизическим телам, а также к ракетам и искусственным спутникам. Поскольку соответствующие законы физики применимы и в общем случае, небесная механика – это, в сущности, скорее специализированная ветвь механики, чем отдельная дисциплина.

## *Нейтрино*

## *Neutrino*

У каждого из трех электрически заряженных лептонов – электронов  $e$ , мюонов  $\mu$  и тау-частиц (тауонов)  $\tau$  – есть связанное с ними *нейтрино*. Нейтрино, обозначаемые  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ , – электрически нейтральные частицы. Нейтрино с **левой спиральностью** несут единицу желтого **слабого заряда**, их **электрический заряд** равен нулю, а сильного **цветового заряда** они

не имеют. Вследствие этого нейтрино участвуют в слабом взаимодействии, но не вступают в **электромагнитные** или **сильные взаимодействия**. В результате нейтрино чрезвычайно слабо взаимодействуют с обычным веществом. Яркая иллюстрация этого факта: каждую секунду приблизительно 65 миллиардов нейтрино, испускаемых при слабых переходах, которые питают энергией наше Солнце, проходят через каждый квадратный сантиметр на Земле. И тем не менее мы практически не чувствуем влияния этих нейтрино, и нужны очень сложные детекторы, чтобы вообще обнаружить этот поток.

Можно показать, что нейтрино должны были быть рождены в значительном избытке при Большом взрыве. Получившийся космологический газ до сих пор не обнаружен, просто потому, что нейтрино так слабо взаимодействуют. Когда-то полагали, что нейтрино являются хорошим кандидатом на роль темной материи, но эта идея не выдержала критику – в основном потому, что теперь мы знаем, что они для этого слишком легкие.

Относительно нейтрино было обнаружено много других интересных фактов. Я предлагаю две легкодоступных публикации, где вы сможете найти больше информации по этой теме, в примечаниях в конце книги.

### *Нейтрон*

### *Neutron*

Нейтроны вместе с протонами являются строительными блоками атомных **ядер**. *Нейтроны* имеют нулевой **электрический заряд**, но весят примерно столько же, сколько протоны. Большая часть массы **обычной материи** возникает за счет массы составляющих ее **протонов** и нейтронов. Прежде полагали, что нейтроны являются базовыми элементарными частицами, но сегодня мы знаем, что они – сложные объекты, состоящие из более элементарных **кварков** и **глюонов**.

### *Непрерывная группа*

См. **Группа**.

## ***Непрерывная симметрия***

### ***Continuous symmetry***

Если структура позволяет непрерывный ряд преобразований, который оставляет ее неизменной, или **инвариантной** – другими словами, если наша структура допускает гладкий ряд преобразований симметрии, мы говорим, что имеет место *непрерывная симметрия* структуры или что структура допускает *непрерывную группу* преобразований симметрии.

Пример: круг можно повернуть на любой угол вокруг его центра, и при этом он останется тем же самым кругом. Таким образом, круг инвариантен относительно гладкого ряда вращений. А вот равносторонний треугольник инвариантен только относительно поворотов вокруг центра на целое кратное угла  $120^\circ$ . Следовательно, равносторонний треугольник допускает дискретную, но не непрерывную симметрию.

См. также **Аналоговый** и **Цифровой**.

## ***Непротиворечивость и противоречие***

### ***Consistency/contradiction***

Мы говорим, что система, состоящая из предположений и наблюдений, *непротиворечива*, если ее нельзя использовать, чтобы вывести противоречие. Мы говорим, что мы имеем противоречие, если утверждение и его отрицание оказываются верны одновременно.

В чисто умозрительных теориях, которые не делают заявлений о конкретных физических явлениях, наблюдения не могут привести к противоречиям. Такая защищенность от противоречий делает эти теории непротиворечивыми, но хорошими они от этого не становятся. Ньютон убедительно выразил такое мнение в своих «Началах»:

Всё же, что не выводится из явлений, должно называться гипотезой; гипотезам же метафизическим, физическим, механическим или основанным на скрытых свойствах, не место в экспериментальной философии.

Оценивая ценность физических теорий, мы должны принимать во внимание не только их непротиворечивость, но также их силу и их экономность. Чтобы узнать больше на эту тему, см. **Фальсифицируемая теория, сильная теория и Экономность (идей)**.

### *Нуклон*

### *Nucleon*

Нуклонами называются частицы, которые составляют атомные ядра. *Нуклон* означает просто «протон или нейтрон».

**Нулевые колебания.** См. **Квантовые флуктуации и нулевые колебания.**

### *Облако вероятности*

### *Probability cloud*

В классической механике частицы занимают в любой момент времени некоторое определенное положение в пространстве. В квантовой механике описание частицы совершенно иное. Частица не занимает определенное положение в любой момент времени; вместо этого ей ставится в соответствие *облако вероятности*, которое определено во всем пространстве. Форма облака вероятности может изменяться с течением времени, хотя в некоторых важных случаях оно не меняется. См. **Стационарное состояние.**

Название подсказывает, что мы можем представить себе облако вероятности как протяженный объект, который имеет некоторую неотрицательную, т. е. положительную или нулевую, плотность в каждой точке. Плотность облака вероятности в точке показывает, какова относительная вероятность того, что частица находится в этой точке. Таким образом, есть бóльшая вероятность найти частицу там, где плотность ее облака вероятности высокая, и меньшая вероятность найти ее там, где плотность этого облака низкая.

Квантовая механика не дает уравнений непосредственно для облаков вероятности. Облака вероятности вычисляются возведением в квадрат

модулей волновых функций, удовлетворяющих уравнению Шредингера.  
См. **Волновая функция, Уравнение Шредингера.**

### *Общая ковариантность*

### *General covariance*

Это первоначальный термин Эйнштейна для **локальной галилеевой симметрии**<sup>[109]</sup>, основного принципа **общей теории относительности.**

### *Общая теория относительности*

### *General relativity*

*Общая теория относительности* – это теория **гравитации** Эйнштейна.

Джон Уилер описал суть общей теории относительности таким образом:

Материя говорит пространству-времени, как ему искривляться.

Пространство-время говорит материи, как ей двигаться.

В основном тексте содержится подробное объяснение (и критика!) этого краткого резюме.

Слово «общая» в названии «общая теория относительности» – это выдумка Эйнштейна, призванная обозначить положение новой теории по отношению к его более ранней **специальной теории относительности.** В нашей медитации мы выражаем это отношение другим, более систематизированным языком, который развился в процессе описания других взаимодействий. Специальная теория относительности рассматривает **преобразования Галилея**, а общая теория относительности – более *общие* преобразования. Говоря в целом, они сводятся к тому, чтобы позволить использование различных преобразований Галилея в различных точках пространства-времени. На нашем языке общая теория относительности основана на **локальной**

**симметрии**, тогда как специальная теория относительности – на нелокальной, или по-другому (и лучше), **глобальной симметрии**.

## Объединение

## Unification

*Объединение* связанных идей в согласованное целое – это аспект экономии мысли. Другой, дополнительный аспект объединения – снятие противоречий между кажущимися противоположностями. Примиряя противоположности, мы рассматриваем их в качестве взаимодополняющих аспектов лежащего в их основе единого целого.

Наш Вопрос ставит трудную задачу объединить красоту и физическое воплощение, или Идеальное и Реальное.

Объединение, как в его аспекте соединения связанных идей, так и в аспекте примирения кажущихся противоположностей, было главной чертой во многих знаковых достижениях физики:

- Систематическое использование **координат**, которое было впервые введено Рене Декартом (1596–1650) в его *La Géométrie* 1637 г., объединившей алгебру и геометрию.

- Закон всемирного тяготения Ньютона и его законы движения объединили астрономию и земную физику. Наблюдения Галилея с помощью телескопа, которые открыли (среди прочего) гористый ландшафт нашей Луны и спутниковую систему Юпитера, стали мощными воплощениями этого объединения.

- **Уравнения Максвелла** для **электромагнетизма** объединили описание электричества и магнетизма. Эти же уравнения также дали нам описание света на основе электромагнетизма, собрав вместе все оптические явления в этом объединении.

- **Специальная теория относительности** Эйнштейна принесла с собой **преобразования симметрии**, которые смешивают пространство и время, позволяя нам видеть их как два аспекта объединенного пространства-времени.

- **Электромагнитный флюид** Фарадея и Максвелла и **метрический флюид** Эйнштейна, упраздняя **Пустоту**, объединили пространство-время и материю.

- Понятие **квантов квантового флюида**, типичными представителями

которых являются фотоны электромагнитного излучения (света), объединило описание корпускулярных и волновых аспектов их физического поведения.

На переднем крае современной физики видны дразнящие указания на то, что скоро могут произойти новые объединения.

- Все разделы нашей **Главной теории** основаны на **локальной симметрии**, но преобразования, предусмотренные в наших теориях **сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий**, совершаются независимо в **пространствах свойств**, в то время как преобразования, относящиеся к нашей теории **гравитационного** взаимодействия, совершаются в пространстве-времени. Мы ищем более всеобъемлющую локальную симметрию, которая сделает из них единое целое.

С помощью **суперсимметрии** мы могли бы объединить **вещество и взаимодействие**.

Именно эти идеи находятся в центре внимания в главе «Квантовая красота IV».

### *Обычная материя*

### *Normal matter*

«Обычная материя» – это удобный термин, который я использую, говоря о материи, состоящей из **кварков**, цветных **глюонов**, **электронов** и **фотонов**<sup>[110]</sup>. Обычная материя – доминирующая форма материи на Земле и в ее непосредственном окружении. Это тот вид материи, из которой сделаны мы сами и которую мы изучаем в химии, биологии, материаловедении, всех инженерных науках и почти всей астрофизике. Обычную материю следует отличать от **темной энергии** и **темной материи**.

### *Орбита, орбиталь*

### *Orbit/orbital*

Понятие *орбиты* планеты, вращающейся вокруг нашего Солнца,

или *орбиты* искусственного спутника, вращающегося вокруг Земли, всем понятно и не требует здесь никакого специального комментария. Это, в сущности, последовательность положений, которые тело занимает в пространстве с течением времени, собранная в кривую.

*Орбиталь*, как она понимается в квантовой физике и химии, – это волновая функция **стационарного состояния**. Мы говорим, что **электрон** «занимает орбиталь», когда состояние этого электрона описывается **волновой функцией**, связанной с этой орбиталью. Термин «орбиталь» является пережитком модели атома Бора, в которой устойчивые состояния были связаны с определенными классическими орбитами.

## *Относительность, теория относительности*

### *Relativity*

В англоязычной физике слово «*относительность*» обычно является отсылкой к одной или сразу обеим теориям Эйнштейна, названия которых включают это слово, т. е. к **Специальной** или **Общей теории относительности**. Какая из двух подразумевается, должно быть ясно из контекста.

В нашей медитации мы подчеркиваем, что обе теории относительности по сути являются утверждениями о **симметрии** в нашем точно определенном смысле. Они утверждают, что мы можем совершить **преобразования** над величинами, которые фигурируют в законах физики, не изменив содержание этих законов – т. е. это Изменение без Изменения. Само слово «относительность» делает упор на аспект «изменения», но оставляет аспект «без изменения» – т. е. аспект **инвариантности**, важного дополнения к относительности – никак не озвученным. Эта случайность имела несчастье склонить некоторых людей к тому, чтобы предполагать и даже утверждать нелепости наподобие этой: «Эйнштейн учил нас, что все относительно». Он этому не учил, и это неверно.

## *Очарованный кварк*

### *Charmed quark*

Очарованный кварк, обозначаемый как  $s$ , – член второго семейства частиц материи. Очарованные кварки очень нестабильны, и их роль в нашем сегодняшнем мире очень невелика. Очарованные кварки были открыты в 1974 г., и их экспериментальное изучение весьма способствовало становлению Главной теории.

*Перенормировка ренормализационная группа*

*Renormalization renormalization group*

**Квантовые флюиды** лежат в самой основе нашей Главной теории. Они проявляют спонтанную активность, или способность к **квантовым флуктуациям**, которые в целом становятся все сильнее на коротких расстояниях. Эти непрерывные колебания пронизывают пространство и изменяют поведение, которое материя имела бы в их отсутствии. Расчет таких изменений называют *перенормировкой*.

Когда мы изучаем свойства частиц более пристально, двигаясь к более высоким энергиям или более коротким расстояниям или, как мы говорим, используя более высокое разрешение, мы меньше чувствуем влияние более плавных, слабых квантовых флуктуаций. Мы приближаемся к наблюдению «обнаженных» частиц. *Ренормализационная группа* – это математический аппарат для того, чтобы установить количественные связи между свойствами частицы, когда мы наблюдаем ее в различных разрешениях.

**Асимптотическая свобода** в сильном взаимодействии и количественное исследование объединения, которые обсуждаются в главе «Квантовая красота IV», являются хорошими примерами применения ренормализационной группы.

*Период, периодический*

*Period/periodic*

*Периодический* процесс – это такой процесс, который повторяется. Обычно термин относится к повторению во времени, хотя в научной литературе он нередко используется и для повторения в пространстве. *Период* процесса, периодического во времени, – это количество времени,

которое проходит между повторениями. См. также **Частота**.

### *Период колебания*

См. **Частота**.

### *Периодическая таблица*

### *Periodic table*

*Периодическая таблица* химических элементов<sup>[111]</sup> – это содержательное и информативное геометрическое расположение списка химических элементов, в котором столбцы содержат элементы со сходными химическими свойствами. В каждом столбце атомные номера и атомные веса увеличиваются в направлении сверху вниз; в каждой строке атомные номера и атомные веса увеличиваются, когда мы движемся слева направо. В самой развернутой версии периодической таблицы атомный номер увеличивается на единицу при переходе в соседнюю справа клетку, а также когда мы переходим из самой правой клетки ряда в крайнюю левую клетку рядом ниже. (Есть много вариантов представления таблицы. Зачастую, например, выделяют редкоземельные элементы и актиноиды в отдельные подтаблицы.)

Квантовая механика объясняет структуру периодической таблицы теоретически, как следствие **уравнения Шрёдингера**. Это великолепный пример соответствия

### *Идеальное → Реальное.*

В этом объяснении основную роль играют квантовая теория **момента импульса** и **принцип запрета Паули**.

### *Перспектива*

См. **Проективная геометрия и перспектива**.

## ***Платоново тело, платонова поверхность***

### ***Platonic solid/Platonic surface***

Платоново тело (правильный многогранник) – это **многогранник**, все грани которого являются копиями одного и того же правильного **многоугольника** и чьи грани соединяются единообразно во всех вершинах. Есть ровно пять различных (конечных) платоновых тел: тетраэдр, октаэдр, икосаэдр, куб и додекаэдр. Они подробно описаны в основном тексте.

Математическое построение этих тел и доказательство того, что иные невозможны, являются кульминационным моментом «Начал» Евклида.

Поверхности правильных многогранников во многих отношениях более фундаментальны, чем сами тела, которые они ограничивают. Я называю их платоновыми поверхностями.

Платоновы тела внушали восхищение математикам, ученым и мистикам в течение многих столетий.

## ***Поглощение (Абсорбция)***

### ***Absorption***

Мы говорим, что частица поглотилась, если закончилось ее независимое существование. Поскольку полная энергия сохраняется, энергия частицы после этого переходит в другую форму. Например, когда частица света (фотон) достигает вашей сетчатки, она может быть поглощена белками (родопсинами), которые в результате поглощения меняют форму. Изменение их формы, в свою очередь, вызывает электрические сигналы, которые наш мозг интерпретирует как зрительное ощущение.

## ***Позитрон***

### ***Positron***

«Позитрон» – это другое название для антиэлектрона, античастицы электрона.

## *Поле и флюид*

### *Field/fluid*

Введение понятие *поля*, пожалуй, лучше начать с примеров.

- При описании погоды удобно учитывать значения температур во многих точках пространства в различные моменты времени. Совокупность этих значений определяет температурное поле.

- При описании движения в толще воды удобно рассматривать значение **скорости** воды во многих точках пространства в различные моменты времени. Совокупность этих значений определяет поле скоростей.

- При описании **электрических** явлений удобно рассматривать, какие силы действовали бы на электрически **заряженную** частицу в случае ее наличия в различных точках пространства в различные моменты времени. Деление величин этих сил на величину заряда приведет нас к определению **электрического поля**.

В целом мы говорим, что у нас есть «*поле* типа  $X$ », когда у нас есть значения  $X$  в различных точках пространства и времени. Иначе говоря, поле типа  $X$  дает нам величину типа  $X$  в виде пространственно-временной функции.

Термин «*флюид*», используемый в этой книге, относится к любой разновидности того, что заполняет пространство и проявляет активность. Примеры включают **электрический флюид**, **магнитный флюид**, **глюонный флюид** и **флюид Хиггса**. Для того чтобы узнать о более тонких, но важных различиях между полем и флюидом, см. главным образом **Электрическое поле и электрический флюид**.

См. также **Среда**.

## *Поле Хиггса, флюид Хиггса*

### *Higgs field/Higgs fluid*

*Флюид Хиггса* – это заполняющая пространство субстанция, которая

участвует в уравнениях **Главной теории**. *Поле Хиггса* – это мера усредненного воздействия флюида Хиггса на другие частицы. См. **Поле, флюид; Электрическое поле, электрический флюид**, а также подробное обсуждение в главе «Квантовая красота III», часть 3.

### ***Поперечная волна и поляризация (света)***

### ***Transverse wave/polarization of light***

В нашей медитации самые важные поперечные волны – это **электромагнитные волны**, включая свет как особый случай.

Когда электромагнитная волна распространяется через пространство, лишенное обычного вещества (см. **Вакуум**), ее электрическое и магнитное поля – оба из которых являются направленными, **векторными** величинами – перпендикулярны направлению распространения волны. Именно это, не больше и не меньше, мы имеем в виду, говоря, что электромагнитные волны являются *поперечными* волнами. Таким образом, для поперечной волны активность, которую производит волна, перпендикулярна направлению, в котором волна распространяется.

В отличие от электромагнитных звуковые волны не являются поперечными волнами. Их активность, сжатие и разрежение воздуха, вызывает движение частиц воздуха в том же самом направлении, что и направление распространения волны. Волны такого типа называют *продольными волнами*.

Даже самые простые виды световых волн, связанные с чистыми спектральными цветами, имеют дополнительное свойство помимо их цвета и направления распространения. Это свойство называют *поляризацией*. Самая простая возможная поляризация – линейная поляризация. Если световая волна идет прямо на вас и ее электрические поля всегда указывают в направлении, которое соединяет вашу голову и ноги, когда вы стоите, мы говорим, что свет линейно поляризован в вертикальном направлении. Существуют решения уравнений Максвелла, которые соответствуют линейной поляризации в любом поперечном направлении, т. е. в любом направлении, перпендикулярном к направлению распространения волны. Есть также другие, более сложные возможные поляризации, когда за период колебаний электрические поля описывают круги или эллипсы в плоскости, перпендикулярной направлению

распространения волны. В таких случаях мы получаем свет с круговой или эллиптической поляризацией.

Люди нечувствительны к поляризации света (с некоторыми незначительными исключениями), хотя многие другие животные, особенно насекомые и птицы, ощущают ее.

### *Постоянная Планка, приведенная постоянная Планка*

### *Planck constant/reduced Planck constant*

В 1900 г. Макс Планк (1858–1947), изучая, как **электромагнитный флюид** приходит в равновесие с горячими газами, нашел необходимым предположить, что передача энергии между материей и электромагнитным излучением происходит не сколь угодно малыми порциями, а исключительно **квантованными** единицами. Он счел необходимым постулировать, что минимальная единица передачи энергии пропорциональна частоте света. Коэффициент пропорциональности, возникающий в этом соотношении – **соотношении Планка – Эйнштейна**, – теперь известен как постоянная Планка.

Эйнштейн предположил затем, что **соотношение Планка – Эйнштейна** применимо к **электромагнитному флюиду** как таковому, а не только к его обмену энергией с атомами. Бор в своей модели атома предложил правила для определения **стационарных состояний** электрона в атоме водорода, в которых постоянная Планка играла центральную роль. Успех правил Бора в объяснении **спектра** водорода ввел постоянную Планка в теоретическое описание вещества, так же как и в описание света.

В современной **квантовой теории** *постоянная Планка* стала вездесущей. Важный пример – ее появление в описании спина частиц. Многие виды частиц, включая **электроны, протоны, нейтрино и нейтроны**, имеют «**спин  $\frac{1}{2}$** ». Как описано в статье о **Спине**, это означает, что они проявляют самопроизвольное вращательное движение. *Постоянная Планка* появляется в **количественном** описании этого движения. Указанное вращательное движение, в частности, обладает величиной момента импульса, равной одной второй *приведенной постоянной Планка* (которая является просто *постоянной Планка*, поделенной на  $2\pi$ ).

## Потенциальная энергия

См. Энергия.

## Поток

## Flux

Векторные поля независимо от их природы можно математически рассматривать как представление потока обычной текучей среды, такой как воздух или вода. Математически воображаемый поток в каждой точке пространства имеет скорость, пропорциональную значению фактического векторного поля в этой точке. В этой модели *поток* через поверхность – это просто показатель скорости, с которой жидкость проходит через эту поверхность (с точностью до знака, что мы сейчас и обсудим). Это определение потока имеет смысл независимо от того, есть ли у этой поверхности граница.

Таким образом, если мы рассмотрим текущую реку и представим поверхность, расположенную перпендикулярно течению, то поток через эту поверхность будет существенным. В то же время поток будет несущественным через поверхности, повернутые по большей части вдоль потока.

Теперь вам нужно обратиться к статье **Циркуляция** – потому что, вероятно, вы еще этого не сделали! Дело в том, что я сейчас заполню пробел, касающийся одной последней тонкости о взаимосвязи этих двух понятий. После этого вы будете знать все, чтобы действительно понять, что такое **уравнения Максвелла**, используя только геометрические понятия и образы.

В двух уравнениях Максвелла нам нужно рассматривать поверхность, ограниченную замкнутым контуром и сравнивать циркуляцию чего-то одного по этому контуру с потоком чего-то другого через эту поверхность. (В **законе Фарадея** мы связываем циркуляцию электрического поля с потоком магнитного поля; а в **законе Ампера – Максвелла** мы связываем циркуляцию магнитного поля с потоками электрического тока и электрического поля.)

Чтобы подсчитать циркуляцию для использования в этих уравнениях, мы должны определиться с направлением, в котором мы движемся

по контуру. Есть две возможности – и ответы, которые они дают для циркуляции, различаются знаком. Чтобы уравнения Максвелла оставались одинаковыми независимо от нашего выбора, мы должны гарантировать, что знак потока через поверхность также меняется, когда мы меняем направление обхода контура, ограничивающего эту поверхность (и таким образом – знак циркуляции).

С этой целью мы используем простое *правило правой руки*: если пальцы вашей правой руки следуют направлению контура, то в определении потока мы считаем перенос жидкости положительным, когда он происходит в направлении вашего большого пальца, и отрицательным в случае обратного направления<sup>[112]</sup>. Если мы следуем этому правилу, то изменение направления обхода контура изменит одновременно и знак циркуляции, и знак потока, и таким образом взаимосвязь между циркуляцией и потоком останется неизменной.

В двух других уравнениях Максвелла (описывающих электрический и магнитный законы Гаусса) мы рассматриваем поток через замкнутую поверхность. В таком случае мы считаем поток положительным, если он переносит жидкость изнутри поверхности вне ее, и отрицательным в противном случае.

***Преобразования Галилея, галилеева симметрия, галилеева инвариантность***

***Galilean transformation/Galilean symmetry/Galilean invariance***

*Преобразования Галилея* – это вид преобразований, который мы совершаем над системой, когда мысленно прибавляем или вычитаем некоторую постоянную скорость из движения всех ее частей. Галилей, как это описано в основном тексте, описывал красивый мысленный эксперимент, который убедительно показывает, что после преобразований Галилея физические законы остаются неизменными, т. е. **инвариантными**: если вы находитесь в закрытой каюте без окон на корабле при спокойной погоде, то из того, что вы наблюдаете и ощущаете внутри каюты, невозможно сказать, как быстро движется корабль. Гипотеза о том, что законы физики инвариантны относительно преобразований Галилея, или, по-другому, о том, что законы физики обладают галилеевой симметрией, является одним из столпов **специальной теории**

относительности. См. также Буст.

### *Принцип запрета Паули или просто принцип запрета*

### *Pauli exclusion principle/exclusion principle*

*Принцип запрета Паули* в его первоначальной форме утверждает, что два **электрона** не могут находиться в одном и том же квантовом состоянии. Этот принцип применим ко всем **фермионам**: никакие два тождественных фермиона не могут находиться в одном и том же квантовом состоянии. Нежелание электронов и фермионов в целом делать одно и то же приводит к эффективному отталкиванию между ними. Это отталкивание является чисто квантово-механическим эффектом, который дополняет более привычные силы, такие как электрические силы.

Принцип запрета является существенным для понимания атомов, поскольку он не дает электронам в атоме сгрудиться около его ядра, несмотря на мощное электрическое притяжение последнего. Внешние электроны, удаленные от ядра, открыты влиянию соседних атомов. Таким образом принцип запрета делает возможной химию.

### *Проективная геометрия и перспектива*

### *Projective geometry/perspective*

*Проективная геометрия* – это обширная область математики, тесно связанная с художественным изучением перспективы. Ее основная задача – понять связи между изображениями, которые мы получаем, когда смотрим на один и тот же объект с различных точек наблюдения (иначе говоря, под различными ракурсами). Что общего имеют эти изображения? Как можно воспользоваться информацией из одного такого изображения, чтобы построить другие? Вот примеры вопросов, которые решаются в проективной геометрии. Проективная геометрия демонстрирует нам интересное применение глубоких идей, включая **преобразование, симметрию, инвариантность, относительность** и **дополнительность**, как объясняется в основном тексте.

## Проекция

## Projection

Это слово используется в математике и физике очень гибко. Оно имеет не одно, а несколько различных точных технических определений в пределах различных областей знаний. Во всех случаях *проекция* – это отображение одного пространства на другое, с помощью которого информация о первом пространстве представляется в новой форме. Часто (но не всегда) часть информации в этом процессе теряется. В этой книге я использовал слово «проекция» достаточно неформально, без технической скрупулезности, в нескольких тесно связанных смыслах:

- Проекция теней в метафоре Пещеры Платона. Здесь тени создают двумерные бесцветные версии объектов, которые они представляют, и много информации теряется.

- Проекция, которую создают наши глаза, наше зрение. Сетчатка наших глаз получает двумерный образ трехмерного мира. Фокусировка хрусталиком глаза позволяет создавать изображения, в которых (в случае идеального зрения) весь свет, выходящий из некоторой точки рассматриваемого объекта, фокусируется в очень небольшую область на сетчатке, сохраняя таким образом важную пространственную информацию.

Как мы подробно обсуждали в главе «Максвелл II», входной **электромагнитный сигнал**, который мы называем светом, несет в себе гораздо больше информации, чем извлекают наши глаза.

Человеческое зрение выполняет **проекцию** бесконечномерного пространства интенсивностей **спектральных** цветов на трехмерное пространство *воспринимаемого* цвета и отбрасывает информацию о **поляризации**.

- Геометрическая проекция: проекция поверхностей правильных многогранников на описанные вокруг них сферы путем продолжения линий из центра до поверхности; проекция световых лучей на холст в геометрически точном рисовании (вдохновленная живописью наука о **перспективе**); проекция поверхностей, таких как участки местности или даже вся поверхность Земли, на плоские листы бумаги при создании географических карт.

- **Цветовая** проекция в **пространстве** цветовых **свойств**. Например, на цветной вклейке X мы спроецировали трехмерное пространство

цветовых свойств, координатами которого являются **интенсивности**  $R$ ,  $G$ ,  $B$  – красного, зеленого и синего цвета соответственно – на двумерное пространство свойств, просто отбросив одну из координат.

### *Пространство свойств*

### *Property space*

Изучая человеческое восприятие цветов, мы обнаруживаем, что любой воспринимаемый цвет может быть представлен по существу единственным образом – путем смешения трех основных цветов, например, красного, зеленого и синего. Различные **интенсивности** красного, зеленого и синего описываются тремя положительными **действительными числами**, и каждая такая комбинация интенсивностей соответствует своему особому воспринимаемому цвету. Мы можем интерпретировать эти тройки как **координаты** в трехмерном *пространстве свойств* – *пространстве* воспринимаемых цветов.

Есть много примеров подобного рода, где мы используем числа для обозначения свойств и рассматриваем наборы чисел как координаты, чтобы определить пространство свойств. Пространства свойств, основанные на **цветовых зарядах**, играют центральную роль в наших **Главных теориях**.

### *Протон*

### *Proton*

*Протоны* наряду с нейтронами являются строительными блоками атомных **ядер**. Протоны имеют противоположный по отношению к **электронам электрический заряд** и весят примерно в две тысячи раз больше. Большая часть массы **обычного вещества** появляется за счет массы протонов и нейтронов, входящих в нее. Раньше думали, что протоны являются элементарными частицами, но сегодня мы знаем, что это сложные объекты, построенные из более элементарных кварков и глюонов.

## *Редукционизм*

## *Reductionism*

Уничижительный термин для «Анализа и Синтеза». См. **Анализ и Синтез**.

## *Сверхпроводимость, сверхпроводник*

## *Superconductivity/superconductor*

Многие металлы и некоторые другие материалы проявляют качественно иное поведение, когда они охлаждены до температуры, близкой к абсолютному нулю. Наиболее существенно то, что их сопротивление протеканию электрического заряда резко падает до нуля. Говорят, что они проявляют *сверхпроводимость* и становятся *сверхпроводниками*.

Сверхпроводимость была обнаружена экспериментально Камерлинг-Оннесом в 1911 г. Много лет ее не удавалось объяснить теоретически. Прорыв случился в 1957 г., когда Джон Бардин, Леон Купер и Роберт Шриффер предложили то, что мы теперь называем теорией сверхпроводимости БКШ. Их работа не только объяснила появление сверхпроводимости, но сделала это с использованием очень красивых и мощных идей, которые могли быть – и были – применены к другим задачам. В частности, они предвосхитили **спонтанное нарушение симметрии** и **механизм Хиггса**.

В сверхпроводниках **фотоны** ведут себя так, будто у них есть ненулевая **масса**. Уравнения, которые описывают эту ситуацию, по сути такие же, как и уравнения, которые мы используем в **Главной теории**, чтобы придать ненулевую массу **виконам** в механизме Хиггса. Я думаю, что будет справедливо и поэтично сказать, что большой урок, который мы можем извлечь из открытия **частицы Хиггса**, состоит в том, что мы живем внутри космического сверхпроводника. (Но это сверхпроводимость для потока слабого заряда, а не **электрического заряда**.)

## *Семейство, поколение*

## *Family*

**Частицы вещества** в Главной теории – т. е. **кварки** и **лептоны** – имеют одну интересную особенность – трехкратное повторение. Говорят, что они образуют три *семейства* (по-русски их также называют *поколениями*). В каждом семействе насчитывается 16 частиц, образующих схожие структуры из **сильных, слабых** и **электромагнитных зарядов**, которые подробно описываются в основном тексте. Представители трех семейств перечислены в нижеследующей таблице.

Первое	Второе	Третье
$u$	$c$	$t$
$d$	$s$	$b$
$e$	$\mu$	$\tau$
$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$

По-другому, пользуясь геометрическим языком главы «Квантовая красота III», мы можем сказать, что каждое из трех семейств содержит шесть сущностей, занимающих в каждом случае одни и те же **пространства свойств**.

Переходы, связанные со **слабым взаимодействием**, которые превращают единицу желтого **слабого заряда** в единицу фиолетового слабого заряда, превращают (левый)  $u$ -кварк в (левый)  $d$ -кварк, как мы обсудили в основном тексте. Там я ссылаясь на некоторые сложности и здесь расскажу об этом подробнее. Сложность состоит в том, что *переходы слабого цвета могут сопровождаться переходами между семействами*. Таким образом, кроме  $u \rightarrow d$ , мы имеем также  $u \rightarrow s$  и  $u \rightarrow b$ . Чтобы описать относительные вероятности таких переходов, необходимо ввести в **Главную теорию** новые параметры. Угол Кабиббо, например, является мерой того, как соотносятся вероятности второго и первого. Существует множество дополнительных переходов между кварками, которые нужно учесть (например,  $c \rightarrow d$ ), и еще больше, если вспомнить

о лептонах. Чтобы описать их все в рамках Главной теории, необходимо ввести около дюжины новых параметров. Величины этих «углов смешивания» были измерены экспериментально, но нет никакой убедительной теории, объясняющей, почему они именно такие.

Ну и уж коли на то пошло, нет убедительной теории, которая бы объясняла, почему вообще Природа позволила себе это трехкратное повторение семейств.

## *Сила, взаимодействие*

### *Force*

В физике и в нашей медитации термин *сила* может употребляться двумя различными способами.

В ньютоновской механике сила – это мера влияния одного тела на другое. *Сила*, с которой действует тело, – это его способность вызывать **ускорение** других тел. См. **Ускорение**.

В другом варианте употребления (который часто встречается, но менее точен) мы говорим о *силах* Природы, имея в виду те механизмы, которые действуют в Природе. В нашей **Главной теории** мы выделяем в Природе четыре фундаментальные силы: гравитация, электромагнетизм, а также сильная и слабая сила. Также в этом случае часто говорят о *взаимодействиях* вместо сил (и следовательно, об электромагнитном взаимодействии, сильном взаимодействии и т. д.). Я решил повсюду использовать слово «сила», поскольку это звучит сильнее [\[113\]](#).

## *Силовые линии*

### *Lines of force*

Под влиянием стержневого магнита железные опилки на листе бумаги образуют кривые линии, идущие от одного полюса магнита к другому, как изображено на илл. 35. Это красивое явление и другие подобные вдохновили воображение Фарадея. Он пришел к предположению, что эти линии существуют сами по себе, заранее, и железные опилки их лишь

проявляют, а не создают. Эти интуитивные догадки привели его к новым экспериментальным открытиям. Максвелл развил эти результаты в точно сформулированные математические идеи. Современная физика с ее **флюидами**, заполняющими пространство, появилась из этих идей. Они вытеснили идею **дальнодействия** как модель фундаментального понимания устройства мира.

### *Сильное взаимодействие*

### *Strong force*

**Сильное взаимодействие** наряду с **гравитацией**, **электромагнетизмом** и **слабым взаимодействием** – это один из четырех основных механизмов, через которые действует Природа.

Сильное взаимодействие – самая мощная сила в Природе. Оно отвечает за стабильность атомных ядер и управляет большей частью того, что происходит при столкновениях, которые изучаются на **ускорителях** высоких энергий, таких как **Большой адронный коллайдер**.

Вскоре после открытия атомных **ядер** в начале XX в. физики признали, что взаимодействия, известные к тому времени – **гравитация** и **электромагнетизм**, – не могли объяснить самые основные свойства ядер, начиная с их способности сохранять стабильность. Это привело к десятилетиям интенсивных исследований в ядерной физике высоких энергий, как экспериментальных, так и теоретических. Зрелый результат этой работы – **Главная теория**, подробно описанная в нашей основной медитации. В рамках Главной теории сильное взаимодействие понимают как проявление **квантовой хромодинамики (КХД)**.

В английском языке вместо термина «сильное взаимодействие» (strong interaction) чаще используется выражение strong force (буквально «сильная сила»). Лишь в некоторых случаях, таких как обсуждение гравитационного влияния нейтронной звезды или черной дыры, приходится говорить о большой величине силы в буквальном смысле. Поскольку в русском языке выражение «сильная сила» практически не применяется, неоднозначности не возникает. См. **Сила, взаимодействие**.

### *Симметрия, преобразования симметрии, группа симметрии*

## *Symmetry/symmetry transformation/symmetry group*

В математике и математических науках мы говорим, что у объекта есть *симметрия*, если существуют преобразования, которые производят изменения или перемещают различные части объекта, оставляя объект в целом неизменным, или **инвариантным**. Такие преобразования называют *преобразованиями симметрии*.

Понятия симметрии и преобразований симметрии также применяются к системам уравнений. Мы говорим, что система уравнений имеет симметрию относительно некоторого преобразования, если преобразование изменяет величины, которые стоят в уравнениях (как правило, меняя их местами, или комбинируя их более сложными способами) без изменения смысла системы уравнений в целом.

Пример: уравнение  $x = y$  обладает симметрией относительно преобразования, которое меняет местами  $x$  и  $y$ , потому что преобразованное уравнение  $y = x$  имеет тот же самый смысл, что и исходное. Все множество преобразований, которые оставляют объект инвариантным, называют его *группой симметрии*.

## *Синтез*

## *Synthesis*

Процесс объединения простых компонентов или понятий для того, чтобы произвести более сложные структуры. См. **Анализ и Синтез**.

## *Скорость*

## *Velocity*

Интуитивно *скорость* определяется как быстрота изменения положения.

Таким образом, чтобы определить скорость частицы, мы рассматриваем ее смещение  $\Delta x$  за малый интервал времени  $\Delta t$ , берем частное от деления  $\Delta x/\Delta t$  и рассматриваем его предельное значение

при уменьшении и стремлении интервала  $\Delta t$  к нулю. Это предельное значение, по определению, является скоростью.

См. **Бесконечно малые**, где обсуждаются некоторые фундаментальные вопросы, касающиеся этого определения.

### *Слабое взаимодействие*

### *Weak force*

*Слабое взаимодействие* наряду с **гравитацией**, **электромагнетизмом** и **сильным взаимодействием** – это один из четырех основных механизмов, с помощью которых действует Природа.

Слабое взаимодействие ответственно за большое разнообразие процессов трансформации, включая некоторые формы ядерной радиоактивности, «горение» ядерного топлива внутри звезд и космологический и астрофизический синтез всех химических элементов (их ядер), начиная с протонов и нейтронов.

В рамках Главной теории *слабое взаимодействие* понимают как результат реакции частиц  $W$  и  $Z$ , так называемых **виконов**, на слабый **цветовой заряд**. Как и другие фундаментальные взаимодействия, слабое взаимодействие – проявление **локальной симметрии**.

Для объяснения особенностей слабого взаимодействия, в частности, ненулевой массы виконов, был предложен **механизм Хиггса**. Развитие этого подхода привело к открытию **частицы Хиггса**. Успех этих идей говорит нам о существовании **поля Хиггса**, которое пронизывает все пространство и изменяет поведение других частиц разнообразными способами.

В английском языке вместо термина «слабое взаимодействие» (weak interaction) чаще используется выражение weak force (буквально «слабая сила»). В буквальном смысле оно уместно, например, если вы приводите доводы против астрологии и говорите о влиянии на человеческие судьбы силы тяжести планеты или далекой звезды: «Это такая слабая сила, что она не может иметь никакого значения». Поскольку в русском языке выражение «слабая сила» практически не применяется, неоднозначности не возникает. См. **Сила, взаимодействие**.

### *Слагаемое Максвелла (Закон Максвелла)*

## *Maxwell term (Maxwell's law)*

Чтобы согласовать расхождения между **динамическими законами** для **электрического** и для **магнитного поля** в том виде, в каком они были тогда известны, Максвелл предположил, что должен существовать дополнительный эффект. Новый эффект, который я назвал **законом Максвелла**, состоит в том, что меняющиеся со временем электрические поля вызывают («создают») магнитные поля. Это своего рода комплементарное дополнение к **закону Фарадея**, который утверждает, что меняющиеся со временем магнитные поля вызывают появление электрических полей. Закон Максвелла добавил другой способ наведения магнитных полей к уже известному – с помощью электрических токов (**Закон Ампера**). Полное уравнение, которое получается при добавлении нового *лагаемого Максвелла* к **закону Ампера**, известно как **закон Ампера – Максвелла**.

## *Собственная частота, резонансная частота*

### *Natural frequency/Resonant frequency*

Многие объекты, особенно жесткие, обладают несколькими предпочтительными типами колебаний. Их называют *собственными модами колебаний*. В каждой собственной моде объект проходит сквозь цикл изменений формы, который повторяется через фиксированный интервал времени. Этот интервал называют **периодом** моды колебаний, а величину, обратную этому периоду, – **частотой** моды. Частоты этих естественных режимов колебаний называют собственными частотами. Поскольку колебания тел в воздухе вызывают звуковые волны, мы можем слышать собственные частоты тел как **чистые тона**, которые они издают.

*Примеры:*

- Камертоны делаются так, чтобы иметь единственную слышимую собственную частоту.
- У гонгов обычно есть несколько собственных частот, так же как и у колоколов. Можно слышать различные комбинации тонов при колебаниях гонга или колокола, в зависимости от того, где или как по ним ударили. Это происходит потому, что разные типы ударов устанавливают различные **начальные условия**, возбуждают разные

собственные моды с различной относительной силой.

Собственные частоты тела также называют его резонансными частотами.

Эти явления в музыкальных инструментах и звуке имеют близкие параллели в атомах и световых явлениях. Собственные моды инструмента напоминают стационарные состояния атома, а звуковая палитра музыкального инструмента походит на спектр атома. Эти параллели не только метафоричны, но простираются и до уравнений, описывающих эти системы, которые очень похожи друг на друга. В спектрах атомов проявляется очень реальная, видимая Музыка сфер.

### *Спектральный цвет*

См. Цвет (света) и электромагнитный спектр.

### *Спектры атомные, молекулярные и прочие*

### *Spectra atomic, molecular, and other*

Атомы определенного вида – например, атомы водорода – поглощают некоторые спектрально чистые цвета гораздо эффективнее, чем другие. (Вообще говоря, они поглощают **электромагнитные волны** некоторых частот гораздо сильнее, чем волны с другими частотами. В этой словарной статье я буду использовать менее общий, но более наглядный язык цветов.) Те же самые атомы при нагреве испускают большую часть излучения в виде тех же самых спектрально чистых цветов. Комбинация характерных цветов различна для разных видов атомов и образует своего рода отпечатки пальцев, благодаря которым мы можем их идентифицировать. Комбинация тех цветов, которые предпочитает атом, называется его спектром.

Большим достижением **квантовой теории** было обнаружение способа вычисления атомных спектров. Идея, лежащая в его основе, до сих пор является актуальным наследием модели атома Бора. Бор постулировал, что электроны в атоме могут находиться только в дискретном наборе **стационарных состояний**. Поэтому возможные значения энергии электронов также образуют дискретный набор. Когда атом испускает

или поглощает **фотон**, он совершает переход между двумя стационарными состояниями. Поскольку в этом процессе **сохраняется энергия**, энергия фотона соответствует разнице энергий этих двух стационарных состояний. Наконец, венец пронизательности Бора: спектральный цвет фотона соответствует его энергии. Таким образом, в спектре атома закодированы энергии его возможных состояний. (Скажем точнее об этом коде: **частота** электромагнитной волны соответствующего цвета, помноженная на постоянную Планка, равна **энергии** фотона. См. **Фотон и соотношение Планка – Эйнштейна**.)

В современной квантовой теории мы вычисляем возможные стационарные состояния и их энергии, решая уравнение Шрёдингера, но фундаментальное соотношение между возможными энергиями атома и его спектром остается таким же, каким его представлял Бор. См. **Уравнение Шрёдингера**.

Я говорил об атомах, но та же самая логика применима к молекулам, к твердым телам, к **ядрам** и даже к **адронам**. В ядрах мы имеем дело со **стационарными состояниями нуклонов**, а в адронах – со стационарными состояниями систем, состоящих из **кварков** и **глюонов**, но в каждом случае в их спектрах закодированы секреты их структуры.

Когда свет Солнца или других звезд анализируют и изучают его спектральный состав, обнаруживается, что некоторые цвета имеют большую интенсивность (так называемые «эмиссионные линии»), а другие – меньшую интенсивность (так называемые «линии поглощения») по сравнению со средним уровнем. Картина эмиссионных линий и линий поглощения может быть сопоставлена со спектрами (измеренными либо вычисленными) известных атомов, молекул и **ядер**. Они показывают, что находится в атмосфере звезды и есть ли там горячие или холодные зоны. Они предоставляют очень подробные и убедительные свидетельства того, что вещество повсюду во Вселенной состоит из одного и того же материала и подчиняется тем же самым законам.

Употребление слова «спектр» в словосочетании «электромагнитный спектр» кажется на первый взгляд сильно отличающимся от его использования в словосочетании «спектр атома». Первое относится ко всему диапазону возможных форм электромагнитного излучения, в то время как последнее относится к определенным цветам (или к **чистым тонам**, т. е. **частотам**) света, которые атом может испускать (который однозначно соответствует, как мы объяснили выше, возможным энергиям его стационарных состояний). Однако если смотреть глубже, то станет ясно, что вполне справедливо можно сказать, что **электромагнитный**

**спектр** – действительно спектр чего-то, а именно: **электромагнитного флюида!** Ведь электромагнитный спектр – это диапазон возможных цветов, которые может испустить электромагнитный флюид.

## *Специальная теория относительности*

### *Special relativity*

В своей *специальной теории относительности* Эйнштейн соединил две идеи, которые кажутся противоречивыми.

- Наблюдение Галилея о том, что совокупное движение системы с постоянной **скоростью** оставляет законы Природы неизменными.
- Вывод из **уравнений Максвелла** о том, что величина скорости света – следствие законов Природы и не может меняться.

Между этими двумя идеями очевидно внутреннее противоречие, поскольку опыт с прочими объектами подсказывает, что наблюдаемая нами скорость этих объектов изменится, если мы сами будем перемещаться с постоянной скоростью. Мы можем их догнать или даже опередить. Почему лучи света должны вести себя иначе?

Эйнштейн разрешил это противоречие, критически анализируя операции, необходимые для синхронизации часов в разных точках пространства, и то, как этот процесс синхронизации изменяется при совокупном движении с постоянной скоростью. Из этого анализа следует, что время, приписываемое событию движущимся наблюдателем, отличается от времени, которое приписывает событию неподвижный наблюдатель, причем на величину, зависящую от положения этого события в пространстве. По отношению к одному и тому же событию время одного наблюдателя является смесью пространства и времени другого, и наоборот. Эта «относительность» пространства и времени – существенное новшество, которое специальная теория относительности Эйнштейна привнесла в физику. Оба предположения, лежащие в основе теории, уже были известны и были широко признаны до появления его работы, но никто не рассматривал их всерьез в совокупности и не добился их согласования.

Специальная теория относительности важна не только сама по себе, но также и потому, что она ввела в науку новую сверхидею для создания

гипотез и уточнения наших физических законов, которая оказалась очень плодотворной и успешной. Эта сверхидея заключается в том, что мы назвали **симметрией**, поэтически определенной как Изменение без Изменения. Два постулата специальной теории относительности очень хорошо соответствуют этому описанию: первый говорит нам, какой вид изменений рассматривать (а именно – **преобразования Галилея**), а второй сообщает, что они *не меняют* (а именно – скорость света).

Тема симметрии, или инвариантности, – Изменения без Изменения – много раз и с разными вариациями звучит в нашей медитации. Сначала она робкая и приглушенная, но затем становится все более яркой и усиливается, пока в конце концов не оказывается господствующей в нашем самом глубоком понимании Природы.

### Спин

### Spin

В английском языке глагол to spin означает «вращаться», но можно также сказать, что объект обладает вращением (*has spin*), если он вращается вокруг некоторой оси. Вращение, или *спин*, имеет то же значение и в квантовом мире, но это понятие становится более важным в основном по двум причинам.

- Многие частицы никогда не перестают вращаться! Для этих частиц вращательное движение вокруг их центра – один из аспектов спонтанной активности, которая так характерна для квантового мира. **Электроны, протоны и нейтроны** – все обладают этим свойством. В какой бы момент мы ни измеряли **угловой момент** вращения, его величина окажется равна одной второй, умноженной на приведенную **постоянную Планка**. Мы говорим, что эти частицы имеют спин  $\frac{1}{2}$  или являются частицами со спином  $\frac{1}{2}$ .

- Многие частицы, в особенности электроны, действуют как небольшие магниты. Подобно Земле, они создают **магнитные поля**, структура которых согласована с направлением их вращения. Магнитное поле, связанное с одним-единственным электроном, довольно мало, но, если многие электроны выстроят свои оси вращения в одном направлении, их поля складываются. Магнетизм классических «магнитов» – по существу, стержней из железной руды – является результатом одинаковой ориентации

полей вращающихся электронов, которые в них содержатся.

### *Спинорное представление*

### *Spinor representation*

*Спиноры* – своего рода усовершенствованная версия **векторов**. Они появляются в математическом описании **спина** электрона в **уравнении Дирака** как **пространство свойств частиц вещества** в схеме объединения  $SO(10)$  (Джорджи – Глэшоу), в общих чертах описанной в главе «Квантовая красота IV» и в нескольких других передовых направлениях физики. Описание математического аппарата спиноров далеко выходит за рамки этой книги, но я указал две легкодоступные ссылки в примечаниях в конце книги.

### *Спиральность*

См. **Четность**.

### *Спонтанное нарушение симметрии*

### *Spontaneous symmetry breaking*

Между точным соблюдением **симметрии** и ее полным отсутствием существует промежуточная возможность, *спонтанное нарушение симметрии*, которое ощутимо присутствует в нашем описании мира.

Мы говорим, что наблюдается спонтанное нарушение системы уравнений, если:

- уравнения удовлетворяют симметрии, но устойчивые решения этих уравнений ей не удовлетворяют.

Таким образом находит оправдание наблюдаемая нехватка симметрии. Симметрия присутствует в уравнениях, но сами уравнения говорят нам о том, что мы не будем ее наблюдать!

Пример. В фундаментальных уравнениях, которые описывают кусок естественного магнита, любое направление в пространстве эквивалентно

всем остальным. Но этот кусок представляет собой магнит, а в магните уже нельзя сказать, что все направления эквивалентны. Каждый магнит имеет полюса и может быть использован в качестве стрелки компаса. Объяснение того, как теряется (или «нарушается») вращательная симметрия, довольно простое, но глубокое. В магните существуют силы, которые стремятся выровнять спины электронов со спинами их соседей.

В ответ на действие этих сил все электроны должны выбрать общее направление, в котором им выстроиться. Силы, так же как и уравнения, которые описывают их, будут безразличны к выбору этого направления, но *выбор должен быть сделан*. Таким образом, устойчивые решения этих уравнений обладают меньшей симметрией, чем сами уравнения.

В нашей **Главной теории слабого взаимодействия** имеется вращательная симметрия между направлениями в слабом **цветовом пространстве**, которая спонтанно нарушается за счет существования заполняющего пространство **поля Хиггса**. Основная идея очень похожа на ту, которую мы только что рассмотрели, обсуждая обычный магнит. Так же, как фундаментальные уравнения для сил взаимодействия электронов побуждают спины соседних электронов выстраиваться в одном направлении, таким же образом фундаментальные уравнения побуждают поле Хиггса выравнивать свое направление в **пространстве свойства слабого заряда** между соседними точками пространства-времени. Общее направление должно быть выбрано, и, таким образом, симметрия вращения (в пространстве свойства слабого заряда) спонтанно нарушается.

Успех этих идей, предоставивших превосходное описание слабого взаимодействия, и предсказание существования частицы Хиггса поощряет нас и далее исследовать возможность того, что лежащая в основе всего симметрия уравнений нашего мира намного больше, чем та симметрия, которую мы наблюдаем в природе, рассматривая лежащие в основе еще более широкие **группы симметрии**.

*Среда*

*Medium/media*

*Среда* для нас – это что-то, заполняющее пространство<sup>[114]</sup>.

Таким образом, понятие *среда* может использоваться наравне с понятием **флюида**. На полях отметим, что «флюид» предполагает некий

материал, части которого могут меняться местами друг с другом, как в потоках воздуха или воды, в то время как «среда» предполагает нечто более осязаемое, которое может колебаться, но имеет структурную целостность, как стекло или желе. Но среды, или флюиды, которые, согласно нашей Основной теории, составляют наиболее фундаментальную материальную основу мира, – такие как **глюонный флюид** и **электронный флюид**, настолько отличаются от воздуха, воды, стекла, желе или любой другой привычной нам жидкости или среды, что кажется глупым настаивать на любой одной из двух метафор.

### *Стандартная модель*

См. Главная теория.

### *Стационарное состояние*

### *Stationary state*

Исторически термин «стационарное состояние» возник в модели атома Бора. Если применять классическую механику и электродинамику к задаче об отрицательно заряженном электроны, связанном с положительно заряженным протоном, то стационарное решение найти нельзя. Электрон будет падать по спирали на протон, излучая **электромагнитные волны**. Чтобы избежать этой катастрофы, Бор ввел смелую гипотезу – гипотезу о *стационарных состояниях*. В ней электрону позволено занимать лишь немногие из классически разрешенных орбит, которые и определяют его разрешенные «состояния». В пределах этих особых орбиталей электрон не излучает энергию, а является «стационарным». Таким образом, разрешенные **орбитали** определяют стационарные состояния.

Впоследствии модель Бора была заменена современной квантовой механикой, но некоторые элементы первой, включая понятие стационарного состояния, можно увидеть и в современной теории. В современной квантовой теории состояние электрона описывается **волновой функцией**. Эта волновая функция и связанное с ней **облако вероятности** изменяются во времени согласно фундаментальному **уравнению Шрёдингера**. Среди решений уравнения Шрёдингера есть

некоторые особые, у которых облако вероятности совсем не изменяется во времени. Эти решения – плод квантовой теории – имеют свойства, которые Бор постулировал для стационарных состояний в своей модели. Таким образом, в квантовой теории мы говорим, что волновые функции, чьи облака вероятности не изменяются во времени, определяют *стационарные состояния*. Повторим, что дополнительную информацию, включая иллюстрации, стоящие тысячи слов, см. в главе «Квантовая красота I», а также в статье о **Спектрах**.

Специальные волновые функции, которые определяют стационарные состояния (волновые функции, облака вероятности которых не изменяются во времени), являются чрезвычайно полезными при обдумывании задач в атомной физике и химии. Как дань их предшественницам, разрешенным орбитам Бора, их называют орбиталями.

Понятие о стационарности состояния является приблизительным, поскольку существуют физические процессы, с помощью которых электрон может совершить переход между этими состояниями. А именно электрон в стационарном состоянии может перейти в другое стационарное состояние, испустив или поглотив **фотон**. Бор не мог в пределах его модели разработать подробную картину или механизм для этого скачкообразного изменения орбиты и просто ввел его как дополнительное предположение: возможность **квантовых переходов**, или **квантовых скачков**.

В современной квантовой теории переходы между стационарными состояниями происходят как логическое следствие уравнений. Физически они возникают из-за взаимодействия между электронами и **электромагнитным флюидом**. Поскольку это взаимодействие довольно незначительно по сравнению с основными **электрическими силами**, которые удерживают электроны, нам нередко хорошо удается учесть его в модели как поправку, сохраняя стационарные состояния в качестве отправной точки. При таком подходе мы обнаруживаем, что переходы не являются истинными нарушениями непрерывности, хотя они действительно происходят быстро.

Процесс излучения особенно интересен с концептуальной точки зрения. В нем электрон порождает электромагнитную энергию в виде фотона там, где его первоначально не было. Это происходит, когда электрон сталкивается со спонтанной активностью в электромагнитном флюиде и, передавая ему часть собственной энергии, усиливает эту активность. Таким образом, электрон переходит в состояние с более низкой энергией, **виртуальный фотон** становится реальным фотоном, и да будет Свет.

## ***Стоячая волна и бегущая волна***

### ***Standing wave/traveling wave***

Колебания волн в ограниченных областях пространства называют *стоячими волнами*. Таким образом, колебания струн музыкальных инструментов – или их резонансных дек – являются стоячими волнами. Стоячие волны часто называют вибрациями или колебаниями.

Волны, которые не ограничены конечной областью пространства, а перемещаются в нем, называют *бегущими волнами*. В повседневном языке, а также и в физике, когда мы говорим о «звуковых волнах», мы обычно подразумеваем бегущие волны. Колебания резонансной деки рояля, которые являются стоячими волнами, толкают воздух рядом с ней взад и вперед. Движущийся воздух оказывает воздействие на воздух рядом с ним, который воздействует на воздух чуть дальше, и т. д., вызывая возмущение в воздухе, которое начинает жить собственной жизнью. Это бегущая звуковая волна, которую мы можем обнаружить, т. е. услышать, на больших расстояниях.

**Волновая функция**, связанная с электроном, может быть как стоячей волной, так и бегущей волной.

Волновую функцию электрона, связанного с протоном и образующего вместе с ним нейтральный атом водорода, считают стоячей волной даже при том, что, строго говоря, она распространяется по всему пространству. Дело в том, что плотность облака вероятности нахождения электрона, которая отражает величину волновой функции, уменьшается очень быстро, когда мы удаляемся от протона, и никогда не бывает значительной за пределами маленькой фиксированной области около протона. Именно это мы имеем в виду, когда говорим, что электрон связан с протоном. Фактически волновая функция локализована в ограниченной области пространства, и ее следует считать стоячей волной.

Волновая функция несвязанного электрона, который свободно перемещается в пространстве, является бегущей волной.

См. также **Уравнение Шрёдингера**.

## ***Строгость***

## ***Rigor***

---

Мы говорим, что утверждение *строгое* или обладает *строгостью*, когда оно одновременно точно сформулировано и его трудно оспорить. Мы называем некое понятие строгим, если его смысл точно сформулирован и, таким образом, оно подходит для использования в строгих утверждениях.

Сама «строгость» не является строгим понятием, потому что выражение «трудно оспорить» несколько туманно. (Насколько трудно?) Например, существует огромный массив данных, основанный на решениях уравнений **квантовой хромодинамики (КХД)** с использованием компьютеров, что эта теория воспроизводит явление **конфайнмента кварков** и правильно предсказывает **спектр адронов**. (Другими словами: вычисления правильно предсказывают существование ряда сильно взаимодействующих частиц, их массы и другие свойства; впрочем, кварков среди них нет.) Однако математики обычно не расценивают этот вывод как строгий.

### *Струя частиц*

### *Jet of particles*

После соударений в современных ускорителях высоких энергий, включая, в частности, **Большой адронный коллайдер**, часто наблюдаются потоки энергичных **адронов**, движущихся почти в одном и том же направлении. Такие потоки называют струями.

Для струй существует замечательная интерпретация, основанная на **квантовой хромодинамике (КХД)** и **асимптотической свободе** и состоящая в следующем. Мы можем описать начальный момент нашего соударения, в котором участвует **сильное взаимодействие**, непосредственно в терминах **кварков**, антикварков и **глюонов**. Но по мере того, как эти частицы рождаются из начального раскаленного шара, они приходят в равновесие с вездесущей самопроизвольной активностью **квантовых флюидов КХД** – их квантовыми флуктуациями, или **виртуальными частицами** – и в процессе этого производят потоки адронов. Поскольку **энергия** и **импульс сохраняются**, эти потоки наследуют их от кварков, антикварков и глюонов, которые их породили. Таким образом, скажем, кварк с высокой энергией породит поток адронов,

движущихся как целое в направлении импульса кварка и делящих между собой его энергию, – т. е. он породит *струи*! Не будет большим преувеличением сказать, что, когда наблюдаем струи, мы краешком глаза можем взглянуть на реальность существования кварков, антикварков и глюонов, которые не могут существовать как свободные частицы. См. **Конфайнмент**.

### *Суперсимметрия*

### *Supersymmetry*

*Суперсимметрия* – это особый вид **симметрии**. Преобразования суперсимметрии включают в себя пространственную *трансляцию* (или сдвиг) в **квантовом измерении**. Когда **частица взаимодействия (бозон)** перемещается в квантовом измерении, она становится **частицей вещества (фермионом)**, и наоборот.

Если мы сможем привыкнуть к мысли, что сила и вещество являются одной и той же сущностью, наблюдаемой с разных ракурсов, мы достигнем нового уровня единства и согласованности в нашем фундаментальном понимании Природы. В настоящее время, однако, свидетельства наличия суперсимметрии, хотя и впечатляющие, являются косвенными.

### *Темная энергия, темная материя*

### *Dark energy/dark matter*

**Главная теория** дает нам подробное, глубинное понимание практически всего вещества, которое мы можем найти на Земле и поблизости от нее. Это «нормальное» или «обычное» вещество состоит из *u*- и *d*-**кварков**, цветных **глюонов**, **фотонов** и **электронов**, а также относительно неплотного потока **нейтрино**. Однако астрономические наблюдения показывают, что Вселенная в целом содержит другие виды вещества, которые составляют большую часть ее общей массы. Природа этого дополнительного вещества в настоящее время точно не известна, но мы можем систематизировать известные факты в простом и показательном виде.

- **Обычное вещество** дает примерно 5 % от общей массы Вселенной. Оно очень неравномерно распределено в виде галактик (которые затем разделяются на газовые облака, звезды и планеты), а между ними имеются большие области, практически лишенные обычного вещества.

- *Темная материя*, известная также как скрытая масса, составляет около 27 % общей массы Вселенной. Она тоже распределена неравномерно, но не настолько, как обычное вещество. Астрономы обычно говорят, что галактики окружены более диффузными гало из темной материи, но с учетом соотношения их масс было бы более правомерно сказать, что галактики – это концентрированные вкрапления в облаках темной материи. Темная материя очень слабо взаимодействует с обычным веществом, включая и свет. Следовательно, она не темная в общепринятом смысле, а скорее прозрачная.

- *Темная энергия* составляет около 68 % общей массы Вселенной. Она распределена равномерно, как если бы была глобальной плотностью массы, связанной с самим пространством. Есть свидетельства того, что эта плотность была постоянна во времени, на протяжении миллиардов лет. Как и темная материя, темная энергия очень слабо взаимодействует с обычным веществом, и она скорее прозрачная, чем темная.

Выводы о существовании темной материи и темной энергии и об их распределении в пространстве сделаны в результате наблюдений за обычным веществом. Мы обнаруживаем, что во многих ситуациях в астрофизике и в космологии мы можем объяснить движение обычного вещества, используя известные законы физики (Главную теорию) только в том случае, если предположим существование дополнительных источников массы помимо обычного вещества. Другими словами, движение обычного вещества под действием его собственной гравитации по нашим расчетам не согласуется с его наблюдаемым движением.

Это расхождение в принципе может быть следствием несостоятельности общей теории относительности, но, несмотря на многие попытки, не удалось создать никакой другой привлекательной теории (даже если допустить здесь очень низкую планку «привлекательности»).

В попытках улучшить Главную теорию довольно независимо друг от друга были выдвинуты предположения о существовании новых форм материи, которые могли бы подойти на роль темной материи. Для этого годятся и **аксионы**, и новые частицы, предложенные теориями **суперсимметрии**: они достаточно стабильны и слабо взаимодействуют с обычным веществом. Более того, согласно расчетам, они могли бы быть

рождены во время Большого взрыва примерно в нужном количестве, а также могли бы распределиться как раз так, как мы это наблюдаем. Эти возможности в данный момент являются предметом очень активных экспериментальных исследований.

Темная энергия имеет свойства, которых можно ожидать от «космологического члена» Эйнштейна, а также от плотностей энергии, связанных с **полем Хиггса**, спонтанной активностью **квантовых полей** и еще несколькими более или менее правдоподобными источниками. Возможно, что независимый вклад в темную энергию дают сразу несколько таких эффектов, причем какие-то могут вносить положительный, а какие-то отрицательный вклад в общую сумму. В отличие от ситуации с темной материей, существующие теоретические идеи о темной энергии расплывчаты, и их сложно **фальсифицировать**.

Здесь стоит заметить, что современная проблема темной материи и темной энергии имеет два выдающихся исторических прецедента. Трудоемкие работы в области **небесной механики**, основанной на теории **гравитации** Ньютона, к середине XIX в. выявили два небольших расхождения между расчетами и наблюдениями. Одно касалось движения Урана, другое – Меркурия. Проблема Урана была разрешена с помощью своего рода «темной материи». Урбен Леверрье и Джон Коуч Адамс предположили, что его избыточное ускорение вызвано гравитационной силой, исходящей от новой, до сих пор неизвестной планеты, чье положение они могли рассчитать. Необходимая планета – Нептун – была действительно обнаружена в нужном месте! Трудность с Меркурием разрешилась, когда **общая теория относительности** Эйнштейна заменила теорию гравитации Ньютона. Новая теория, предложенная совершенно по другим и более глубоким причинам, дала немного отличные предсказания для **орбиты** Меркурия, и ее предсказания согласуются с наблюдениями.

Доводы с **антропным** привкусом применялись как к проблеме темной энергии, так и к проблеме темной материи, причем аргументация строилась похожим образом в обоих случаях:

- Часть Вселенной, которую мы можем сейчас наблюдать, – всего лишь малая доля большей структуры, которую иногда называют *мультивселенной*. (Заметим, что с течением времени область, доступная для наблюдения, расширяется из-за конечной скорости света.)

- Физические условия в других, удаленных, частях мультивселенной могут различаться. В частности, плотность темной энергии, или темной материи, может быть другой.

- В областях, где плотность темной энергии или темной материи, резко отличается от того, что мы наблюдаем в нашей Вселенной, не может появиться разумная жизнь.

- Поэтому могут наблюдаться лишь такие значения этих плотностей, которые близки к наблюдаемым нами.

Второй и третий шаг этих рассуждений в настоящее время являются спорными, поэтому эти идеи остаются умозрительными. Но, поскольку наши знания о фундаментальных законах и наши способности постичь их следствия совершенствуются, с логической точки зрения возможно, что такие идеи станут общепринятыми. Если это случится, мне кажется, что эта цепочка рассуждений окажется убедительной. Это будет означать удивительное открытие: главные черты наблюдаемого нами мира – а именно плотности темной энергии и/или темной материи – определяются не абстрактными принципами **динамики** или **симметрии**, но *отбором*, вроде отбора в биологии.

### *Теорема (закон Гаусса)*

### *Gauss's law*

На самом деле существует две [\[115\]](#) теоремы Гаусса с очень похожими формулировками.

Согласно теореме Гаусса для **электрического поля**, **поток** электрического поля через любую замкнутую поверхность равен количеству **электрического заряда**, заключенного внутри этой поверхности.

Согласно теореме Гаусса для **магнитного** поля, поток магнитного поля через любую замкнутую поверхность равен нулю. Иначе говоря, этот поток равен количеству магнитного заряда, заключенного внутри этой поверхности, а такого заряда в Природе не обнаруживается.

Эти теоремы Гаусса увековечены в двух **уравнениях Максвелла**.

### *Теорема Пифагора*

### *Pythagorean theorem*

*Теорема Пифагора* была опережающим свое время поразительным открытием в геометрии. Теорема Пифагора гласит, что квадраты длин двух более коротких сторон прямоугольного треугольника составляют квадрат длины самой длинной стороны (гипотенузы). Она обсуждается подробно, с чертежами, в основном тексте.

### *Теория Янга – Миллса*

### *Yang-Mills theory*

В 1954 г. Чжэньнин Янг и Роберт Миллс открыли, как создать новый большой класс теорий, в которых **глобальная симметрия пространства свойств** обобщена до **локальной симметрии**. В их честь теории такого вида часто называют теориями Янга – Миллса. Наши **Главные теории сильных и слабых взаимодействий** включают в себя подобную конструкцию.

Переходя от **специальной теории относительности** к **общей теории относительности** в 1915 г., Эйнштейн обобщил **галилееву симметрию** от глобальной до локальной. Грубо говоря, Янг и Миллс научили нас, как сделать этот вид обобщения, от глобальной симметрии до локальной, для широкого класса возможных **групп симметрии**, применимых для частиц.

В основном тексте мы сравниваем переход от глобальной симметрии к локальной с переходом от обычной геометрической перспективы, которой занимается **проективная геометрия**, к более гибким возможностям анаморфного изображения.

### *Ток*

### *Current*

Электрический ток – мера движения **электрического заряда** из одного места в другое<sup>[116]</sup>. Самый простой, идеализированный случай электрического *тока* связан с движением одного **электрона**. В этом случае электрический ток равен электрическому заряду электрона, умноженному

на его **скорость**, в мгновенном положении электрона и нулю в остальных точках пространства. Если скорость электрона остается постоянной, ток постоянен по величине, но его местоположение движется вместе с электроном.

В ситуации, когда у нас есть много электронов вместе с другими электрически заряженными частицами, полный электрический ток равен сумме всех электрических токов, вызванных каждой из этих частиц по отдельности (и во всех случаях это заряд, умноженный на скорость). Величина этого фундаментального «микроскопического» тока<sup>[117]</sup> определена в каждой точке пространства и в любой момент времени. Другими словами, электрический ток – это **векторное поле**.

Величина микроскопического электрического тока, определенная таким образом, строго равна нулю, если движущихся электрически заряженных частиц нет, и беспорядочно меняется в пространстве и времени. Обычно бывает удобно для практического применения усреднять величины по областям пространства, которые содержат множество электронов. Таким способом мы определяем усредненный электрический ток, который гладко меняется в пространстве и времени. Обычно при обсуждении электрических токов в электрических цепях или в электроприборах такое усреднение считается само собой разумеющимся.

Сходным образом мы можем говорить о токах, связанных с перемещением других видов зарядов, таких как два вида слабых **цветовых зарядов слабого взаимодействия** или трех сильных **цветовых зарядов сильного взаимодействия**. Также имеются (если заменить в определении «заряд» на «массу») *массовые токи*, связанные с перемещением массы, *потоки энергии*, связанные с перемещением энергии, и т. д. В общеупотребительном языке мы можем использовать слово «ток»<sup>[118]</sup> для описания потоков воды и при этом имеем в виду массовый ток.

***Тон, чистый тон***

***Tone/pure tone***

Выражение «чистый тон» в этой книге означает простое волновое возмущение, которое является периодическим как в пространстве,

так и во времени. (Здесь слово «простое» имеет определенное техническое значение: форма волны является синусоидальной, но здесь я не буду останавливаться на этом подробно. В примечаниях в конце книги имеются две легкодоступные ссылки.)

Самые важные примеры чистых тонов для нас касаются звуковых волн и **электромагнитных волн** (включая главным образом свет). В звуковых волнах изменению подвергаются давление и плотность воздуха; в электромагнитных волнах – электрические и магнитные поля.

Глубокое и приятное озарение, которое приходит в результате научного исследования Природы, состоит в том, что *чистые тона*, определенные вышеприведенным математическим/физическим способом, соответствуют простым чувственным восприятиям. Чистые звуковые тона легко создать с помощью электроники, и они могут быть знакомы вам по проверкам слуха или благодаря примитивным устройствам электронной музыки (какие, например, иногда встраивают в поздравительные открытки) или по камертонам. Чистые визуальные тона – это спектрально чистые цвета, которые появляются в радуге или в солнечном свете, преломленном призмой, как в экспериментах Ньютона. Эти два взаимодополняющих взгляда на чистые тона – с точки зрения восприятия и с точки зрения научных концепций – красиво иллюстрируют столь желаемое нами соответствие

### ***Реальное ↔ Идеальное.***

*Тона*, которые издают более традиционные музыкальные инструменты, когда вы извлекаете единственную «ноту», далеки от чистых. Подробное описание изменяется от инструмента к инструменту, но во всех случаях нота содержит много чистых тонов, звучащих одновременно с различной силой. Самым мощным из них является чистый тон, который дает имя этой ноте, но качество музыкального звука, тембр, который отличает различные инструменты друг от друга, в значительной степени определяется дополнительными тонами, так называемыми *обертонами*.

Эта тема обсуждается более подробно в основном тексте. Также к этой теме имеет отношение словарная статья о **Спектрах**.

### ***Трансляционная (сдвиговая) симметрия времени***

### *Time translation symmetry*

Трансляция или смещение во времени – преобразование, которое сдвигает времена событий на один и тот же временной интервал. *Трансляционная симметрия времени* – это гипотеза о том, что законы физики неизменны, или, как мы говорим, *инвариантны*, при таком преобразовании. Трансляционная симметрия времени – **строгий** способ сформулировать идею о том, что законы физики одинаковы на протяжении всей истории. Трансляционная симметрия времени тесно связана с **сохранением энергии** через теорему Эмми Нётер.

### *Трансляционная (сдвиговая) симметрия пространства*

### *Spatial translation symmetry*

Пространственная трансляция (или параллельный перенос, или сдвиг) – преобразование, которое изменяет положение точек в пространстве на одинаковое смещение. *Трансляционная симметрия пространства* – это гипотеза о том, что законы физики неизменны или, как мы говорим, *инвариантны*, при таком преобразовании. Трансляционная симметрия пространства – **строгий** способ сформулировать идею о том, что законы физики одинаковы повсюду. Трансляционная симметрия пространства тесно связана с **сохранением импульса** через теорему Эмми Нётер.

### *Трансляция (сдвиг)*

### *Translation*

Смещение всех точек системы на одну и ту же величину в пространстве или во времени. См. **Трансляционная (сдвиговая) симметрия пространства** и **Трансляционная (сдвиговая) симметрия времени**.

### *Угол Кабиббо*

См. Семейство.

*Уравнение Дирака*

*Dirac equation*

В 1928 г. Поль Дирак (1902–1984) предложил **динамическое уравнение**, описывающее поведение **электронов** в **квантовой механике**, которое мы теперь называем *уравнением Дирака*. Уравнение Дирака уточняет более раннее уравнение **Шрёдингера** для электрона примерно так же, как уравнения Эйнштейна для механики уточняют уравнения Ньютона. В обоих случаях новые уравнения согласуются со **специальной теорией относительности**, в то время как те более простые, которые они заменили, с ней не согласуются. (И в обоих случаях новые уравнения повторяют предсказания старых при описании поведения тел, движущихся со скоростями, много меньшими скорости света.)

Уравнение Дирака имеет дополнительные решения, кроме тех, что представляют электроны в разных состояниях движения (и спина). Эти решения описывают частицы с такой же массой, как у электронов, но с противоположным электрическим зарядом. Эти новые частицы называются **антиэлектронами**, или **позитронами**. Позитроны были экспериментально открыты в 1932 г. Карлом Андерсоном благодаря изучению **космических лучей**. См. также **Антивещество**.

Уравнение Дирака, с соответствующими (относительно незначительными) изменениями, описывает не только поведение электронов, но также и поведение других фундаментальных частиц со **спином  $\frac{1}{2}$** , включая все **кварки** и **лептоны**, – другими словами, **частиц вещества**, как они именуется в основном тексте. С немного более значительными изменениями оно также описывает поведение **адронов** со спином  $\frac{1}{2}$ , включая **протоны** и **нейтроны**.

*Уравнение Шрёдингера*

*Schrödinger equation*

Уравнение Шрёдингера было предложено Эрвином Шрёдингером (1887–1961) в 1925 г. Это **динамическое уравнение**, которое определяет, как **волновые функции электронов** или других частиц изменяются во времени.

Уравнение Шрёдингера является приблизительным в двух важных отношениях. Во-первых, оно основано на нерелятивистской (ньютоновской) механике, а не на релятивистской механике Эйнштейна. Поль Дирак в 1928 г. предложил другое уравнение для волновых функций электронов, которое подчиняется положениям **специальной теории относительности** (см. **Уравнение Дирака**). Во-вторых, оно не включает влияние **квантовых флуктуаций**, таких как **виртуальные фотоны**, на электроны. Тем не менее уравнение Шрёдингера достаточно точно для большинства практических применений квантовой теории в химии, материаловедении и биологии, и это именно та версия квантовой теории, которая обычно применяется при обсуждении этих дисциплин.

Хотя обычно говорят об «уравнении Шрёдингера», но Шрёдингер предоставил нам не просто одно уравнение, а скорее процедуру для вывода уравнений, описывающих различные ситуации, в которых применима квантовая механика.

Одно из самых простых уравнений Шрёдингера – уравнение для единственного электрона, который испытывает **электрическое притяжение единственного протона**. Это дает нам описание атома водорода. Хотя оно сформулировано в ином пространстве идей – в мире, где заполняющие пространство волновые функции заменяют собой частицы,двигающиеся по орбитам, – результаты, которые вытекают из уравнения Шрёдингера в этом случае, в значительной степени подтверждают интуитивную концепцию Бора о значении спектра водорода. Обзор этого вопроса см. в статье **Спектры**.

Мы можем также сформулировать уравнения Шрёдингера, которые описывают поведение нескольких электронов одновременно. Разумеется, мы должны сделать это, если хотим учесть влияние электронов друг на друга. Как объясняется в словарной статье о **волновой функции**, волновые функции, которые полностью описывают физическое состояние нескольких электронов, определены в пространствах очень высокой **размерности**. Волновая функция для двух электронов «обитает» в шестимерном пространстве, волновая функция для трех электронов – в девятимерном пространстве и т. д. Уравнения для этих волновых функций быстро становятся довольно трудными для решения, даже приблизительного и даже с использованием самых мощных компьютеров.

Вот почему химия остается процветающим экспериментальным полем деятельности, несмотря на то, что в принципе мы знаем уравнения, которые ей управляют и которые должны позволять нам вычислять результаты химических экспериментов без необходимости выполнять их.

### *Уравнения Максвелла*

### *Maxwell's equations*

*Уравнения Максвелла* – система из четырех уравнений, которые выражают зависимости между **электрическими полями, магнитными полями** и распределениями **электрического заряда и электрического тока** в пространстве. Они всесторонне обсуждаются в тексте и примечаниях.

См. также статьи **Закон Ампера (Закон Ампера – Максвелла), Закон Фарадея** и **Закон Гаусса**, где четыре уравнения Максвелла объясняются по отдельности.

### *Ускорение*

### *Acceleration*

Скорость – это быстрота изменения местоположения со временем (см. **Скорость**), а *ускорение* – это быстрота изменения скорости со временем. Одним из великих достижений Ньютона было то, что он показал: ускорение тел связано с действующими на них силами. (Он провозгласил это открытие прежде полного описания с помощью памятной анаграммы, как описано в главе «Ньютон III».) В старых учебниках по классической механике встречается второй закон движения Ньютона в такой формулировке: «**Сила равна массе, умноженной на ускорение**». При отсутствии какой-либо отдельной информации о силах это, конечно, бессмысленное утверждение. На самом деле его нужно интерпретировать как обещание о том, что изучение ускорения не будет напрасным!

Ньютон сделал несколько общих утверждений о силах. Примечателен его первый закон движения, который гласит, что «свободные» тела имеют

нулевое ускорение, т. е. что скорость свободного тела постоянна. В этом законе подразумевается, что тела, удаленные от всех других тел, можно приближенно считать свободными или, другими словами, что силы убывают с расстоянием.

Ньютон также разработал подробную теорию одного вида сил, а именно – **гравитационной** силы. В этом контексте интересно заметить, что сила притяжения, действующая на тело, пропорциональна его массе, так что гравитационное ускорение *не зависит* от массы этого тела. Этот закон был проверен для случая земного притяжения в знаменитом опыте Галилея, в котором он сбрасывал предметы с наклонной («падающей») Пизанской башни.

В теории гравитации Эйнштейна, известной как **общая теория относительности**, закон движения выражается напрямую через ускорение, без дополнительного упоминания сил.

Ускорение, как и скорость, – это **векторная** величина.

*Ускоритель*

*Accelerator*

Ускоритель заряженных частиц – это установка для получения пучков быстро движущихся частиц с высокой энергией. В истории, да и в наши дни ускорители использовались для открытия фундаментальных процессов в природе. Изучая столкновения самых быстрых частиц, мы можем получить представление об их поведении при предельно высоких энергиях, малых расстояниях и коротких временах, которое невозможно добыть другими способами.

*Фальсифицируемая теория, сильная теория*

*Falsifiable theory/powerful theory*

Когда утверждение (или теорию) можно сравнить с эмпирическими наблюдениями и тем самым потенциально опровергнуть, мы говорим, что оно *фальсифицируемо*. Сэр Карл Поппер (1902–1994) выступал за то, чтобы фальсифицируемость служила критерием для того, чтобы отличать

науку от другой деятельности человека. Хотя это и воодушевляет, я не думаю, что критерий фальсифицируемости Поппера адекватно отражает научную практику, так как зачастую мы больше заботимся о том, чтобы подтвердить хорошие идеи, а не отбросить плохие.

Фальсифицируемость больше подходит в качестве (частичного) критерия *зрелости* и *плодовитости* теорий, чем их принадлежности к науке или ненауке. В этом контексте *фальсифицируемость* должна рассматриваться вместе с *силой*. Теории, которые дают много успешных предсказаний, но также иногда терпят неудачи (например, практическая метеорология) или чьи предсказания в некоторых случаях по своей природе являются статистическими и, следовательно, не так просто фальсифицируемы (например, **квантовая теория**), могут тем не менее быть очень ценными и должны считаться научными согласно любому разумному определению этого термина.

Нельзя считать *сильную*, но несовершенную теорию просто ошибочной; скорее следует – пока не доказано обратное – считать ее многообещающей основой для усовершенствования. Ньютонская (нерелятивистская) механика, классическая (не квантовая) теория **электромагнетизма** и другие, менее значительные теории были фальсифицированы, и все же мы их чтим, и у нас есть на это хорошие причины:

- Они остаются полезными благодаря их предсказательной силе и относительной простоте.
- Теории, которые пришли им на смену, во многом полагаются на их понятийный аппарат.
- В рамках более новых теорий прежние продолжают существовать в качестве приближений, верных в предельных случаях.

См. также **Непротиворечивость и противоречие, Экономность (идей)**.

**Фермион**

См. **Бозоны и фермионы**.

**Флюид**

См. Поле и флюид.

## **Фотон и соотношение Планка – Эйнштейна**

### **Photon/Planck – Einstein relation**

**Фотон** – это минимально возможное возмущение **электромагнитного флюида**.

В классической физике в соответствии с **уравнениями Максвелла энергия электромагнитной волны** может быть сколь угодно малой. В **квантовой теории** дело обстоит иначе. Энергия существует только в виде дискретных единиц, или **квантов**. Поскольку эти единицы не могут быть разбиты на более мелкие, они обладают некоторой целостностью, которую мы обычно связываем с частицами, и в некоторых обстоятельствах бывает полезно думать о них именно так. В этом смысле фотоны – частицы света.

(Квантово-механическое описание фотонов не соответствует в точности ни классической идее волны, ни классической идее частицы. Нет причин, по которым эти идеи, почерпнутые из повседневного опыта с большими телами, были бы полноценным описанием того, что происходит в незнакомом царстве очень малых тел, и они таковым и не являются. Любой из двух подходов может быть полезным, но ни один из них в отдельности не отражает надлежащим образом действительность. См. **Дополнительность**.)

Для чистых спектральных цветов существует простая количественная связь между единицей энергии – т. е. энергией одного фотона – и **частотой**, связанной с **электромагнитными волнами** этого цвета. Она была предложена теоретически Планком и Эйнштейном в самом начале XX в. и названа *соотношением Планка – Эйнштейна*. Соотношение Планка – Эйнштейна сохранилось с тех пор без существенных изменений. Оно также имеет важное применение, которое является центральным в нашей медитации и помогает нам ответить на наш Вопрос.

Вот оно: энергия фотона равна частоте света, представителем которого он является, помноженной на **константу Планка**.

А вот как мы используем его: когда атом испускает или поглощает фотон, он совершает переход между двумя стационарными состояниями. Поскольку в этом процессе энергия сохраняется, энергия фотона

соответствует разнице энергий этих двух устойчивых состояний. Таким образом, в спектре атома закодированы энергии его возможных состояний.

Подробнее об этом замечательном соотношении см. **Спектры**.

## Фракталы

## *Fractals*

Фракталы – это геометрические объекты, имеющие структуру на всех масштабах. Если вы увеличиваете сложное изображение фрактала, чтобы лучше рассмотреть его детали, вы обнаруживаете, что каждая деталь настолько же сложна, как исходное целое изображение, – более того, во многих фракталах увеличенная часть *идентична* целому изображению!

Существует множество разнообразных фракталов. Нет такого единственного строгого определения, которое было бы применимо ко всем объектам, которые люди называют «фракталами». Вместо этого есть огромное количество интересных примеров, воплощающих эту широкую концепцию неисчерпаемой внутренней структуры.

Поскольку небольшие части фрактала настолько же сложны, как и целый фрактал, метод **Анализа и Синтеза** и его классическая математическая реализация, дифференциальное и интегральное **исчисление**, теряет большую часть своих возможностей. В игру вступают другие идеи, основанные на рекурсии и самоподобии. (Я остановлюсь здесь: хотя эти идеи завораживающи, они довольно слабо связаны с нашими основными темами.)

Очень сложные фракталы можно создать, следуя простым правилам много шагов подряд – такой метод прекрасно подходит для компьютерной графики. Это привело к получению потрясающих изображений и появлению новых форм изобразительного искусства.

## Фуллерен (бакибол)

## *Buckminsterfullerene*<sup>[119]</sup>

Фуллерены – это класс молекул чистого углерода.

Они принимают форму квазисферических многогранников, в которых каждое из **ядер** углерода имеет химические связи с тремя ближайшими соседними ядрами. В число граней всегда входят 12 пятиугольников плюс переменное (обычно большее) число шестиугольников. Особенно распространен фуллерен C<sub>60</sub>, содержащий 60 ядер углерода. Молекулы C<sub>60</sub> часто называют бакиболами, отмечая их необъяснимое сходство с (микроскопическими) футбольными мячами.

См. также **Многоугольник**.

### **Функция**

### ***Function***

Когда какая-то величина меняется со временем, мы говорим, что это *функция* времени. Более общо, мы говорим, что величина  $y$  является *функцией* некоторой другой величины  $x$ , если каждое значение  $x$  определяет некоторое значение  $y$ . Мы пишем  $y(x)$  для величины  $y$ , определяемой величиной  $x$ .

Примеры:

- Температура в Бостоне является функцией времени.
- Температура на поверхности Земли, вообще говоря, является функцией положения на поверхности  $u$  времени. Другими словами, это функция пространства-времени.

См. также **Поле**.

### ***Цвет света, спектральный цвет***

### ***Color of light/spectral color***

Размышляя о свете, важно различать физический цвет и воспринимаемый цвет.

*Спектральный цвет* – это физическое понятие, не зависящее от человеческого восприятия. В принципе его можно определить и исследовать, используя только физические приспособления: линзы, призмы, фотопластинки и т. д. Мы можем создать свет любого чистого спектрального цвета, пропустив пучок белого света через призму и выбрав

небольшую часть получившейся «радуги», как это описано в основном тексте. Сейчас мы понимаем, что чистые спектральные цвета соответствуют **электромагнитным волнам**, которые **колеблются** с определенной **частотой**. Различные чистые спектральные цвета строго соответствуют различным частотам. Согласно (хорошо проверенной) теории Максвелла, можно получить электромагнитную волну с какой угодно частотой, так что чистые спектральные цвета образуют непрерывный спектр. Человеческий глаз чувствителен только к электромагнитным волнам в узком диапазоне частот; но часто бывает естественно говорить о «свете» в более общем значении, включая в это понятие электромагнитные волны в виде радиоволн, микроволнового, инфракрасного, ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучения. Полный диапазон возможных частот образует **электромагнитный спектр**.

Спектральные цвета похожи на **чистые тона** в музыке. Действительно, чистые тона тоже являются колебаниями – звуковыми волнами – с определенными частотами. Развивая эту аналогию, можно сказать, что белый свет соответствует какофонии **тонов**, что способствовало появлению термина «белый шум».

Концепция *воспринимаемого* цвета включает в себя смесь физики и психологии. Наши самые богатые цветовые впечатления, например, те, что мы получаем от изобразительного искусства, необычайно сложны и задействуют высокоуровневые процессы мозга, которые мы плохо понимаем. Тем не менее некоторые основные факты о ранних стадиях зрительного восприятия твердо установлены, и они уже подчеркивают огромный разрыв между анализом света, который возможен согласно основным физическим принципам, и тем анализом, который обеспечивает наше восприятие цвета. Самое главное отличие в следующем: в то время как чистые спектральные цвета образуют континуум, а полный анализ входящего света дает интенсивности каждого из них, человеческий глаз извлекает только три средних значения от этих интенсивностей.

Для куда более подробного изложения этих тем, которые являются центральными в нашей медитации, смотрите основной текст!

***Цветовой заряд, сильный цветовой заряд, слабый цветовой заряд***

***Color charge/strong color charge/weak color charge***

Наши Главные теории слабого и сильного взаимодействий строятся на идеях, впервые развитых в **электродинамике**. В частности, в них встречаются аналоги электрического заряда, называемые *цветовыми зарядами*. Заряды во всех случаях являются сохраняющимися величинами, которые управляют поведением фотоподобных частиц – **фотонов** в случае **электрического заряда**, цветных **глюонов** в случае **сильных цветовых зарядов**, **виконов** в случае **слабых цветовых зарядов**.

Существует три сильных цветовых заряда – в нашей книге они называются красным, зеленым и синим. Восемь цветных глюонов реагируют на эти заряды и вызывают их преобразования.

Существует также два слабых цветовых заряда – в тексте они называются желтым и фиолетовым.

Не стоит и говорить (но однако скажу), что понятие «цвет», используемое в контексте цветового заряда, полностью отличается от понятия «цвет» в контексте света.

### *Циркуляция*

### *Circulation*

**Векторные поля** независимо от их истинной природы могут с математической точки зрения рассматриваться как поток обычной текучей среды, такой как воздух или вода. (Воображаемый поток в каждой точке имеет скорость, пропорциональную величине векторного поля в этой точке.) В такой модели *циркуляция* векторного поля в некоторой точке – это мера углового движения жидкости (газа). Так, например, циркуляция атмосферы особенно велика вблизи контуров, окружающих центр торнадо.

Давайте определим это понятие более точно. Представим, что наш контур есть осевая линия воображаемой узкой цилиндрической трубки, и посчитаем количество воздуха, которое перемещается по этой трубке за единицу времени, отнеся его к площади сечения трубки. (Потоком воздуха снаружи внутрь трубки или из нее наружу мы просто пренебрегаем.) Тогда мы получим циркуляцию потока по замкнутому контуру [\[120\]](#).

Используя аналогию потока – т. е. рассматривая электрическое поле как поле скоростей, мы можем похожим образом определить циркуляцию **электрического поля** или **магнитного поля** по замкнутому контуру.

Эти величины являются главными участниками **уравнений Максвелла**. См. **закон Ампера (закон Ампера – Максвелла)** и **закон Фарадея**.

Здесь я хотел бы добавить личную коду, сочетающую в себе поклонение героям и эстетику. Новаторские статьи Фарадея и Максвелла, где впервые появилось представление об электромагнетизме как о поле, по большей части написаны с точки зрения словесных определений и ментальных образов, подобно тому, как я сделал это здесь для *циркуляции* и ниже – для **потока**, а не в виде общепринятых математических уравнений. Четко держать в голове такие сложные картины и проводить между ними связи было удивительным подвигом зрительного воображения, который показался мне достаточно вдохновляющим и прекрасным, чтобы его повторить. Представление уравнений в виде образов переносит их в ту область опыта, для наслаждения которой люди хорошо подготовлены.

*Цифровой*

*Digital*

Если величина не может изменяться плавно, мы называем ее *цифровой* величиной. Чтобы узнать больше об этом понятии, см. статью про **аналоговые** величины.

*Частица вещества*

*Substance particle*

Это еще одно название для всех фермионов. В **Главной теории** это **кварки** и **лептоны**.

Если **суперсимметрия** верна, то для каждой частицы вещества существует соответствующий «партнер» – **частица взаимодействия**. Частица вещества, перемещаясь в **квантовом измерении**, становится своей сопряженной частицей взаимодействия.

*Частица взаимодействия*

## *Force particle*

«Частица взаимодействия» – это разговорная фраза, которую я использую, когда говорю, собирательно, о фундаментальных частицах **Главной теории**, которые являются **бозонами**: о **фотоне**, о **виконе**, о цветном **глюоне**, о **гравитоне** и о **частице Хиггса**. Это сделано для облегчения жизни читателя, а также для того, чтобы передать некоторую общую идею о роли этих частиц в Природе<sup>[121]</sup>.

## *Частица Хиггса, бозон Хиггса*

## *Higgs particle/Higgs boson*

Эти термины взаимозаменяемы и используются для обозначения наименьшей единицы, или **кванта**, **флюида Хиггса**.

См. **Поле Хиггса**, **флюид Хиггса**, а также подробное обсуждение в главе «Квантовая красота III», часть 3.

## *Частота*

## *Frequency*

Если у нас есть процесс, который повторяется во времени, его **период** – это время между повторениями, а его **частота** – это единица, деленная на период, или, что то же самое, величина, обратная периоду. Таким образом, высокочастотный процесс – это процесс, который часто повторяется. Частоты измеряются в обратных секундах – единицах, также называемых герцами в честь Генриха Герца, первооткрывателя **электромагнитного излучения**.

Примеры: если процесс повторяется каждые 2 секунды, его частота равна 0,5 герца. Если процесс повторяется дважды в секунду – то его частота равна 2 герцам. Молодые здоровые люди способны слышать колебания воздуха, или звуковые волны, если частоты этих колебаний лежат в интервале примерно от 20 до 20000 герц. Человеческий глаз чувствителен к **электромагнитным волнам** с частотами от  $4 \times 10^{14}$  до  $8 \times$

1014 герц – это довольно высокая скорость колебаний!

***Четность, преобразование четности, нарушение четности  
и спиральность***

***Parity/parity transformation/parity violation/handedness***

В нескольких разделах математики и при формулировке некоторых физических законов находят удобным использовать правую руку (или, гораздо реже, левую).

В большинстве случаев эти «правила правой руки» являются просто результатом соглашений. Соответствующее правило левой руки также можно было бы использовать, и это просто привело бы к переименованию вещей. Возьмите, например, способ, с помощью которого мы присваиваем определенное направление в пространстве вращению вокруг оси. Если объект вращается вокруг оси, мы можем присвоить оси направление, используя правило правой руки, как описано далее. Вообразите наш вращающийся объект как фигуристку на льду. Ось, вокруг которой она вращается, является прямой линией от ее головы до больших пальцев ног. Эта линия имеет некоторую ориентацию в пространстве и, таким образом, почти определяет направление, но, чтобы завершить его, нам нужен еще один шаг: мы должны выбрать между направлением «вверх» и «вниз». Обычное правило правой руки, призванное разрешить эту неоднозначность, говорит, что, если при вращении ее правая рука движется вперед, по направлению к животу, мы выбираем направление «вверх» – т. е. направление от ног к голове, в то время как, если вращение сопровождается движением ее правой руки назад, к спине, мы выбираем направление «вниз». Ясно, что, если бы мы поменяли правое с левым и, одновременно, в правиле, поменяли верх и низ, результирующее «правило левой руки» было бы полностью равнозначным.

Вот еще два примера использования этого правила:

- Движение стрелок часов выражается в их вращении относительно оси, перпендикулярной циферблату. Если вы смотрите на циферблат часов сверху вниз, то применение правила правой руки ко вращению стрелок «по часовой стрелке» дает направление вниз.

- Чтобы закрутить стандартный винт на свое место мы должны заставить его вращаться вокруг своей оси. Если мы смотрим сверху

на винт, то мы должны вращать его по часовой стрелке, чтобы заставить его закручиваться вниз. Это срабатывает, поскольку стандартный, хороший винт нарезан так, чтобы соответствовать предыдущему правилу правой руки, и поэтому мы называем его винтом с правой резьбой. Другой вид, назовем их плохими винтами, имеют левую резьбу.

Во всех этих случаях мы могли бы прекрасно заменить правое на левое, чтобы описать точно те же самые ситуации. Нам нужно только поменять в этих определениях местами слова «по часовой стрелке» и «против часовой стрелки» и «хороший» и «плохой».

Точно так же в учебниках физики вы найдете много правил правой руки, описывающих, как определить направление **магнитных полей** и **сил**, создаваемых **магнитными полями**. Но если бы вы изменили правое на левое и одновременно изменили *определение* направления магнитного поля с точностью до наоборот, то в законах физики ничего бы не изменилось.

Физики полагали до 1956 г., что все проявления правого и левого в физике являются предметом простых соглашений – т. е. соглашениями о том, как определять понятия, принятыми просто для удобства. Соглашения могут быть очень полезными. Очень важно, например, быть в состоянии объяснить производителям винтов, каким образом нарезать резьбу. Но такие договоренности не принадлежат к фундаментальным принципам. Можно было принять другие соглашения!

Другой способ сформулировать это предположение, который красиво находит ему место в главном русле глубоких размышлений об основных принципах, – это предположение о **симметрии**. Мы говорим, что система уравнений имеет симметрию *четности* или они являются инвариантными относительно *преобразований четности*, если в них можно поменять местами левое и правое, сделав соответствующие изменения в определениях, и при этом содержание уравнений не изменится.

(Сделаем техническое дополнение, являющееся одновременно забавным упражнением. «Поменять левое и правое» требует некоторого более подробного объяснения, потому что левое и правое – это свойства объектов [например, рук], расположенных в пространстве, и мы не можем просто так переделать все левые руки в правые руки, все винты с левой резьбой в винты с правой резьбой и т. д., не сделав изменений в самом пространстве так, чтобы преобразованные объекты продолжали подходить друг другу! Проще всего сделать это если выбрать одну точку  $O$  – начало координат – и преобразовать любую точку в ее антипод относительно  $O$ . Таким образом, вы перемещаете любую точку  $P$  в точку диаметрально

противоположную относительно точки  $O$ .)

Когда мы выполняем наше преобразование четности, отражая точки в их антиподы, естественно, что векторы изменяют свое направление. Например, хорошим упражнением будет мысленно увидеть, что вектор, идущий из точки  $A$  в точку  $B$ , смотрит в противоположном направлении относительно вектора, нарисованного между их антиподами, из точки  $-A$  в точку  $-B$ .

Вот забавное упражнение с той же идеей: расположите большой палец и два следующих пальца правой руки, чтобы они указывали в трех взаимно перпендикулярных направлениях, сделайте затем то же самое с вашей левой рукой и расположите руки так, чтобы соответствующие пальцы двух рук указывали в противоположные стороны<sup>[122]</sup>. Посредством этого упражнения вы воплощаете преобразование четности: ваши пальцы указывают направления, и инверсия всех трех направлений преобразует левую руку в правую и обратно!

В 1956 г. Чжэндао Ли (род. 1926) и Чжэньнин (Фрэнк) Янг (род. 1922) после анализа некоторых озадачивающих экспериментов предположили, что, хотя большинство проявлений «рук» в физике, включая правила правой руки, которые запутывали поколения студентов, изучающих магнетизм, является вполне условным, **слабое взаимодействие** отличается в этом отношении и действительно делает различие между левым и правым. Другими словами, они предположили, что симметрия четности соблюдается не строго. Или же, если сказать коротко и просто, они предположили нарушение четности. Их предположение вскоре подтвердилось экспериментально, и этот прорыв привел к гораздо лучшему пониманию слабого взаимодействия.

Сегодня мы признаем, что нарушение четности – главная особенность слабого взаимодействия и важная часть формулировки соответствующего раздела **Основной теории**. Слабое взаимодействие делает большое различие между левым и правым, от которого нельзя избавиться за счет определений!

Чтобы точно установить различие, мы должны ввести *спиральность* частицы. Когда частица со **спином** еще и движется, мы имеем два направления, связанные с ней: направление, связанное с ее спином, которое мы определили ранее, и направление ее скорости. В определении направления, связанного со спином, мы использовали правило правой руки. Соответственно, если направление спина частицы, определенное таким образом, совпадает с направлением ее скорости, мы говорим, что это правая частица. В ином случае, если направление спина частицы

противоположно направлению ее скорости, мы говорим, что это левая частица.

Подготовившись таким образом, мы теперь готовы описать, как слабое взаимодействие нарушает четность: левые кварки и левые лептоны, а также правые антикварки и антилептоны участвуют в слабом взаимодействии, но частицы с противоположной спиральностью этого не делают.

Наконец, позвольте мне выполнить обещание, сделанное в статье об **аксиальном векторе**, и дать определение этого термина. Выше мы видели, что векторы, связанные с движением из одной точки в другую, изменяют направление после преобразования четности. Векторы, которые преобразовываются подобным образом, называют истинными векторами, или полярными векторами. Однако не все векторы ведут себя таким образом! Векторы, в определение которых входит правило правой руки, поменяют направление дважды, если мы делаем преобразование четности: один раз, потому что они векторы, а второй раз, потому что они были определены «неправильным» для преобразованной системы правилом (потому что правое превратилось в левое!). Векторы, направление которых *не* изменяется, когда мы выполняем преобразование четности, называют псевдовекторами, или аксиальными векторами. Например, магнитное поле в физике – это поле аксиальных векторов.

### *Чистый тон*

См. **Тон, чистый тон.**

### *Экономность идей*

### *Economy of ideas*

Мы называем объяснение или, в более общем случае, теорию *экономной*, если она содержит мало допущений, а объясняет многое.

Хотя она не включает обмена товарами или услугами, эта концепция не полностью лишена связи с настоящей экономикой. В ее рамках мы бы сказали, что разумное использование ограниченных ресурсов для создания ценной продукции – экономное использование этих ресурсов, так что это похожая идея.

Интуитивно кажется обоснованным предпочитать экономные объяснения их противоположностям – объяснениям, которые требуют многих допущений для объяснения ограниченного ряда фактов или наблюдений. Этот интуитивный подход находит поддержку в байесовской статистике, которая уверяет нас в том, что более экономное из двух объяснений с большей вероятностью является правильным, если оба одинаково хорошо объясняют одни и те же данные.

### *Электрический заряд*

### *Electric charge*

В современной физике и особенно в нашей **Главной теории электрический заряд** – первичное свойство вещества, которое не может быть объяснено чем-то более простым. Электрический заряд – это дискретная (**цифровая**) **сохраняющаяся** величина, на которую реагируют **электромагнитные поля**.

Самое простое проявление электрического заряда – его способность порождать **силы**. Согласно закону Кулона, две электрически заряженные частицы испытывают электрическую силу, пропорциональную произведению их электрических зарядов (и обратно пропорциональную квадрату расстояния между ними). Если заряды одного знака, то это между ними действует сила отталкивания, но она является силой притяжения, если заряды имеют противоположный знак. Следовательно, существует сила электрического отталкивания между двумя **протонами**, как и между двумя **электронами**, и сила электрического притяжения между протоном и электроном.

Электрический заряд всегда является кратным заряду протона. Электроны по отношению к протонам несут равный, но противоположный по знаку заряд. (Теоретически **кварки** обладают дробным зарядом относительно заряда протона. Однако кварки не появляются в виде отдельных частиц, а только в составе **адронов**. Электрические заряды адронов всегда являются кратными заряду протона.)

### *Электрический ток*

*См. Ток.*

*Электрическое поле, электрический флюид*

*Electric field, electric fluid*

Величина *электрического поля* в любой точке определяется отношением электрической **силы**, которую испытывает заряженная частица, расположенная в этой точке, к **электрическому заряду**. Сила – это **векторная** величина, поэтому электрическое поле – **векторное** поле.

Это определение широко используется в молекулярной биологии, химии, электротехнике и других прикладных науках. Но в приложении к фундаментальной физике, где **квантовые флуктуации** становятся значительными, оно становится проблематичным, поскольку и силы, и положения частиц флуктуируют. Его можно оставить как *приближенное* представление, произведя тем или иным способом усреднение по времени и пространству.

В фундаментальной физике оказался полезнее другой подход, который избегает этих трудностей. Мы настаиваем, что понятия, которые мы используем, соответствуют на всех этапах наблюдаемым величинам. Мы хотим, чтобы все наблюдаемые величины появлялись где-то в уравнениях, но мы можем считать – и мы считаем – удобным включить туда что-то другое кроме них! (См., в частности, статью **о перенормировке**.)

В таком ключе я определяю *электрический флюид* как заполняющее пространство активное *нечто*, появляющееся в **уравнениях Максвелла**.

Необходимость разделять понятия электрического поля и электрического флюида становится кристально ясной, если мы подумаем, как должны интерпретировать утверждение «Электрическое поле в межгалактическом пространстве исчезает». Это утверждение имеет смысл (и приближенно верно), если принять наше определение электрического поля через средние значения сил, которые оно создает. Однако будет совершенно неверно сказать, что квантово-механическая сущность, которая фигурирует в уравнениях Максвелла и проявляет спонтанную активность, где-либо исчезает. Поэтому обычная терминология, которая не различает эти два понятия – сущность сама по себе и ее среднее значение, – порочна в своей основе. (Этот порок,

похоже, не слишком волнует большинство физиков, но он беспокоит меня!) Мы решаем эту проблему, называя саму сущность *электрическим флюидом*, а ее среднее значение *электрическим полем*.

(С учетом этого, если нет опасности запутаться, я буду иногда использовать термин «электрическое поле» как для сущности, так и для ее среднего значения. Вредные привычки изживаются с трудом.)

См. также **Квантовый флюид**.

## *Электричество*

## *Electricity*

«Электричество» – это общий термин, который используется для обозначения широкого спектра явлений, связанных с влиянием и поведением **электрических зарядов**.

## *Электродинамика, электромагнетизм*

## *Electrodynamics/electromagnetism*

Эти два термина взаимозаменяемы и используются для обозначения раздела науки, который описывает **электричество, магнетизм** и связь между ними.

Еще со времен работ Фарадея и Максвелла люди поняли, что электричество и магнетизм неразрывно связаны друг с другом. Меняющиеся во времени магнитные поля создают электрические поля, согласно **закону Фарадея**, а меняющиеся во времени электрические поля создают магнитные поля, согласно **закону Максвелла** (см. **слагаемое Максвелла**). **Электромагнитные волны**, возникающие из взаимосвязи этих законов, содержат как электрические, так и магнитные поля.

Из **специальной теории относительности** мы узнаем, что **преобразования Галилея** преобразуют электрические и магнитные поля (и флюиды) друг в друга.

## *Электромагнитная волна*

## *Electromagnetic wave*

Когда мы объединяем **закон Фарадея**, по которому меняющиеся магнитные поля создают электрические поля, с **законом Максвелла**, по которому меняющиеся электрические поля создают магнитные поля, мы обнаруживаем возможность самоподдерживающейся активности в этих полях. Эта самоподдерживающаяся активность принимает форму **поперечных волн**, которые перемещаются в пространстве со скоростью света. Мы называем эти волны *электромагнитными волнами*.

Максвелл открыл возможность существования электромагнитных волн и рассчитал их скорость. Обнаружив, что она совпадает со скоростью света, он предположил, что свет состоит из электромагнитных волн. По сей день это остается нашим фундаментальным описанием света.

Видимый свет соответствует только небольшой полосе **электромагнитного спектра**, который включает электромагнитные волны со всеми возможными **длинами волн**. Сейчас мы знаем, что не только свет, но также радиоволны, **микроволновое излучение**, инфракрасное излучение, ультрафиолетовое излучение, гамма-лучи – все являются электромагнитными волнами с разными длинами волн и **частотой**.

## *Электромагнитный спектр*

См. Цвет (света).

## *Электромагнитный флюид, электромагнитное поле*

## *Electromagnetic fluid/electromagnetic field*

Поскольку электрическое и магнитное поля оказывают большое влияние друг на друга, удобно и справедливо рассматривать их как единое целое. *Электромагнитный флюид* – это просто флюид, двумя компонентами которого являются электрический и магнитный флюиды. Электромагнитное поле в любой точке равно среднему значению флюида в этой точке.

## *Электрон*

## *Electron*

Электроны – одна из составляющих частей **обычного вещества**. Впервые явным образом их наблюдал Дж. Томсон в 1897 г.

В **Главной теории электроны – элементарные частицы**, и их определяют через уравнения, которым они удовлетворяют.

В обычном веществе электроны несут весь отрицательный **электрический заряд**. Хотя они дают совсем небольшой вклад в массу обычного вещества, электроны играют преобладающую роль в химии и структуре материалов. Контролируемое управление электронами – другими словами, *электроника*, в широком понимании этого слова – это основа большей части современной технологической цивилизации.

## *Электронный флюид*

## *Electron fluid*

*Электронный флюид* – это заполняющий мировое пространство активный **квантовый флюид** или **среда**. Согласно **квантовой теории**, используемой в нашей **Главной теории** для описания мира, **электроны** и их **античастицы** – антиэлектроны, или **позитроны** – являются возмущениями электронного флюида. Они похожи в таком описании на волны на воде, которые в случае отсутствия препятствий могут сохраняться и передвигаться (или, как мы иногда говорим, «распространяться») долгое время и на большие расстояния.

Существуют похожие флюиды, связанные с каждым из видов элементарных частиц. (В физической литературе они часто называются **квантовыми полями**.) Эти заполняющие пространство флюиды сосуществуют – присутствие одного не исключает присутствие любого другого. **Динамические уравнения** Главной теории описывают, как они влияют друг на друга.

Как и многие идеи, которые мы используем сейчас для описания вещества, наше современное понимание электронов основано на понятиях, впервые появившихся в процессе изучения **электромагнетизма** и света.

Электронный флюид очень похож на **электромагнитный флюид**, и сейчас мы рассматриваем электроны как наименьшие возмущения в электронном флюиде. Они являются его **квантами**, так же как **фотоны** для электромагнитного флюида.

### *Элементарная частица*

### *Elementary particle*

Мы называем частицу *элементарной*, если она подчиняется простым уравнениям. Согласно **Главной теории**, **кварки**, **лептоны**, **фотоны**, **виконы**, **цветные глюоны**, **гравитоны** и **частица Хиггса** – элементарные частицы.

Когда-то мы считали (или скорее надеялись), что **протоны** и **нейтроны** являются элементарными частицами, но дальнейшие исследования показали, что они не подчиняются простым уравнениям. Сходным образом атомы и молекулы также не являются элементарными частицами. Во всех этих случаях мы понимаем теперь, что эти объекты – протоны, нейтроны, атомы и молекулы – сложные структуры, состоящие из более простых частей. На самом деле они состоят из нескольких *элементарных частиц* Главной теории (а именно из *u*- и *d*-кварков, цветных глюонов, **электронов** и фотонов).

### *Эллипс*

### *Ellipse*

*Эллипс* – это плоская геометрическая фигура, похожая на вытянутый круг. Эллипсы обычно определяются следующим образом. Выберем пару точек *A* и *B* и расстояние *d*, большее, чем расстояние между *A* и *B*. Тогда набор всех точек *P*, таких, что сумма расстояний от *A* до *P* и от *B* до *P* равна *d*, является эллипсом. Точки *A* и *B*, которые сами по себе не принадлежат эллипсу, называются его **фокальными точками**, или **фокусами**.

Окружность является частным случаем эллипса, который возникает, когда *A* и *B* совпадают. Когда *d* много больше расстояния между *A* и *B*,

эллипс становится почти окружностью. Когда  $d$  уменьшается и становится совсем немного больше расстояния от  $A$  до  $B$ , эллипс превращается в овал, плотно прилегающий к отрезку, соединяющему  $A$  и  $B$ ; в предельном случае, когда  $d$  становится равно расстоянию между  $A$  и  $B$ , эллипс вырождается в этот отрезок.

Эллипс можно определить несколькими другими очень непохожими, но математически эквивалентными способами. Один из них, мой любимый, пожалуй, проще всего представить: нарисуйте круг на резиновом листе, а затем равномерно растяните лист в одном выбранном направлении. Тогда круг превратится в эллипс; все эллипсы можно получить таким способом.

Эллипсы были удивительно глубоко изучены древнегреческими геометрами просто потому, что казались им красивыми. Много веков спустя Кеплер путем внимательного изучения астрономических наблюдений Тихо Браге открыл, что орбиты планет вокруг Солнца образуют эллипсы с Солнцем в одном из фокусов. Хотя Кеплер сначала с огорчением отказался от «идеальных» **орбит** в форме окружностей, в ретроспективе это воплощение греческой геометрии кажется практически чудесным случаем, когда Идеальное становится Реальным.

Законы Кеплера о движении планет навели Ньютона на его теории механики и гравитации. В рамках работ Ньютона мы обнаруживаем, что планеты вращаются вокруг Солнца только по приближенно эллиптическим орбитам, так как они искажаются гравитационным влиянием других планет. Основная красота в данном случае заключается скорее в самих **динамических законах**, чем в их решениях. Чтобы узнать об этом больше, см. главу «Ньютон III».

*Энергия, кинетическая энергия, энергия массы<sup>[123]</sup>, энергия движения, потенциальная энергия и энергия поля*

*Energy/kinetic energy/mass energy/energy of motion/potential energy/field energy*

*Энергия* наряду с **импульсом** и **моментом импульса** является одной из выдающихся сохраняющихся величин классической физики. Каждая из них также развилась в основополагающий столп современной физики.

В практических обсуждениях энергии вводится множество категорий, таких как энергия ветра, химическая энергия, тепловая энергия и другие,

которые возникают в результате «заворачивания» фундаментальных форм энергии в разные обертки. Но даже если говорить об энергии в фундаментальных терминах, она имеет несколько форм. Здесь мы будем рассматривать энергию с фундаментальной точки зрения.

Полная энергия, которая является сохраняющейся величиной, равна сумме нескольких слагаемых: кинетической энергии, энергии массы, потенциальной энергии и энергии поля. Эти различные слагаемые относятся к сторонам реальности, которые, на первый взгляд, кажутся совершенно разными. Прикладная сила понятия энергии в немалой части как раз является результатом его способности описывать и связывать несколько различных аспектов реальности.

Кинетическая энергия исторически была первой формой энергии, о которой заговорили и значимость которой проще всего понять интуитивно. Качественно кинетическая энергия – это движение. Когда мы конструируем машины, мы часто хотим, чтобы что-то двигалось. Поскольку движущиеся объекты обладают кинетической энергией, часто основной целью энергетики является преобразование других форм энергии в кинетическую энергию.

**Количественно**, в механике Ньютона, кинетическая энергия частицы равна половине **массы**, умноженной на квадрат модуля **скорости**. В эйнштейновской модификации механики, чтобы удовлетворить **специальной теории относительности**, энергия движения становится связана с другой формой энергии – *энергией массы*, к которой мы сейчас обратимся.

В ньютоновской механике есть два отдельных **закона сохранения**: сохранение массы и сохранение *энергии*. Специальная теория относительности требует коренного пересмотра понятия массы. В рамках этого пересмотра необходимо отказаться от сохранения массы. Сохранение энергии остается в силе, но со значительно отличающимся определением того, что такое энергия. Хотя я никогда не видел, чтобы это преподносилось именно таким образом, логичность понятия *энергии массы* оказывается наиболее понятной, если рассматривать его как способ согласования нерелятивистского и релятивистского понятий энергии. Подробное объяснение дано в трех следующих абзацах.

Для импульса и момента импульса переход от релятивистского определения к ньютоновскому происходит плавно. Релятивистские выражения для этих величин становятся приближенно равными ньютоновским выражениям, когда скорости всех задействованных тел много меньше скорости света. Однако для энергии такой плавный переход

не совсем очевиден. Он возможен, только если мы добавим новое слагаемое в привычное ньютоновское определение энергии. Этот новый вклад называется *энергией массы*.

Энергия массы тела равна его массе, умноженной на квадрат скорости света. Если обозначить, как это обычно делают, скорость света как  $c$ , соответствующая формула будет, пожалуй, самым известным уравнением в науке:

$$E_{mass} = mc^2.$$

Я добавил здесь нижний индекс *mass*, чтобы подчеркнуть, что это только одна из многих форм энергии. Полная энергия массы, когда у нас имеется несколько тел, просто равна сумме их энергий массы. Таким образом, полная энергия массы просто равна суммарной массе, умноженной на квадрат скорости света. Полная «скорректированная» ньютоновская энергия равна классической ньютоновской энергии – кинетической плюс потенциальной, – определение которой вы найдете в учебниках (а также ниже!), *плюс* энергия массы. Именно скорректированная ньютоновская энергия, а не классическая ньютоновская энергия, сама собой появляется в релятивистской механике.

При условии, что полная масса сохраняется, скорректированная и классическая ньютоновские энергии отличаются на константу (и обе они сохраняются). Однако скорректированная энергия работает в более общем случае. Она предусматривает некоторые случаи, такие как **ядерные** реакции, где сохранение массы *не* является хорошим приближением. В таких случаях энергия массы в начале процесса не равна энергии массы в конце. Полная энергия сохраняется, так что разность между этими энергиями массы должна появляться в других формах. Именно это имеют в виду, когда говорят о переходе массы в энергию или энергии в массу. Или, скорее, должны иметь в виду. Это понятие было мощным источником недопонимания и путаницы в научно-популярной литературе. Я надеюсь, что здесь помог разъяснить его.

Для точных вычислений и в приложениях, где есть несколько частиц, движущихся с околосветовыми скоростями, нужно использовать полные релятивистские формулы для *энергии движения*, и ее разделение на энергию массы и кинетическую энергию становится искусственным.

В интересах читателей, немного владеющих алгеброй, привожу эту формулу:

$$E_{\text{motion}} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Когда модуль скорости много меньше скорости света,  $v \ll c$ , это выражение становится приближенно равно сумме энергии массы  $mc^2$  и ньютоновской кинетической энергии  $mv^2/2$ , как мы описали выше. По мере того как модуль скорости приближается к скорости света, энергия движения растет неограниченно.

*Потенциальная энергия*, если качественно, это энергия положения, или расстояния. Например, потенциальная энергия камня вблизи поверхности Земли может быть запасена, если поднять камень, или потрачена, если его уронить. По мере того как камень падает после того, как его отпустили, его скорость, а значит, и его кинетическая энергия, растет. Следовательно, чтобы соблюсти сохранение энергии, его потенциальная энергия должна уменьшиться.

Понятие потенциальной энергии можно расширить, чтобы оно охватывало многие более общие случаи. Когда тела действуют с какими-то силами друг на друга, потенциальная энергия, связанная с их взаимодействием, является функцией расстояния между ними. Потенциальная энергия – энергия расстояния – это естественное понятие для теорий, основанных на **дальнодействии**, таких как теория гравитации Ньютона. Как и эти теории, она остается полезной во многих приложениях, где она предоставляет достаточно хорошее, удобное для пользователя приближение. Но в фундаментальной физике со времен революции, начатой Фарадеем и Максвеллом, передающие взаимодействие **поля** заменили дальнодействие. *Энергия поля* заменяет потенциальную энергию.

Энергия поля запасена по всему пространству, где есть не равные нулю поля. Например, плотность энергии поля, связанная с электрическим полем в точке пространства, пропорциональна *квадрату* модуля электрического поля в этой точке.

Возможность замены понятия потенциальной энергии, *зависящей от расстояния*, понятием энергии поля, *определяемой локально*, одновременно глубока и очень красива. Рассмотрим потенциальную энергию между положительно (электрически) заряженной и отрицательно заряженной частицами. По примерно таким же причинам, какие мы обсуждали в связи с камнем вблизи Земли, существует потенциальная

энергия, связанная с расстоянием между этими частицами. В описании Фарадея – Максвелла то же самое количество энергии появляется совершенно иным образом. Оба наших заряда создают электрические поля, и полное электрическое поле равно сумме их вкладов. Плотность энергии, связанная с полным электрическим полем равна его квадрату, и значит, содержит не только квадраты каждого поля по отдельности, но также и перекрестный член, отражающий их одновременное присутствие. (Если эта идея вам не знакома, давайте на мгновение вернемся назад. Квадрат числа  $(1 + 1) = 2$ , т. е.  $2 \times 2 = 4$ , не равен удвоенному квадрату единицы, т. е. двум. Есть еще один вклад, или перекрестный член, когда два независимых вклада в сумму встречаются в ее квадрате. В более общей алгебраической записи мы имеем  $(a + b)^2 = a^2 + b^2 + 2ab$  с перекрестным членом  $2ab$ .) Перекрестные члены, которые появляются в полной плотности энергии поля, будут зависеть от относительной геометрии двух полей, из которых это поле состоит, которая в свою очередь зависит от относительного расстояния между частицами. Когда вы вычислите полную плотность энергии, включая вклады от всего пространства, чтобы получить полную *энергию поля*, вы обнаружите, что вклад этих перекрестных членов в точности совпадает с *потенциальной энергией* в старой теории и может ее заменить.

В этом примере энергия поля – это всего лишь другой (и более сложный!) способ прийти к тому же ответу, как и в случае потенциальной энергии. Но в более полном физическом представлении фундаментальные законы формулируются *локально* и естественным образом приводят к энергии поля. Потенциальная энергия – это приближенное *производное* понятие, полезное в некоторых задачах, но не подходящее для других.

**Сохранение** энергии и в конечном счете энергию саму по себе лучше всего можно понять с помощью обобщенной теоремы Нётер, которая связывает законы сохранения с **симметрией**. В таком подходе сохранение энергии свидетельствует о симметрии (**инвариантности**) физических законов относительно **трансляции (сдвига) во времени** – т. е. относительно преобразования, при котором все события сдвигаются вперед (или назад) на один и тот же интервал времени. Другими словами, сохранение энергии имеет место, когда законы не зависят от какого-либо заданного извне фиксированного времени.

В квантовом мире энергия приобретает дополнительные, очень тонкие и красивые свойства. Особенно примечательно **соотношение Планка – Эйнштейна**, которое связывает энергию фотонов и их **цвет**. В сочетании с идеями Бора эта связь позволяет нам расшифровать понятие **спектра**.

Цвета спектрального света атома кодируют энергии его **стационарных состояний**, предоставляя видимую *Музыку Сфер*.

*Энергия поля*

См. **Энергия**.

*Ядро*

*Nucleus*

У каждого атома есть очень небольшая центральная часть, или *ядро*, которое содержит весь его положительный заряд и почти всю его массу. Как описано в главе «Квантовая красота III», исследование атомных ядер повлекло за собой открытие существования в Природе двух новых сил, **сильного** и **слабого взаимодействий**, и привело в течение XX в. к нашей изумительной **Главной теории**.

*W-частица (W-бозон)*

*W particle*

Массивная частица, которая играет одну из главных ролей в слабом взаимодействии. См. **Слабое взаимодействие** и **Викон**.

*Z-частица (Z-бозон)*

*Z particle*

Массивная частица, которая играет одну из главных ролей в **слабом взаимодействии**. См. **Викон**.

## **Примечания**

## Пифагор II: Число и гармония

*Почему звуки, частоты которых соотносятся как небольшие целые числа, дают приятное созвучие?*

Даже самые основные факты о музыкальном восприятии поднимают интереснейшие вопросы. Два простых наблюдения в особенности кажутся мне имеющими отношение к оставленной нам в наследство загадке Пифагора: «Почему именно те пары звуков, частоты которых соотносятся как небольшие целые числа, обычно воспринимаются нами как гармоничные?»

### Абстракция

Когда мы говорим об интервале в октаву, мы имеем в виду, например, что *до* первой октавы и *до* второй октавы с удвоенной частотой звучат одновременно. Чтобы упростить явление *слияния* до его сущности, давайте предположим, что с помощью электронных средств мы производим строго чистые звуки и что интенсивность (громкость) обоих одинакова. Эти параметры еще не дают нам уникальной инструкции по созданию формы результирующей звуковой волны, которую должен воспроизвести компьютер и которая достигнет нашего уха. Две синусоидальные волны не обязаны быть синхронизированными: пики одной из них могут совпадать или не совпадать с пиками другой. Мы говорим, что существует фазовый сдвиг между двумя тонами. Формы результирующей волны, построенные как функция от времени, могут выглядеть очень по-разному в зависимости от значения фазового сдвига. Но звучат-то они не по-разному! Я сам проводил этот опыт и еще многие, связанные с ним. Отклик базиллярной мембраны разделяет звуки в пространственном отношении, но сохраняет информацию об их относительной фазе. (Так я понял из достаточно сложной для восприятия литературы. Эксперименты на структурных элементах внутреннего уха не просты и почти всегда проводятся в лабораторных условиях.) Тем не менее мы каким-то образом объединяем все эти возможности на низовом уровне обработки и распознаем результат как октаву *до* – и точка. Мы сводим воедино

сигналы, представляющие непрерывный диапазон физических свойств, в единое восприятие, чтобы создать полезную абстракцию.

Тот же самый принцип остается в силе для других октав, основанных на других тонах, и для других комбинаций двух нот, пока их частоты не оказываются слишком близки. (В качестве предельного случая мы можем соединить два звука с одной и той же частотой и интенсивностью, но с разными фазами – и вместо октавы взять унисон. Теперь, меняя относительную фазу, мы будем всегда получать комбинированный тон с унисонной частотой, но с переменной фазой и интенсивностью<sup>[124]</sup>. Изменения последней легко воспринимаются.)

Процесс преднамеренного объединения, или *абстракции*, имеет смысл как стратегия для обработки информации. В естественном мире и в мире простых музыкальных инструментов (в том числе голосов), в том или ином случае обычные источники часто создают октавы с различными, по большей части случайными относительными фазами. Если бы эти различные волновые формы воспринимались по-разному, мы были бы перегружены бесполезной в основном информацией и, возможно, с большим трудом смогли изучить, распознать и оценить полезное общее понятие октавы. По всей видимости, эволюция была рада облегчить эту нагрузку.

Подобным образом, люди с неидеальным музыкальным слухом – а это подавляющее большинство – смешивают большое количество отличающихся физически «октав», основанных на различных нотах (но см. обсуждение о *запоминании* немного ниже). Таким образом, они подавляют информацию и о фазе, и об абсолютной частоте, но сохраняют относительную частоту.

Принимая во внимание то, что может быть полезно подавить не относящуюся к делу информацию, чтобы создать полезную абстракцию, возникает вопрос, как это сделать. Это интересная проблема «обратного инжиниринга». Я могу придумать три простых, более или менее биологически возможных способа, которыми можно этого добиться:

- Нервные клетки (или небольшие сети нервных клеток), которые отвечают на колебание в разных частях базилярной мембраны, могут быть механически, электрически или химически соединены друг с другом таким образом, чтобы их отклики были синхронизированы по фазе. Это явление в физике и инженерном деле известно как фазовая *синхронизация*. Легкий вариант реализации этой концепции состоит в том, что может существовать класс нервных клеток, который получает колебательные сигналы от двух таких нервных клеток (или напрямую от колеблющихся волосковых клеток

во внутреннем ухе) и отвечает таким способом, который не зависит от их относительной фазы.

- Могут быть банки (группы) нервных клеток, которые реагируют на колебания в любой точке базилярной мембраны с разными сдвигами по фазе. Когда две группы выходных сигналов, соответствующие двум разным местоположениям, совмещаются, среди них обязательно будет такие, которые синхронизированы. Последующий уровень нервных клеток, получающий входящий сигнал от этих банков, может сильнее реагировать на эти синхронизированные пары.

- Могут быть *стандартные представители* для каждой частоты – нервные клетки, выход которых фиксирован по отношению к общему временному механизму. Тогда относительная фаза между стандартными представителями всегда будет одной и той же, какой бы ни была относительная фаза входного сигнала.

Я не вношу в этот список простую, но радикальную возможность просто закодировать места, где базилярная мембрана сильно вибрирует, вообще не разбираясь во временной структуре пиков и впадин. (Это аналогично тому, что происходит с электромагнитными колебаниями в процессе зрительного восприятия.) При таком кодировании фазовая информация, конечно, теряется, но я думаю, что это уже слишком. Так мы не сумели бы объяснить открытие Пифагора, поскольку отношения частот более не соотносились бы с закономерностями закодированного сигнала.

### Запоминание

Бенджамин Франклин страстно увлекался музыкой. Он великолепно играл на стеклянной гармонике – утонченном инструменте, для которого Моцарт написал очень красивую пьесу (адажио K-356, доступную бесплатно на нескольких сайтах в Интернете). В письме лорду Камесу (1765 г.) Франклин сделал несколько ценных замечаний о музыке, в том числе это, особенно глубокое:

На самом деле в обычном восприятии только согласованная последовательность звуков называется мелодией и только сосуществование согласующихся звуков – гармонией. Но поскольку память способна запоминать на некоторое время идеальный образ высоты прозвучавшего звука, чтобы затем сравнить ее с высотой последующего звука и судить истинно

об их согласованности или несогласованности, из этого может возникать и возникает чувство гармонии между настоящим и прошлым звуками, доставляющее такое же удовольствие, как от двух звучащих в настоящий момент звуков.

Тот факт, что мы можем сравнивать частоты тонов, сыгранных в немного разное время, является сильным доводом в пользу существования сети нервных клеток, которые воспроизводят и ненадолго запоминают принятый рисунок колебаний. Эта вероятность, думаю, хорошо согласуется с нашей обычной идеей представления, поскольку такие сети могут воплощать стандартные представления. Здесь заслуживает внимания то, что восприятие относительной высоты звука соответствует простому *сравнению* стандартных представлений, а это иная задача, нежели *узнавание* абсолютной высоты звука.

Относительно этого круга идей заслуживает также внимания то, что мы способны более-менее поддерживать заданный темп в течение длительного периода времени. Это снова говорит в пользу существования настраиваемых колебательных сетей в нашей нервной системе, но на этот раз для значительно более низких частот.

Я не обладаю идеальным слухом, что меня огорчает. Я пытался обойти свою акустическую абстракцию относительной высоты звука, стимулируя некоторого рода искусственную синестезию. Я написал программу, чтобы случайным образом проигрывать определенные звуки вместе с определенными цветами. Позже я проверял себя то на одних данных, то на других, пытаюсь предсказать парный сигнал. После многих утомительных подходов у меня получилось скромное улучшение по сравнению со случайным угадыванием. Возможно, существуют более эффективные способы, или же этого легче добиться молодым людям.

Чтобы определить, находятся ли высказанные здесь конкретные идеи о гармонии на верном пути, потребовалась бы напряженная экспериментальная работа. Но было бы здорово через два с половиной тысячелетия после Пифагора дойти до сути его великого открытия и тем самым воздать честь повелению дельфийского оракула: «*Познай самого себя*».

## **Платон I: Структура из симметрии – платоновы тела**

*Пять платоновых тел – это все конечные правильные многогранники, которые могут существовать.*

Кажется вполне естественным задать вопрос, не можем ли мы выйти за пределы обнаруженного нами (или, скорее, Евклидом) ограничения, в соответствии с которым возможно лишь пять платоновых тел, рассматривая платоновы поверхности более общим способом. Вспомним, мы говорили, что в одной вершине не может сходиться более шести треугольников, потому что тогда сумма их углов составит больше  $360^\circ$ , а это больше того пространства, которое имеется в одной вершине. С шестью треугольниками мы получаем плоскость как платонову поверхность.

С тремя, четырьмя или пятью треугольниками мы, делая проекцию из центра нашей платоновой поверхности на описанную сферу, получаем правильные сечения сферы. Это возможно, потому что равносторонние сферические треугольники имеют углы больше  $60^\circ$ , поэтому мы можем окружить вершину менее чем шестью из них. Это другой способ представления обоих классов платоновых тел – как правильные сечения плоскостей или сфер.

Таким образом, мы пришли к тому, чтобы спросить более конкретно: можем мы представить себе другой вид поверхности, где углы будут меньше? Тогда мы, возможно, придумаем платоновы поверхности, где в одной вершине сходятся более шести треугольников.

Мы действительно можем это сделать! Что нам нужно, так это поверхность, которая получается в результате деформации плоскости таким образом, чтобы она изогнулась наружу, а не внутрь – так, как мы делаем, чтобы получить сферу. Седловидная форма дает необходимый эффект. На ней мы можем представить себе правильные сечения, основанные на вершинах с семью треугольниками или даже с большим их количеством (вообще говоря, произвольным). Если говорить более точно, математическая фигура, известная как трохоида, дает правильную седловидную форму, позволяющую сохранить все в симметрии, чтобы каждая вершина и каждый треугольник (или другая фигура) выглядели бы

одинаково.

Древние геометры знали о геометрии более чем достаточно, чтобы выполнить все необходимые построения. Дальнейшее следование ходу этой мысли могло привести умных людей, живших на рубеже нашей эры, к понятиям неевклидовой геометрии XIX в. и к тем видам графического дизайна, которые сделал популярным М. Эшер в XX в. К сожалению, этого не случилось.

*Можно увидеть стенд с пятью резными камнями...*

Существуют разногласия по поводу того, являются ли ашмолинские и другие подобные камни действительно платоновыми телами. См. [math.ucr.edu/home/baez/icosahedron](http://math.ucr.edu/home/baez/icosahedron).

## Ньютон III: Динамическая красота

*Великий математик и физик XX в. Герман Вейль.*

Герман Вейль – один из моих героев. Я вырос на его книгах и даже сейчас часто к ним возвращаюсь. Поскольку он умер, когда я был маленьким ребенком, мне не довелось встретиться с ним лично. Но его прекрасные строки, которые приведены в тексте, открыли нам возможность сотрудничать, которую я продолжаю здесь. Вейль всегда сражал меня своей поэтичностью, и мне пришло в голову: почему бы не сделать следующий шаг и не написать стихотворение?

Вот это стихотворение. Первая его строка одновременно является заглавием.

Мир реален.  
Наблюдаю картины я странные  
В токах плоти, чьей сетью пронизан:  
Мимолетные, беглые, рваные  
Части мира, где жить я был призван.  
Целый мир – он реален, я знаю.  
То, что мы в нем, – ничуть не случайно.

## Максвелл I: Эстетика Бога

*Несколько великолепных бесплатных веб-сайтов, где вы можете интерактивно изучать уравнения Максвелла.*

Веб-сайт [maxwells-equations.com](http://maxwells-equations.com) обеспечивает всестороннее начальное знакомство с уравнениями Максвелла, включая видеокурс. Статья в «Википедии» [en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s\\_equations](http://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s_equations) очень хороша. При работе с этой статьей я рекомендую вам начать с раздела «Conceptual Descriptions» («Понятийное описание»), который в основном следует той же линии, что наша книга, и разрабатывается дальше. Также существует прекрасный и понятный маленький видеоролик о картине полей электромагнитной волны, идущей сквозь пространство. Я очень его рекомендую: [en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s\\_equations#/media/File:Electromagneticwave3D.gif](http://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s_equations#/media/File:Electromagneticwave3D.gif).

## Максвелл II: Двери восприятия

*Кажется, эта способность встречается очень редко и не очень хорошо изучена.*

Тем не менее вполне вероятно, что тетрахроматизм распространен среди матерей и дочерей мужчин, страдающих цветовой слепотой. Если такой мужчина является носителем гена поврежденного рецептора, так что его зеленые и красные рецепторы очень близки, хотя и не идентичны, и это передается вместе с X-хромосомой, то его дочери также их получают. Вместе с набором нормальных рецепторов, унаследованных от матерей, эти дочери будут иметь четыре различных рецептора (хотя два из них будут похожи). Если это верно, то тетрахроматизм – не такое уж редкое явление, но его последствия могут быть трудно различимы. По сходным причинам можно ожидать, что матери мужчин, страдающих цветовой слепотой, могут быть тетрахроматами.

## **Квантовая красота I: Музыка сфер**

*Антропные доводы поднимают множество вопросов.*

Общая суть антропных доводов подробно обсуждается в «Терминах». Им посвящена отдельная статья, а кроме того, они затронуты существенным образом в статьях о темной материи и темной энергии. Я решил не прерывать основной текст отступлениями по этому поводу.

## **Квантовая красота III: Красота в основе Природы**

*Свойства, на которые реагируют глюоны, также были названы цветами.*

В литературе встречается несколько разных вариантов для названий трех сильных цветовых зарядов. Как и любой другой, сделанный нами выбор (RGB) по существу произволен, но он удачно перекликается с нашим предыдущим обсуждением спектральных цветов и их смешивания, как вы сами увидите.

Я оставил описание пространств цветовых свойств несколько неопределенным, поскольку точное описание немного более сложно и использует комплексные числа. Пространство свойства сильного цвета – это пространство свойства с тремя комплексными измерениями, и аналогично устроены пространства свойств слабого цвета и электромагнитного «цвета». Во всех случаях преобразования симметрии не меняют полного расстояния до начала координат, поэтому пространства свойств того, что мы назвали сущностями (частицы, связанные друг с другом через преобразования симметрии), являются сферами различных размерностей. В случае сильного взаимодействия мы начинаем с трех комплексных измерений, которые соответствуют шести действительным, и потому пространство свойства кварковой сущности – это сфера с пятью действительными измерениями. Для электромагнитного заряда мы имеем одно комплексное измерение, два действительных и, наконец, – одномерную сферу, также известную как окружность. Радиус этой окружности равен величине электрического заряда.

*Историческое происхождение термина «калибровочная симметрия» довольно интересно.*

В 1919 г. Герман Вейль в своей статье «Новое расширение теории относительности» (Eine neue Erweiterung der Relativitätstheorie) предложил блестящую теорию для объяснения происхождения электромагнетизма. Хотя эта теория в своей исходной форме совершенно неверна, она привнесла идеи, которые оказались невероятно плодотворными.

В самом деле, это была первая попытка превзойти Эйнштейна и призвать *локальную симметрию* в качестве фундаментального созидательного принципа для негравитационных взаимодействий. Как мы уже обсудили, эта стратегия, примененная разными способами, приводит к нашей Главной теории.

Термин «калибровочная симметрия» – это пережиток первоначальной теории Вейля.

Как мы уже обсуждали, основная идея локальной симметрии состоит в том, чтобы потребовать, чтобы множество разных образов мира представляли одно и то же физическое содержание. Если мы хотим, чтобы большое разнообразие «искаженных» компоновок пространства, времени и вещества было правомерно, т. е. если мы хотим, чтобы поведение, которое каждая из них описывает, было физически возможным, то мы должны ввести среду, которая дает возможность для искажений или, можно сказать, «создает» их. (См. вклейку ЕЕ и илл. 33, где дано визуальное представление этой идеи.) Вид среды, которая нам понадобится, тесно связан с видом искажений, которые мы решили использовать.

Вейль в своей первоначальной теории постулировал *локальную масштабную симметрию*. То есть он постулировал, что можно менять размер объектов независимо в каждой точке пространства-времени и все равно получать то же самое поведение этих объектов! Чтобы сделать эту смелую идею жизнеспособной, ему пришлось ввести «калибровочное» поле связности. Калибровочное поле связности говорит нам, как мы должны изменять наш масштаб длины, или переразмечать наши линейки, по мере того, как мы движемся от одной точки к другой. Вейль сделал выдающееся открытие, которое состояло в том, что это калибровочное поле связности для того, чтобы выполнять свою работу по обеспечению локальной масштабной симметрии, должно удовлетворять уравнениям Максвелла! Изумленный этим чудом, как ему казалось, Вейль предложил отождествить его *идеальное* математическое поле связности с *реальным* физическим электромагнитным полем.

К сожалению, хотя поле связности Вейля является необходимым компонентом локальной масштабной симметрии, оно недостаточно для того, чтобы обеспечить эту симметрию. Другие свойства материи, такие как размеры протона, дают нам объективные масштабы длин, которые не меняются по мере того, как мы движемся от точки к точке.

Эйнштейн и другие не оставили незамеченными недостатки теории Вейля. Несмотря на ее прозорливую гениальность, эта теория, казалось, обречена на забвение.

Однако все изменилось с началом развития квантовой теории. В этом контексте электрический заряд связан с одномерным пространством свойства, которое надстроено над пространством-временем, как мы обсуждали в основном тексте.

В 1929 г. Вейль воспользовался этой лазейкой, чтобы оживить свою «калибровочную» теорию в видоизмененной форме. В новой теории преобразования локальной симметрии стали не зависящими от пространства-времени изменениями в масштабе длины, а скорее вращениями в пространстве электрического свойства. После такого видоизменения мы получаем удовлетворительную теорию электромагнетизма!

Десятилетия спустя оказалось, что обеспечение локальной (зависящей от пространства-времени) симметрии относительно вращений в других пространствах свойств с большим количеством измерений, дает нам также удовлетворительные теории сильного и слабого взаимодействий. В честь опередившей время прозорливости Вейля физики называют все теории такого типа *калибровочными* теориями.

***Они являются совокупностью протонов и нейтронов, связанных друг с другом.***

Сами по себе нейтроны нестабильны, но, будучи связанными с другими нейтронами и протонами, нейтроны становятся стабильными внутри атомных ядер.

***Ли и Янг предположили, что...***

С исторической точки зрения их первоначальное предположение было не настолько конкретным, но более поздние работы уточнили его.

***Возможно, это взаимодействие тоже можно было бы описать в виде воплощения локальной симметрии.***

Для экспертов: как форма полного взаимодействия, в которой участвуют два тока, так и общая константа связи являются характеристиками связи калибровочных теорий.

## **Симметрия III: Эмми Нётер – Время, энергия и здравомыслие**

*Сам Нильс Бор, когда он столкнулся в 1920-е гг. ...*

Эти предположения Бора и Ландау были сделаны после теоремы Нётер. Оба они, Бор и Ландау, предвкушали радикальные изменения в основаниях физики, которые бы сделали теорему Нётер неприменимой. Но и квантовая теория в целом (которой не мог знать Бор), и Главные теории в частности (которых не мог знать Ландау) построены на тех же самых принципах, которыми пользовалась Нётер для доказательства своей теоремы, а именно – на принципах гамильтоновой механики. Как я упомянул в основном тексте, было бы очень желательно иметь более абстрактное, менее техническое основание.

## Квантовая красота IV: Доверяем красоте

*Блаженны те, кто веруют в то, что они видят.*

Объединение взаимодействий и объединение взаимодействия с веществом – это две теоретические программы, которые уже далеко продвинулись. Как мы обсудили, они достигли значительной объяснительной силы и предполагают существенно новые эффекты. Эти следствия можно проверить с помощью конкретных, выполнимых экспериментов, и они проверяются сейчас. Есть еще два объединения в фундаментальной физике, которые, как мне кажется, были бы наиболее желательны, но в их случае существующие идеи пока не такие зрелые.

Одно из них – это объединение наших описаний вещества и информации. Первое основано, говоря грубо и в общих чертах, на уравнениях, которые описывают потоки энергии и заряда. Формально эти уравнения выводятся путем манипуляций с величиной, называемой действием. Действие имеет некоторые любопытные связи с энтропией, а энтропия имеет тесные связи с информацией, поэтому возможность объединенной теории очень заманчива. Такая теория могла бы предоставить более абстрактное понимание теоремы Нётер и укрепить ее основания.

Другое – это объединение динамики с начальными условиями, упомянутое несколько раз в нашей главной медитации.

То, что Фрэнсис Крик назвал «Удивительной гипотезой», находится на границе с физикой, но очень важно для любого обсуждения окончательного объединения, а именно: сознание, также называемое Разумом, является эмерджентным свойством Материи. Поскольку нейромолекулярная наука прогрессирует, не встречая на пути никаких препятствий, и компьютеры воспроизводят все больше и больше типов поведения, которые мы называем интеллектом у человека, эта гипотеза кажется неизбежной. Но что именно она означает, остается, мягко говоря, туманным.

Красивый ответ?

*Уолт Уитмен.*

В знаменитых строчках из «Листьев травы», которые мы вспоминали, Уолт Уитмен предвосхищал дополнительную. В духе этого заключительного раздела я бы хотел продолжить его стихи в том же направлении:

Мир широк,  
Он вмещает в себе мириады сущностей.  
Я смотрю всеобъемлющим взором  
И говорю тебе, что я вижу.  
По-твоему, я противоречу себе?  
Ну что же, значит, я противоречу себе.  
Если ты еще не ослеплен блеском:  
Посмотри по-другому и восхитись.

***Анализ функций путем изучения их вариаций на небольших масштабах, как в (дифференциальном) исчислении.***

Математически самое простое периодическое движение – это такое движение, при котором частица движется с постоянной скоростью по кругу. Если мы проследим за высотой частицы, движущейся таким образом, мы получим самое простое периодическое движение, которое можно представить в виде линии. Оно называется синусоидальным (гармоническим) колебанием. По ссылке [www.youtube.com/watch?v=mitioODQYgI](http://www.youtube.com/watch?v=mitioODQYgI) вы можете посмотреть на художественное представление синусоидального колебательного движения под музыку Баха.

По ссылке <http://www.mathopenref.com/trigsinewaves.html> вы можете найти более простое представление, которое также содержит анимацию важной физической реализации такого рода движения, изображенной в виде колебаний груза на пружине вокруг точки равновесия. Если вы сделаете развертку этого движения во времени, т. е. нарисуете график высоты груза как функцию времени, вы получите функцию синуса. Синусоидальные волны возникают в описании звуковых волн чистого тона и световых волн чистых спектральных цветов. В чистом тоне изменение плотности и давления в пространстве (относительно их средних значений) принимает форму синусоидальной волны, так же как и изменение этих величин во времени в любой фиксированной точке в пространстве. Сходным образом в свете чистого спектрального цвета электрическое

и магнитное поля изменяются синусоидально.

Таким образом, когда наше ухо раскладывает аккорд на составляющие его тона или когда призма раскладывает входящий в нее световой луч на спектральные цвета, они производят определенный вид анализа, который математически довольно сильно отличается от того, что основан на тщательном изучении поведения на малых временных интервалах и дальнейшем построении более общего поведения на основе полученных результатов. Математический анализ функций, который разлагает их на синусоидальные составляющие с различными длинами волн или частотами, называется анализом Фурье, в честь французского математика Жозефа Фурье (1768–1830). Анализ Фурье и соответствующий ему синтез являются мощными инструментами, дополнительными по отношению к анализу бесконечно малых в (дифференциальном) исчислении.

***Нет убедительной теории, которая бы объясняла, почему вообще Природа позволила себе это трехкратное повторение семейств.***

Различие между семействами (поколениями) частиц можно рассматривать как еще одно свойство, аналогичное сильному или слабому цветовому заряду. Можно определить пространство свойства, связанное с принадлежностью к поколению. Таким образом, разные поколения можно было бы охарактеризовать еще одним набором цветов, причем первое поколение было бы (скажем) бледно-зеленым, второе лавандовым, а третье нежно-розовым. Энтони Зи и я, среди прочих, допустили, что это пространство свойства также может поддерживать локальную симметрию. Но поскольку нет никаких намеков ни в одном осуществленном эксперименте на превращения, которые могли бы быть вызваны калибровочными бозонами этой гипотетической симметрии, любая «симметрия поколений» подобного типа должна быть очень сильно нарушена, а ее калибровочные бозоны должны быть очень тяжелыми.

***Однако остальные взаимодействия реагируют на заряды, которые могут иметь разные знаки.***

Есть один интересный вопрос: почему Вселенная на больших масштабах электрически нейтральна и нейтральна ли вообще? Если бы она

не была нейтральна, то электрические силы нельзя было бы скомпенсировать в точности и обратить в ноль, и тогда они, а не гравитация, могли бы доминировать в астрономии. Мы могли бы также задаться вопросом о полном моменте импульса. Если бы он не был равен нулю, Вселенная разделилась бы на определенным образом ориентированные друг относительно друга вихреподобные структуры. Какова бы ни была причина этого, Вселенная, похоже, сбалансирована по заряду и моменту импульса.

В то же время для появления людей как физических существ важно то, что Вселенная не содержит равное количество барионов и антибарионов. Существуют правдоподобные идеи о том, как эта асимметрия возникла на ранних этапах Большого взрыва, начиная с максимально симметричных условий, а затем была зафиксирована в некотором состоянии. Для обзора этого вопроса см. [frankwilczek.com/Wilczek\\_Easy\\_Pieces/052\\_Cosmic\\_Asymmetry\\_between](http://frankwilczek.com/Wilczek_Easy_Pieces/052_Cosmic_Asymmetry_between)

***Гравитация приводит к притяжению между телами.***

Эйнштейн предвидел возможность существования того, что сейчас называют «темной энергией». Он заметил, что метрический флюид может иметь характерную плотность энергии, которая и является в сущности «космологическим членом» Эйнштейна. Чтобы плотность была инвариантной относительно преобразований Галилея, дополнительно должно существовать такое же по величине, но противоположное по знаку давление. Таким образом, положительная плотность метрического флюида связана с отрицательным давлением. В этом случае мы говорим, что существует положительный космологический член. И, завершая логическую цепочку, отрицательное давление способствует расширению. Следовательно, положительная плотность «темной энергии» связана с тенденцией к расширению. В этом смысле она создает гравитационное отталкивание.

Также возможно рассмотреть отрицательный космологический член: если плотность энергии метрического флюида отрицательна, мы получаем положительное давление и тенденцию к сжатию.

Позднее физики осознали, что не только метрический флюид, но также и другие флюиды, которыми пронизано наше описание Природы, могут иметь конечную плотность энергии, либо положительную, либо отрицательную. В таком случае галилеева симметрия также требует, чтобы

они оказывали противоположное по знаку давление. Словосочетание «темная энергия» относится ко всем этим эффектам сразу, тогда как «космологический член» относится конкретно к метрическому флюиду. Физики не знают, как вычислить величину этих плотностей, если вообще имеет смысл говорить о них как об отдельных величинах. (См. **Перенормировка.**)

Литература на эту тему запутана и (поэтому) может сбить с толку. Вы можете найти больше информации по ссылкам [en.wikipedia.org/wiki/Cosmological\\_constant](http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmological_constant), [en.wikipedia.org/wiki/Dark\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Dark_energy) и [scholarpedia.org/article/Cosmological\\_constant](http://scholarpedia.org/article/Cosmological_constant). Основные определения и описания наблюдений не являются спорными, но в остальном теоретическая почва становится предательски ненадежной.

***Существует сложная связь между слабым взаимодействием, гиперзарядом и электромагнетизмом.***

Положение электромагнетизма в нашей Главной теории осложнено, поскольку он оказывается сцеплен со слабым взаимодействием. Проблема в том, что калибровочные бозоны, которые самым простым образом действуют на пространства свойств, отличаются от тех, которые имеют самые простые физические свойства. Фундаментально простые бозоны обычно называют  $B$  и  $C$ . Бозон  $B$  реагирует на разницу между желтым и фиолетовым слабыми зарядами, в то время как  $C$  реагирует на гиперзаряд. Гиперзаряд тесно связан с электрическим зарядом, но не равен ему. Фотон и  $Z$ -бозон математически являются комбинациями бозонов  $B$  и  $C$ . Фотон, который имеет нулевую массу, дает нам электромагнетизм, в то время как  $Z$ -бозон, открытый экспериментально в 1983 г., имеет массу, равную почти сотне протонов, и играет очень ограниченную роль в обычном мире.

Гиперзаряд отдельной сущности – это *средний* электрический заряд частиц, которые она представляет. (Иногда по историческим причинам также вводится дополнительный множитель «2».) Поскольку слабое взаимодействие связывает частицы в пределах одной сущности и способно изменять электрический заряд, мы не можем приписать этой сущности определенный электрический заряд, но гиперзаряд является подходящей заменой.

Книга Роберта Эртера «Теория почти всего» (The Theory of Almost

Everything), изданная Plume, – хорошее изложение идей Главных теорий сильного и электрослабого взаимодействий для широкого круга читателей, дополнительное по отношению к нашему изложению.

Статья [arxiv.org/pdf/hep-ph/0001283v1.pdf](https://arxiv.org/pdf/hep-ph/0001283v1.pdf) (автор – S. F. Novaes) – далеко не легкое чтение, но ее вторая часть содержит основные уравнения в самой, наверное, простой форме, в какой только можно их представить, тогда как первая часть – полезную историческую справку и описание базовых понятий.

### ***Техническое обсуждение точного определения магнитного поля...***

Связь между магнитными полями и силами, которые они вызывают, не проста. Магнитная сила, действующая на движущуюся заряженную частицу, пропорциональна индукции магнитного поля, величине заряда и скорости частицы. Направление силы перпендикулярно плоскости, в которой лежат вектор скорости частицы и вектор направления магнитного поля. Наконец, направление силы задается правилом правой руки, если взять направление вращения от вектора скорости к вектору магнитного поля. Все это описано по ссылке [en.wikipedia.org/wiki/Lorentz\\_force](https://en.wikipedia.org/wiki/Lorentz_force). Вы можете найти гораздо больше информации на тему магнитных полей в блестящей статье [en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_field](https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_field). Книга лауреата Нобелевской премии Мелвина Шварца «Основы электродинамики» (Principles of Electrodynamics) издательства Dover – это современный, понятно написанный учебник.

### ***Обычное правило правой руки, призванное разрешить эту неоднозначность...***

Физика нейтрино – это целый мир, в котором преобладают героические эксперименты в экзотических местах. Веб-сайт, посвященный эксперименту IceCube («ледяной куб») – эксперименту, в котором длинные цепочки фотоумножителей опускаются глубоко в толщу антарктического льда, – содержит обширную дискуссию относительно этой области с увлеченным описанием экспериментальных методов, обширной исторической справкой и хорошей коллекцией ссылок на другие источники по адресу [www.icecube.wisc.edu/info/neutrinos](http://www.icecube.wisc.edu/info/neutrinos).

Статья в «Википедии» [en.wikipedia.org/wiki/Neutrino](https://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino) также хороша,

хотя и менее самодостаточна.

### **Описание математического аппарата спиноров.**

Спиноры возникают в нескольких разных местах в физике и родственных ей областях.

Спиноры можно определить для любого количества измерений, при этом их тонкие свойства интересным образом зависят от этого количества.

В некотором смысле самое впечатляющее использование спиноров – поскольку оно такое простое и геометрическое – это их применение в компьютерной графике. Спиноры предоставляют самый лаконичный, самый эффективный способ рассмотрения вращений в трехмерном пространстве. Если вам нужно вычислить множество вращений за короткое время, скажем, при создании интерактивной игры, оказывается выгодным использовать спиноры.

Самое простое применение такого типа спиноров в физике – это описание спиновой степени свободы электронов и других частиц со спином  $\frac{1}{2}$ . Другой вид спиноров – подходящий для четырехмерного пространства-времени – появляется в уравнении Дирака для релятивистских электронов. Еще один вид спиноров, связанный с 10-мерным пространством, появляется при описании сущности, которая представляет вещество в схеме объединения  $SO(10)$ . Другие виды спиноров появляются в теории коррекции ошибок для квантовых компьютеров. Что связывает три последних появления спиноров, если они вообще как-то связаны, остается до сих пор неясным. Возможно, в этом заключается еще один шанс для искателей объединения.

Я был бы рад оказаться неправым на этот счет, но боюсь, что скольконибудь глубокое понимание спиноров находится за пределами человеческой интуиции, если только ей не способствует специальный опыт и знание специальной алгебры. Статья в «Википедии» [en.wikipedia.org/wiki/Spinor](http://en.wikipedia.org/wiki/Spinor) написана очень хорошо, но и она не может совершить это чудо. Великий современный математик Майкл Атия прочитал лекцию «Что такое спинор?» («What is a Spinor?»), которую вы можете найти на YouTube по ссылке [youtube.com/watch?v=SBdW978Ii\\_E](https://youtube.com/watch?v=SBdW978Ii_E). Эта лекция сочетает в себе интересные случаи из жизни и общечеловеческую мудрость, с одной стороны, и очень продвинутую математику – с другой.

Одна из вещей, которую показывают спиноры, это то, что поворот на  $360^\circ$  – это не то же самое, что никакого поворота вообще, в то время как поворот на  $720^\circ$  градусов, т. е. в два раза больше – то же самое. Это различие также можно увидеть, проведя эксперимент, который можно сделать в домашних условиях, посмотрев видео здесь: [youtube.com/watch?v=fTlbVLGBm3Q](https://www.youtube.com/watch?v=fTlbVLGBm3Q).

*Здесь слово «простое» имеет определенное техническое значение...*

Две ссылки, упомянутые ранее, подойдут и в этом случае: [www.youtube.com/watch?v=mitioODQYgI](https://www.youtube.com/watch?v=mitioODQYgI) и <http://www.mathopenref.com/trigsinewaves.html>. Я добавлю сюда две классические книги великих физиков по акустике: «Учение о слуховых ощущениях как физиологическая основа для теории музыки» (On the Sensations of Tone) Г. Гельмгольца и «Теория звука» (Theory of Sound) лорда Рэля (Дж. Стретт). Обе доступны онлайн бесплатно, а также в симпатичных изданиях издательства Dover.

## Рекомендованная литература

Предлагаю вашему вниманию небольшой список литературы для дальнейшего изучения тем, затронутых в нашей медитации. Я разделил его на три категории: классика, квантовая теория и современные достижения. Каждая из названных книг имеет для меня большое значение [\[125\]](#).

## Классика (доквантовый период)

Ничто не может заменить возможность напрямую пообщаться с великими мыслителями с помощью их лучших трудов. Поэтому, несмотря на то, что техническое и научное содержание приведенных ниже книг уже утратило силу, я не колебался, рекомендуя их вашему вниманию. Часть этого материала находится на публичных ресурсах и доступно в Интернете, если вы знаете, что именно ищете. Но хорошо изданные бумажные книги очень привлекательны и проверены временем, их удобно носить с собой, они дают приятные тактильные и эстетические ощущения, так что, возможно, вы захотите рассмотреть их как альтернативу.

Plato, *The Collected Dialogues of Plato, Including the Letters*, edited by Edith Hamilton and Huntington Cairns, translated by Lane Cooper (Princeton University Press). Есть русские переводы, например: Платон. Диалоги. – М.: Мысль, 1986. Особое внимание обратите на диалог *Timaeus* («Тимей»).

Bertrand Russell, *The History of Western Philosophy* (Simon & Schuster). Есть русские переводы, например: Рассел Б. История западной философии. – Новосибирск: Сибирское университетское издательство, 2001. Особое внимание обратите на Книгу 1 («Древняя философия», *Ancient Philosophy*) и часть 1 Книги 3 («От Возрождения до Юма», *From the Renaissance to Hume*).

Galileo Galilei, *The Starry Messenger* (Levenger). Есть русский перевод: Галилей Галилео. Звездный вестник. – М.: Наука, 1964.

Isaac Newton, *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy* (University of California Press). При обращении к этому шедевру желателен хороший наставник. К счастью, рекомендуемое великолепное издание представляет собой новый перевод с латыни на английский, сделанный Бернардом Коэном и Анне Уитман, с замечательным введением и комментариями Коэна. На русском языке главный труд Ньютона издан в замечательном переводе академика А. Н. Крылова: Ньютон И. Математические начала натуральной философии. – М.: Наука, 1989.

Isaac Newton, *Opticks* (Dover Publications). Это гораздо более легкий для восприятия труд Ньютона. Я рекомендую очень специальное и недорогое издание с предисловием Альберта Эйнштейна, введением сэра Эдмунда Уиттекера, предисловием Бернарда Коэна и полезным аналитическим содержанием Дюэйн Роллер. На русском языке «Оптика,

или Тракта́т об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света» Ньютона издавалась в 1927 и 1954 гг.

John Maynard Keynes, *Newton, the Man* (Джон Мейнард Кейс «Ньютон, Человек»). Это удивительное короткое эссе, дань уважения одного гения к другому, совсем не похожему на него, доступно на [www-history.mcs.st-and.ac.uk/Extras/Keynes\\_Newton.html](http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Extras/Keynes_Newton.html).

James Clerk Maxwell, *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, edited by W. D. Niven (Dover Publications). В качестве альтернативы на русском языке можно рекомендовать издание Дж. К. Максвелл «Статьи и речи» (М.: Наука, 1968), которое цитировалось при выполнении данного перевода.

Albert Einstein, H. A. Lorentz, H. Weyl, and H. Minkowski, *The Principle of Relativity*, with notes by A. Sommerfeld (Dover Publications). Это потрясающая коллекция! В нее включены основные статьи Эйнштейна по специальной и общей теории относительности, его краткие заметки по превращению массы в энергию, выступление Минковского, представляющее современную концепцию пространства-времени, и ранняя попытка Вейля создать единую теорию поля, где впервые появляется понятие «калибровочной инвариантности». Эти бумаги являются записями исследователей, и никто не ждет от обычных читателей, что они смогут проследить за всеми математическими деталями, но многие из них отражают содержательные дискуссии и замечания, которые имеют ценность как литературные произведения. Есть близкий по содержанию сборник на русском языке: Пуанкаре А., Эйнштейн А., Лоренц Г. А., Минковский Г. Принцип относительности. – Л.: ОНТИ, 1935. Укажем также на фундаментальное издание: Эйнштейн А. Собрание научных трудов. – М.: Наука, 1965–1967. Работы по теории относительности находятся в томах 1 и 2.

## Немного квантовой теории

В этом разделе будет гораздо труднее справиться с оригинальными трудами без солидного предварительного багажа знаний по математике и физике. Но обычные читатели могут насладиться начальными частями текстов мастеров и описаний открытий.

P. A. M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics* (Oxford University Press). Начало этой книги дает основные идеи и (правильное) впечатление об огромной глубине проблемы. Есть русский перевод: П. А. М. Дирак. *Принципы квантовой механики*. – М.: Наука, 1979.

R. P. Feynman, R. Leighton, and M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics* (Addison-Wesley). Есть русские издания, например: Фейнман Р. Ф., Лейтон Р., Сэндс М. *Фейнмановские лекции по физике*. – М.: Эдиториал УРСС, 2004. Третий том посвящен квантовой теории, и первые его части содержат основные понятия. Начало первого тома представляет физику в целом (какой она была до появления Главной теории) и затем дает введение в понятия механики. Начало второго тома представляет введение в понятия электромагнетизма. На все части этого труда наложила отпечаток уникальная комбинация пронизательности и вдохновения, свойственная Ричарду Фейнману.

Henry A. Voorse, ed., *The World of the Atom* (Basic Books) («Мир атома», под ред. Генри Бурса). Это очень хорошо продуманная коллекция отрывков из оригинальных работ, начиная с Лукреция и заканчивая первопроходцами физики элементарных частиц, снабженная очень полезными комментариями. Она показывает, как анализ вещества привел людей к созданию чего-то столь странного и чудесного, как квантовая теория.

## Современные достижения

Веб-сайт Нобелевского фонда [nobelprize.org](http://nobelprize.org) является очень ценным ресурсом. Он содержит детальные описания получивших премию работ начиная с 1901 г., а также речи лауреатов.

Информация на веб-сайте Группы данных по элементарным частицам (Particle Data Group, [pdg.lbl.gov](http://pdg.lbl.gov)) по большей части предназначена для профессионалов, но раздел Reviews, Tables, Plots включает в себя основательные обзоры идей с переднего края физики, вступительные части которых стоят того, чтобы их изучить. Самое важное: блуждая по этому сайту, вы получите представление о впечатляющих, всесторонних эмпирических доказательствах наших базовых теорий.

Новые исследовательские работы по физике обычно вначале появляются на сайте [arXiv.org](http://arXiv.org). Возможно, вам захочется взглянуть, как выглядит физическая наука непосредственно в процессе ее создания. Конечно, только очень небольшая часть этих работ пройдет проверку временем.

*Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Стэнфордская энциклопедия философии) на [plato.stanford.edu](http://plato.stanford.edu) содержит множество увлекательных и головоломных статей. Ценными русскоязычными сетевыми источниками являются философский раздел Библиотеки Гумер ([www.gumer.info/bogoslov\\_Buks/Philos/index\\_philos.php](http://www.gumer.info/bogoslov_Buks/Philos/index_philos.php)) и Психологическая библиотека Киевского фонда содействия развитию психической культуры на [psylib.org.ua](http://psylib.org.ua).

Хотя во многом эта книга связана с чистой математикой, *Princeton Companion to Mathematics*, edited by Timothy Gowers (Princeton University Press) («Принстонский справочник по математике» под редакцией Тимоти Гауэрса) будет интересен всем, кому понравилась «Красота физики». Сейчас я редактирую *Princeton Companion to Physics* («Принстонский справочник по физике»), который должен появиться в 2018 г.

## Иллюстрации

Эту работу выполнил специально для «Красоты физики»... Printed by permission of He Shuifa.

Илл. 1. Courtesy of the author.

Илл. 2. Courtesy of the author.

Илл. 3. Woodcut from Franchino Gaffurio, *Theorica Musice, Liber Primus* (Milan: Ioannes Petrus de Lomatino, 1492).

Илл. 4. Albrecht Dürer, *Melancholia I*, copper plate engraving, 1514.

Илл. 5. Courtesy of the author.

Илл. 6. Courtesy of the author.

Илл. 7. Five carved spherical balls from Scotland, Sandstone, Neolithic – Early Bronze Age © Ashmolean Museum, University of Oxford

Илл. 8. From Ernst Haeckel, *Kunstformender Natur*, 1904. Plate 1, Phaeodaria.

Илл. 9. Model of Johannes Kepler's Solar System theory, on display at the Technisches Museum Wien (Vienna), photograph © Sam Wise, 2007.

Илл. 10. Courtesy of the author.

Илл. 11. [www.vertice.ca](http://www.vertice.ca).

Илл. 12. Filippo Brunelleschi, perspective demonstration, 1425.

Илл. 13. Abell 2218, Space Telescope Science Institute, NASA Contract NAS5-26555.

Илл. 14. Diary of Isaac Newton, University of Cambridge Library.

Илл. 15. Sir Godfrey Kneller, portrait of Isaac Newton, oil on canvas, 1689.

Илл. 16. Galileo Galilei, *Sidereus Nuncius*, 1610.

Илл. 17. Sir Isaac Newton, *A Treatise of the System of the World*, 1731, p. 5.

Илл. 18. Courtesy of the author.

Илл. 19. Sir Isaac Newton, *The Mathematical Principles of Natural Philosophy*, vol. 1, 1729.

Илл. 20. Newton Henry Black and Harvey N. Davis, *Practical Physics* (New York: Macmillan, 1913), figure 200, p. 242.

Илл. 21. James Clerk Maxwell, «On Physical Lines of Force,» *Philosophical Magazine*, vol. XXI, Jan. – Feb. 1862. Reprinted in *The Scientific Papers of James Maxwell* (New York: Dover, 1890), vol. 1, pp. 451–513.

Илл. 22. © Bjørn Christian Tørrissen, «Spiral Orb Webs Showing Some Colours in the Sunlight in a Gorge in Karijini National Park, Western Australia, Australia,» 2008.

- Илл. 23.* James Clerk Maxwell with his color top, 1855.  
*Илл. 24.* Courtesy of the author.  
*Илл. 25.* Hans Jenny, *Kymatic*, vol. 1, 1967.  
*Илл. 27.* Courtesy of the author.  
*Илл. 28–29.* © D&A Consulting, LLC. *Below:* Care of Wikimedia contributor Alexander AIUS, 2010.  
*Илл. 30–31.* Wikimedia user Benjahbmm27, 2007. *Below:* Harold Kroto, © Anne-Katrin Purkiss, reprinted by permission of Harold Kroto.  
*Илл. 33.* Printed by permission of István Orosz.  
*Илл. 34.* *C. 304: Mechanic's Magazine*, cover of vol. II (London: Knight & Lacey, 1824).  
*Илл. 35.* Andreas S. Kronfeld, «Twenty-first Century Lattice Gauge Theory: Results from the QCD Lagrangian,» *Annual Reviews of Nuclear and Particle Science*, March 2012. Reprinted by permission of Andreas Kronfeld.  
*Илл. 36.* Courtesy of the author.  
*Илл. 37.* Emmy Noether, 1902.  
*Илл. 38–39.* Created by Betsy Devine.  
*Илл. 40.* Courtesy of the author.  
*Илл. 41.* Courtesy of the author.  
*Илл. 42.* Wikimedia.  
*Илл. 43.* NASA Mars Rover image, NASA/JPL–Caltech/MSSS/TAMU.

### **Вклейки**

- A:* Printed by permission of He Shuifa.  
*B:* Detail of Pythagoras from Raphael, *Scuola di Atene*, fresco at Apostolic Palace, Vatican City, 1509–11.  
*C:* Courtesy of the author.  
*D:* RASMOL image of 1AYN PBD by Dr. J.-Y. Sgro, UW-Madison, USA. RASMOL: Roger Sayle and E. James Milner-White. «RasMol: Biomolecular Graphics for All,» *Trends in Biochemical Sciences (TIBS)*, September 1995, vol. 20, no. 9, p. 374.  
*E:* Salvador Dalí, *The Sacrament of the Last Supper*. Image courtesy of the National Gallery of Art, Washington, D.C.  
*F:* Camille Flammarion, *L'atmosphère: météorologie populaire*, 1888.  
*G:* Pietro Perugino, *Giving of the Keys to St. Peter*, fresco in Sistine Chapel, 1481–82.  
*H:* Courtesy of the author.  
*I:* Fra Angelico, *The Transfiguration*, fresco, c. 1437–46.

*J*: © Molecular Expressions.  
*K*: William Blake, *Newton*, pen, ink, and watercolor on paper, 1795.  
*L*: William Blake, *Europe a Prophecy*, handcolored etching, 1794.  
*M*: «Phoenix Galactic Ammonite,» © Weed 2012.  
*N*: Courtesy of the author.  
*O*: Courtesy of the author.  
*P*: Spectrum image by Dr. Alana Edwards, Climate Science Investigations project, NASA. Reproduced by permission.  
*Q*: Courtesy of the author.  
*R*: R. Gopakumar, «The Birth of the Son of God,» digital painting print on canvas, 2011. Via Wikimedia Commons.  
*S*: William Blake, *The Marriage of Heaven and Hell*, title page, 1790.  
*T*: Courtesy of the author.  
*U*: Courtesy of the author.  
*V*: Claude Monet, *Grainstack (Sunset)*, oil on canvas, 1891. Juliana Cheney Edwards Collection, Museum of Fine Arts, Boston.  
*W*: Courtesy of the author.  
*X*: Photographs by Jill Morton, reproduced by permission.  
*Y*: Image created by Michael Bok.  
*Z*: Mantis shrimp by Jacopo Werther, 2010.  
*AA*: Image created by Michael Bok.  
*BB*: Courtesy of the author.  
*CC*: Courtesy of the author.  
*DD*: Via Wikimedia Commons.  
*EE*: Printed by permission of István Orosz.  
*FF*: Via Wikimedia Commons. Created by Michael Ströck, 2006.  
*GG*: Photograph by Betsy Devine; effects by the author.  
*HH*: Winter Prayer Hall, Nasir Al-Mulk Mosque, Shiraz, Iran.  
*II*: Courtesy of the author.  
*JJ*: Courtesy of the author.  
*KK*: Amity Wilczek photographed by Betsy Devine; effects by the author.  
*LL*: Photograph by Mohammad Reza Domiri Ganji.  
*MM*: Typoform, The Royal Swedish Academy of Sciences.  
*NN*: © CERN image library.  
*OO*: © Derek Leinweber, used by permission.  
*PP*: © Derek Leinweber, used by permission.  
*QQ*: Courtesy of the author.  
*RR*: Courtesy of the author.  
*SS*: Courtesy of the author.

*TT*: Courtesy of the author.

*UU*: Courtesy of the author.

*VV*: Courtesy of the author.

*WW*: Courtesy of the author.

*XX*: © Derek Leinweber, used by permission.

*YY*: Caravaggio, *The Incredulity of St. Thomas*, oil on canvas, 1601–2.

*ZZ*: Leonardo da Vinci, *Vitruvian Man*, ink and wash on paper, c. 1492.

*AAA*: Via NASA.

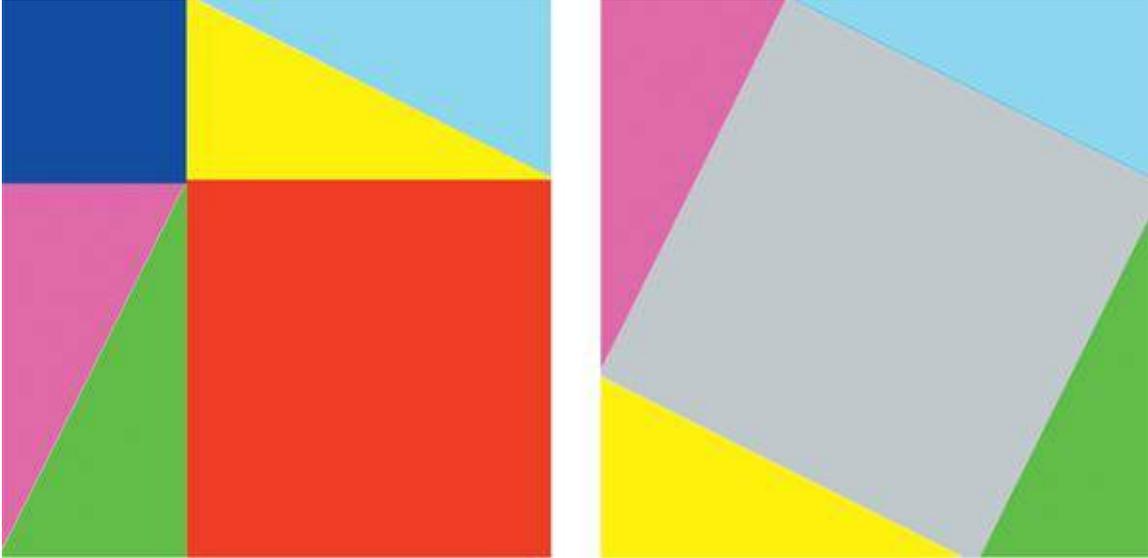
## Вклейка



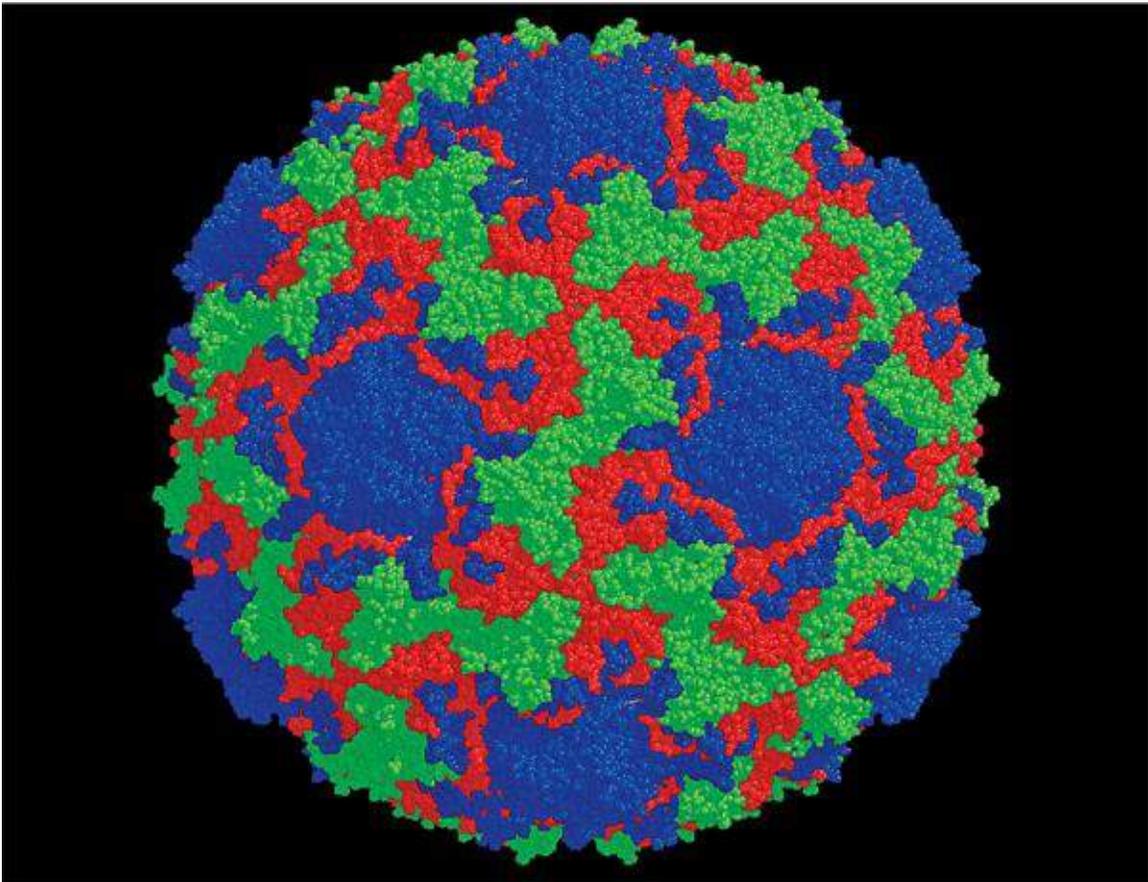
Илл. А. Фигура тайцзи кисти Хэ Шуйфа, использованная также в начале этой книги



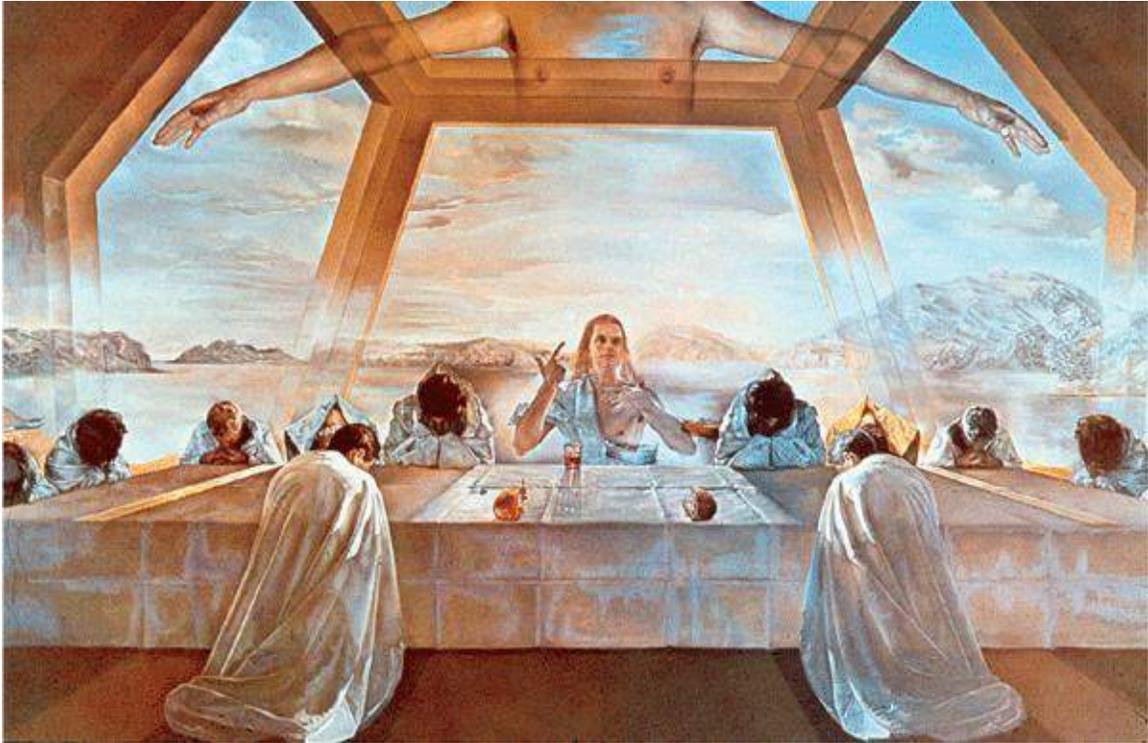
Илл. В. Пифагор за работой. Фрагмент фрески Рафаэля «Афинская школа»



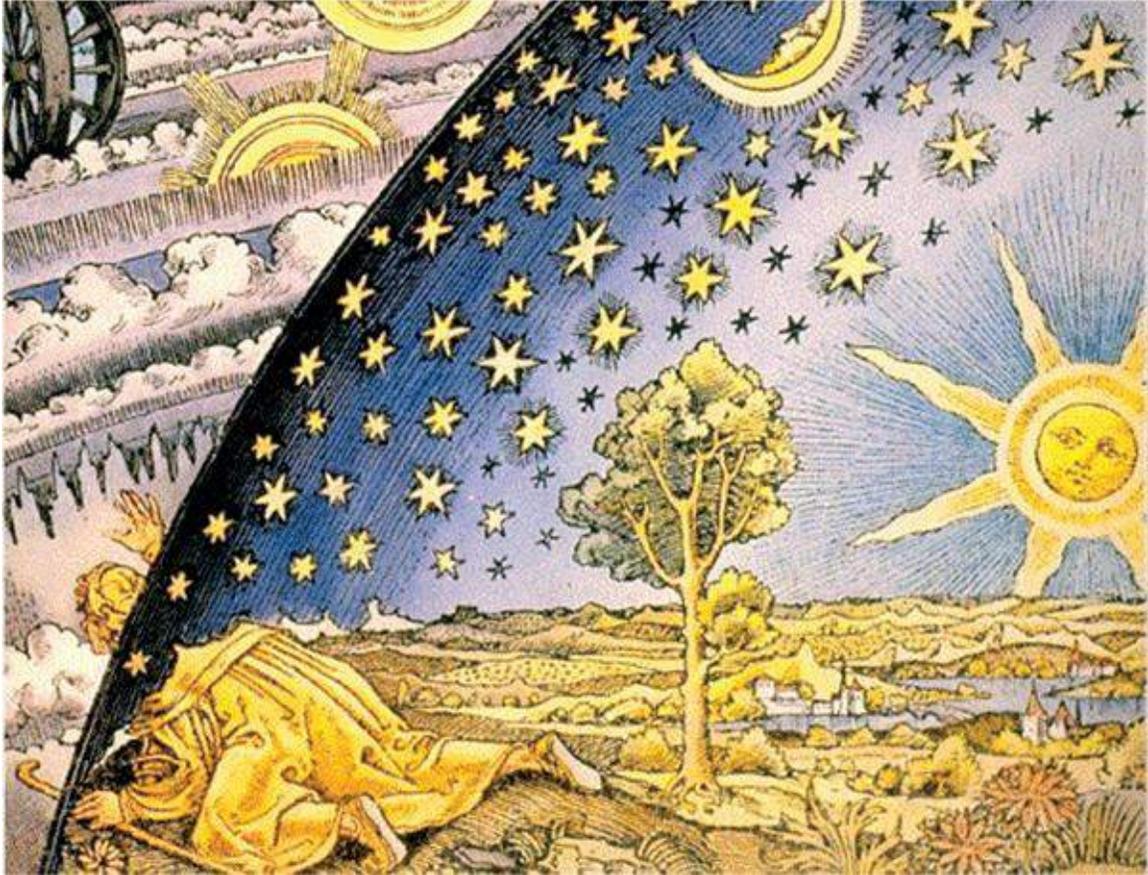
**Илл. С.** «Так просто!» Теорема Пифагора с первого взгляда



**Илл. D.** Типичная вирусная оболочка («экзоскелет»), являющая структуру додекаэдра и одновременно – икосаэдра!



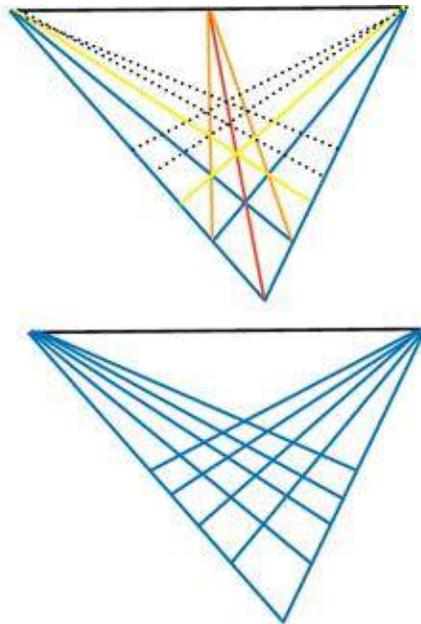
**Илл. Е.** На картине «Тайная вечеря» Сальвадора Дали таинство происходит внутри додекаэдра



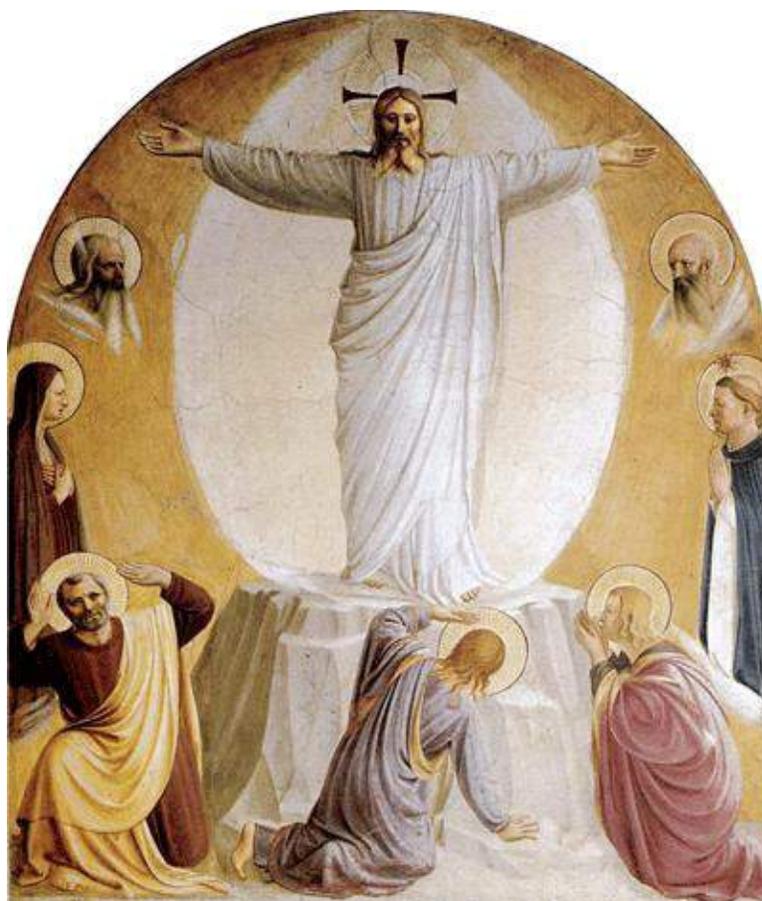
**Илл. Ф. Платон призывает нас заглянуть за пределы видимых явлений, если мы хотим открыть глубинную структуру реальности**



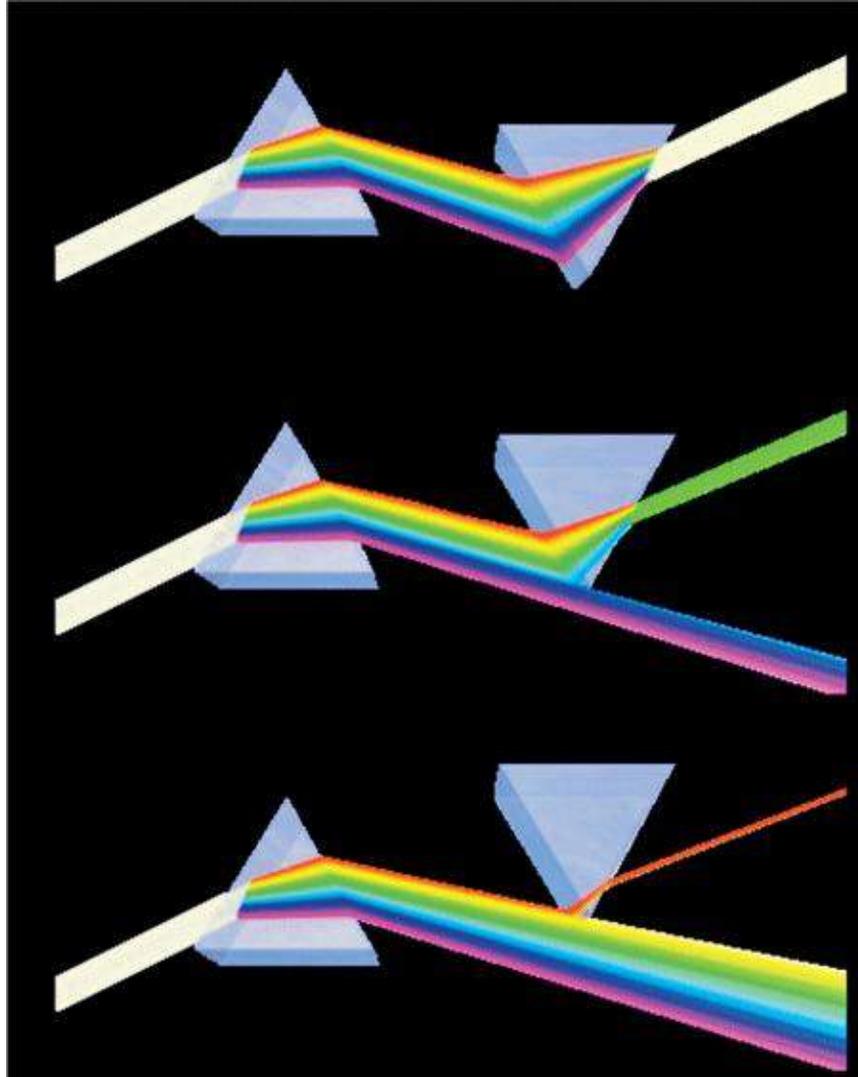
**Илл. Г.** Игра перспективы на картине Перуджино «Передача ключей Святому Петру»



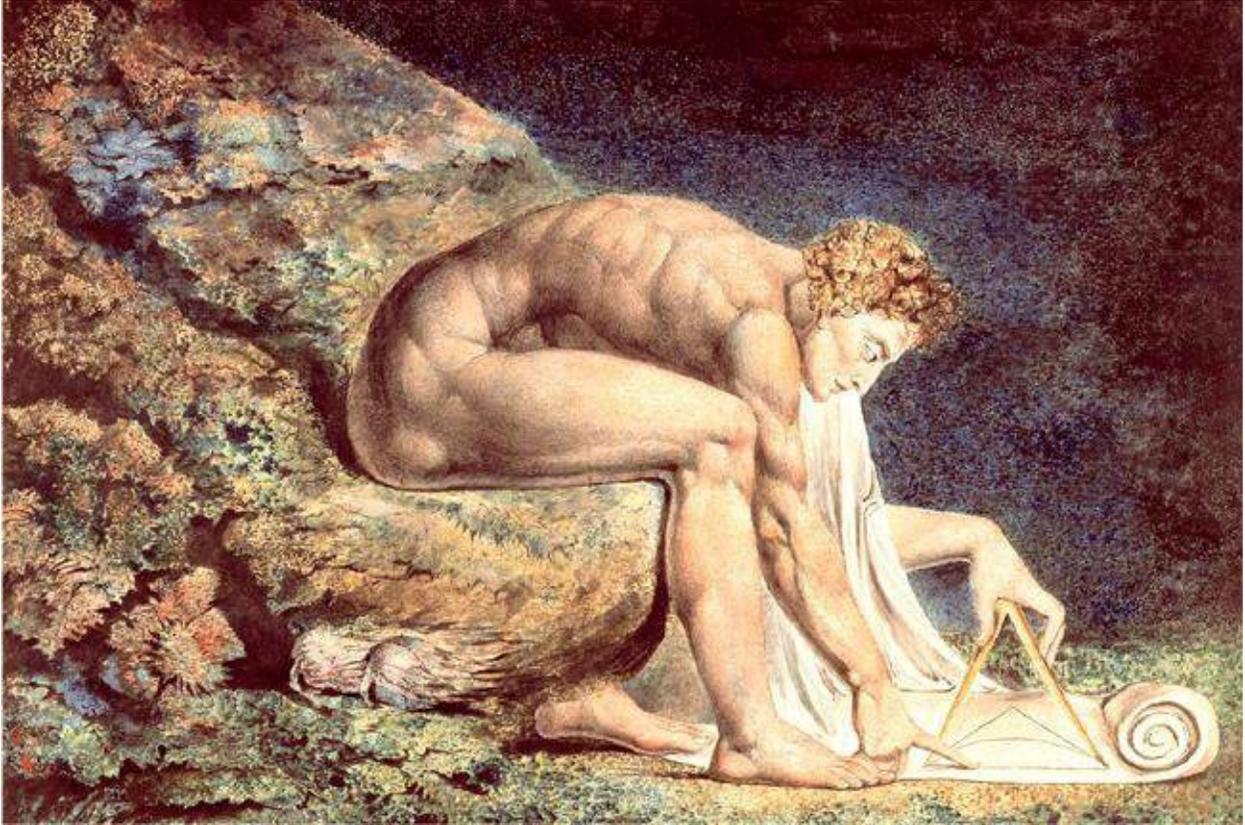
**Илл. Н.** Прекрасная геометрическая конструкция лежит в сердце перспективного рисунка



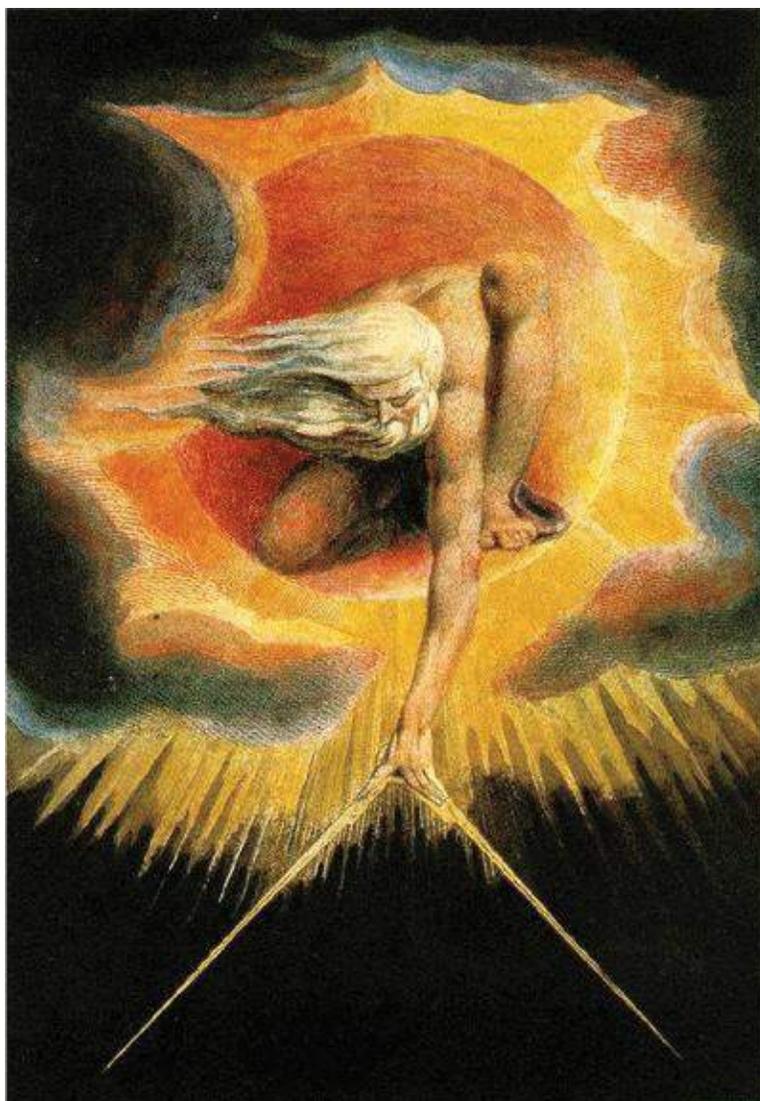
**Илл. I.** В западной христианской иконографии белый цвет является мощным символом чистоты и силы одновременно. Фреска «Преображение Господне» Фра Анжелико – впечатляющий тому пример



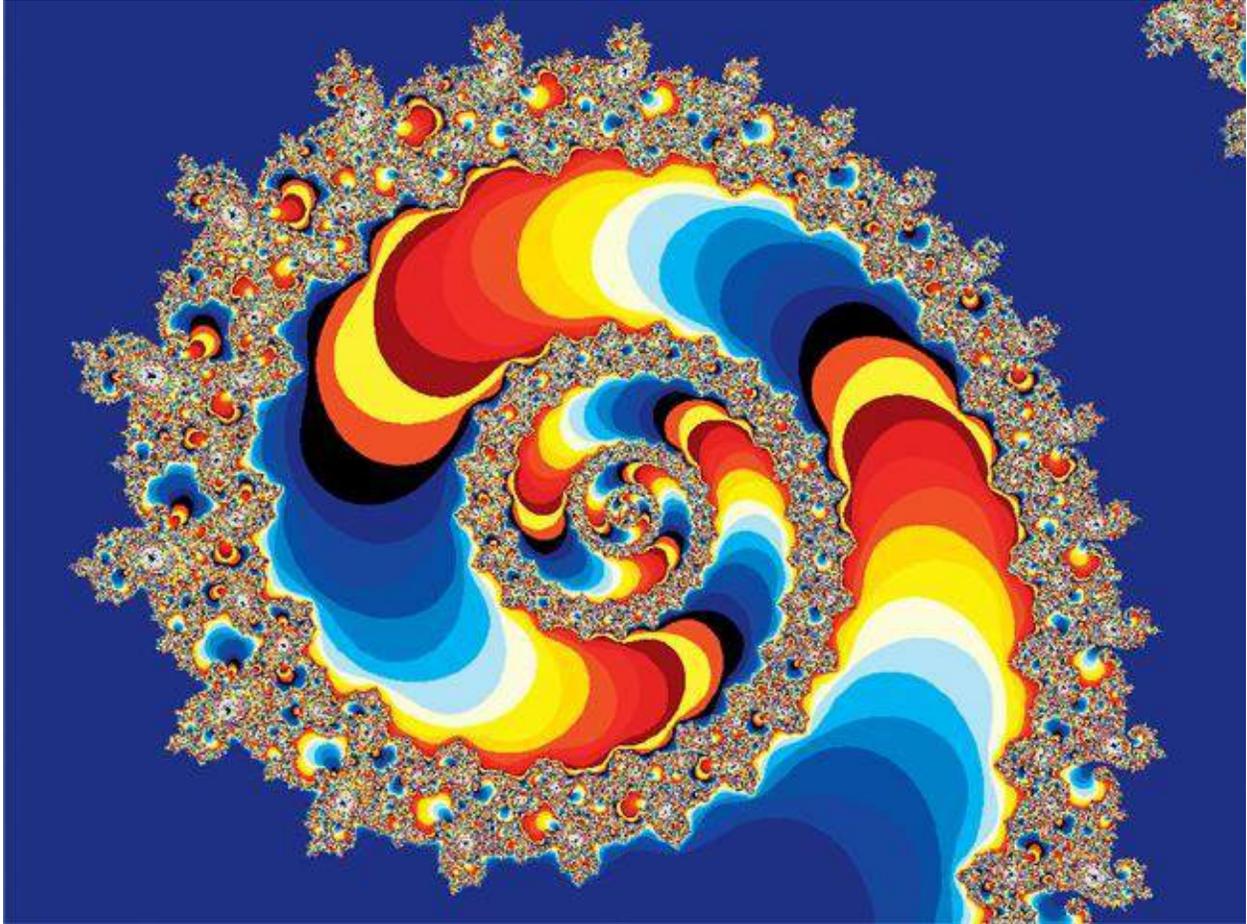
**Илл. J.** Цвета спектра, которые появляются при разделении белого света призмой, могут снова быть соединены в белый свет с помощью второй призмы



Илл. К. Исаак Ньютон за работой в представлении Уильяма Блейка

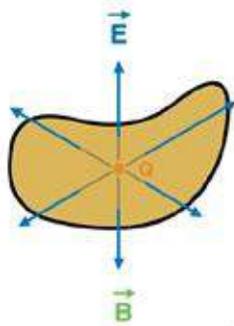


Илл. Л. Уризен, творец и законодатель мира, в изображении Блейка

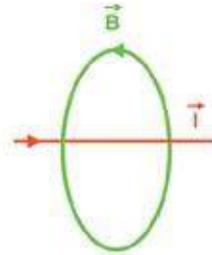


**Илл. М.** Регулярные фракталы строятся в соответствии с простыми, строгими математическими правилами. Это сложное изображение построено на компьютере с помощью короткой компьютерной программы

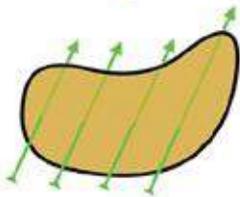
## Уравнения Максвелла



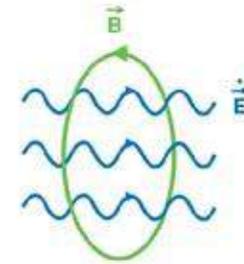
Закон Гаусса  
для напряженности  
электростатического  
поля



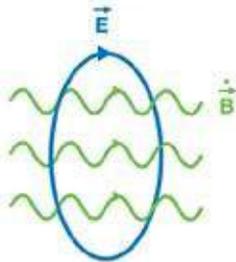
Закон  
Ампера



Закон Гаусса  
для магнитной  
индукции



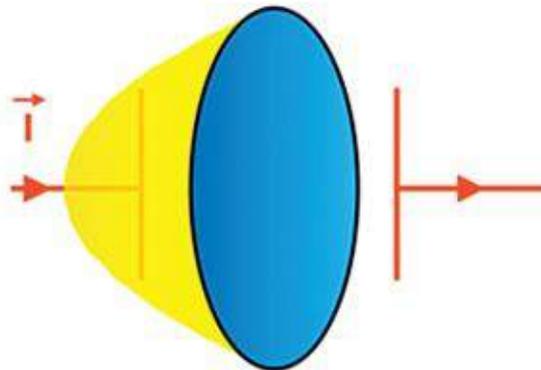
Закон  
Максвелла



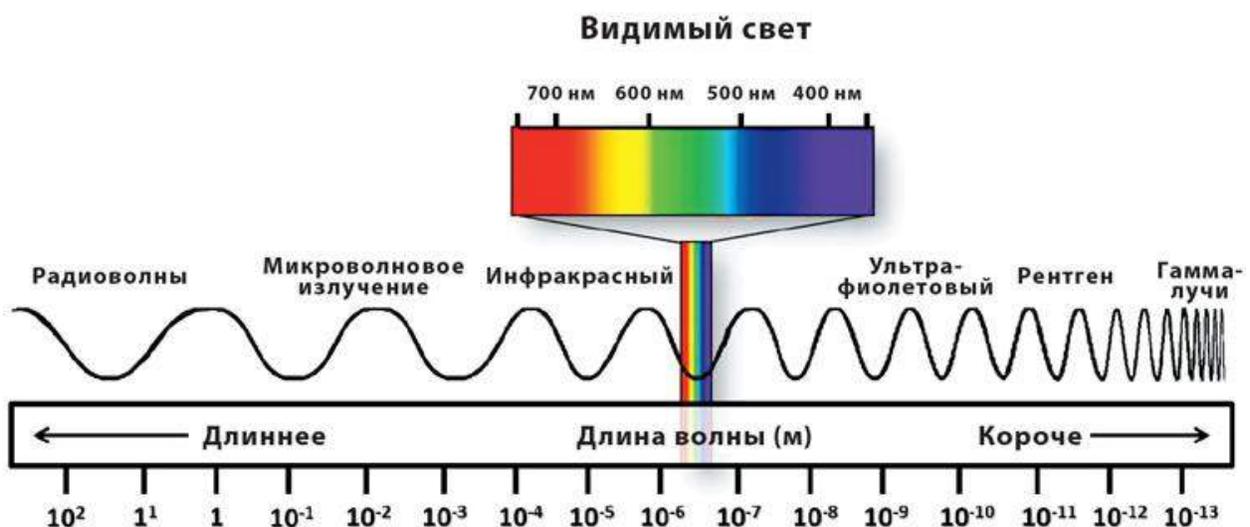
Закон Фарадея

Илл. N. Уравнения Максвелла – сущность электричества, магнетизма и света – в картинках

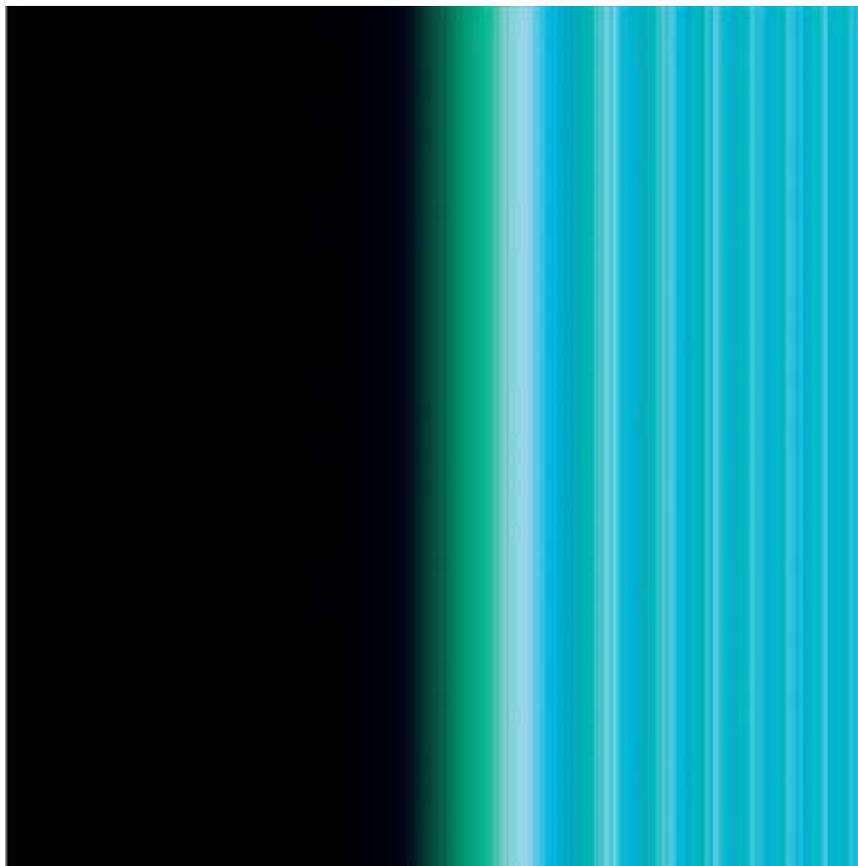
## Противоречие Максвелла



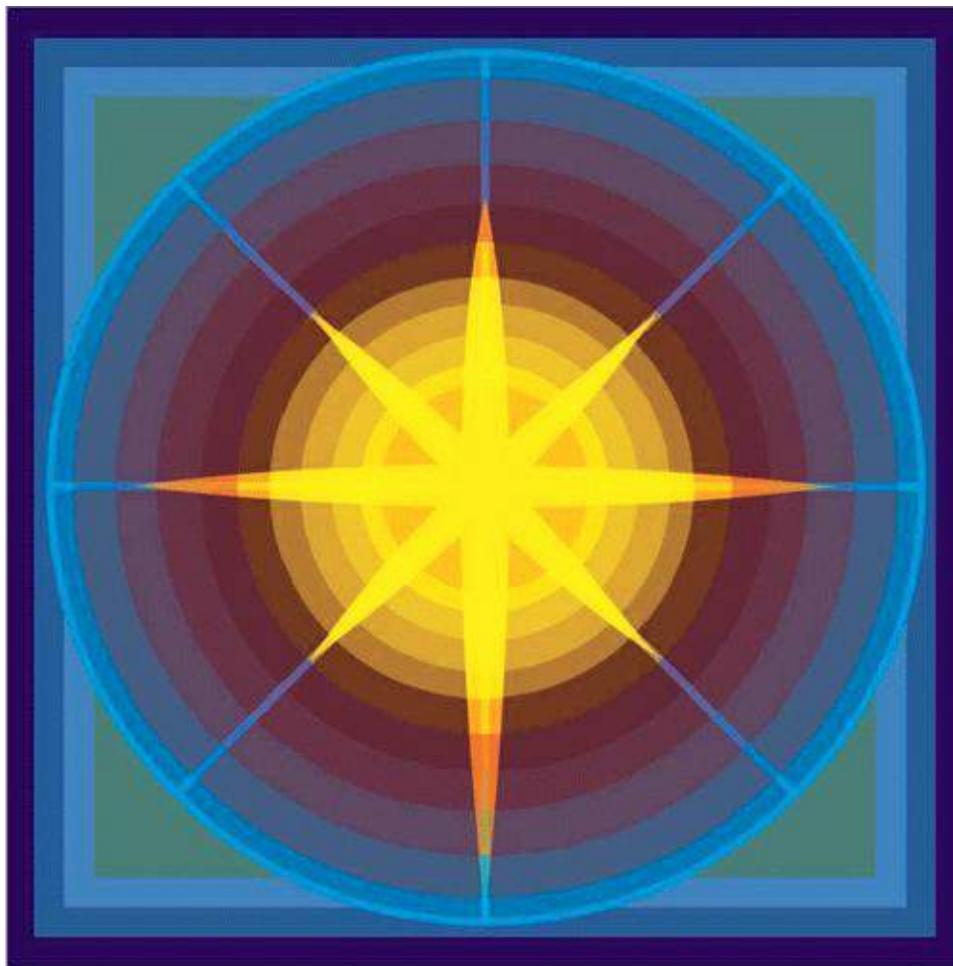
**Илл. О.** Противоречие, которое обнаружил и затем устранил Максвелл. Проходит ток через кольцо или нет?



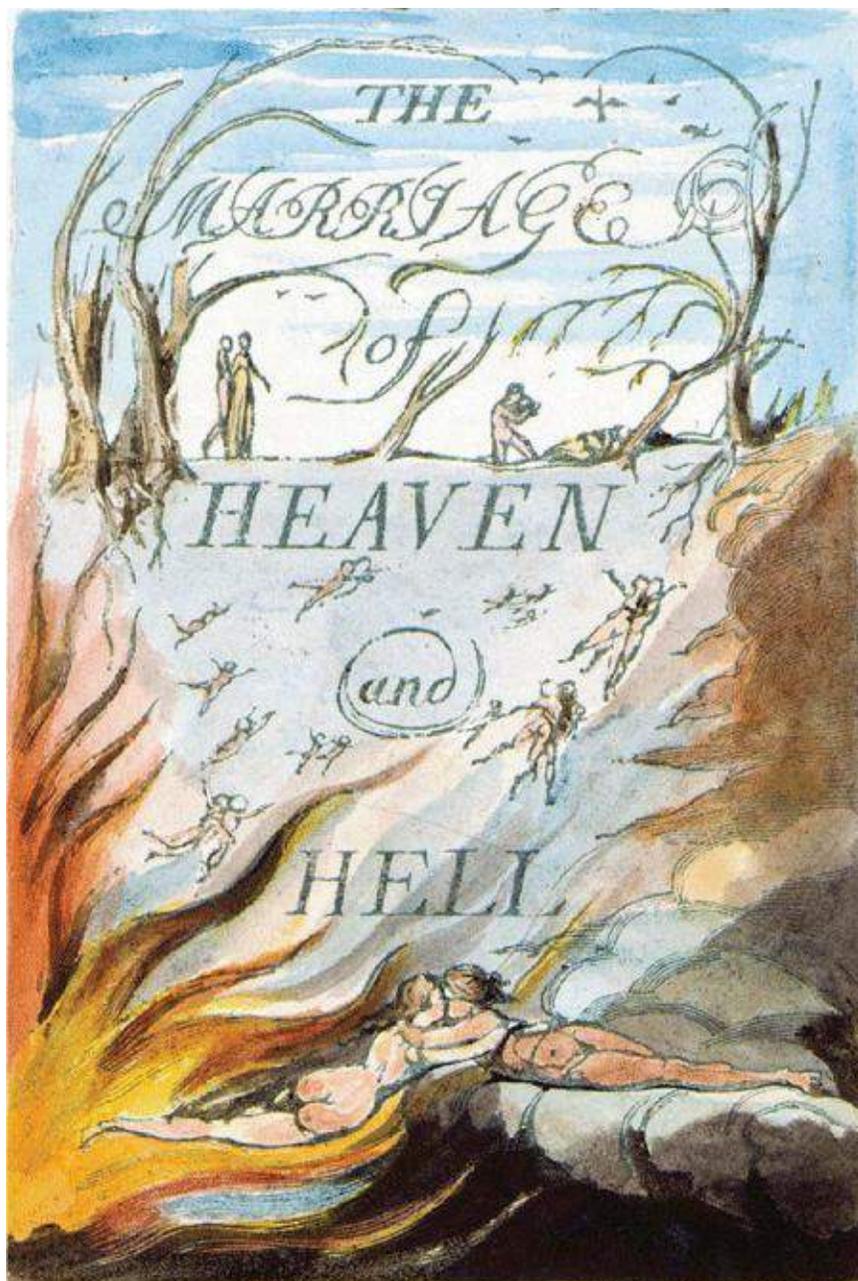
**Илл. Р.** Решения уравнений Максвелла описывают намного больше, чем один лишь видимый свет. В современной технике используется много других видов «света»



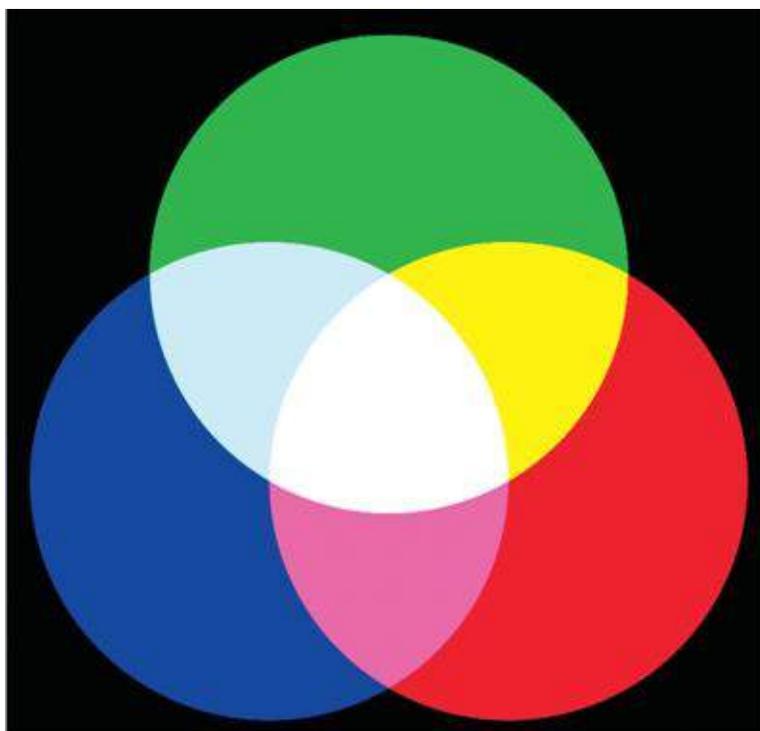
**Илл. Q.** Тень, отбрасываемая острым краем – например, лезвием бритвы



**Илл. Р.** Рождение Сына Божьего. Цифровой рисунок Р. Гопакумара



Илл. S. Титульный лист фантастической «мультимедийной» поэмы Уильяма Блейка «Бракосочетание Рая и Ада»

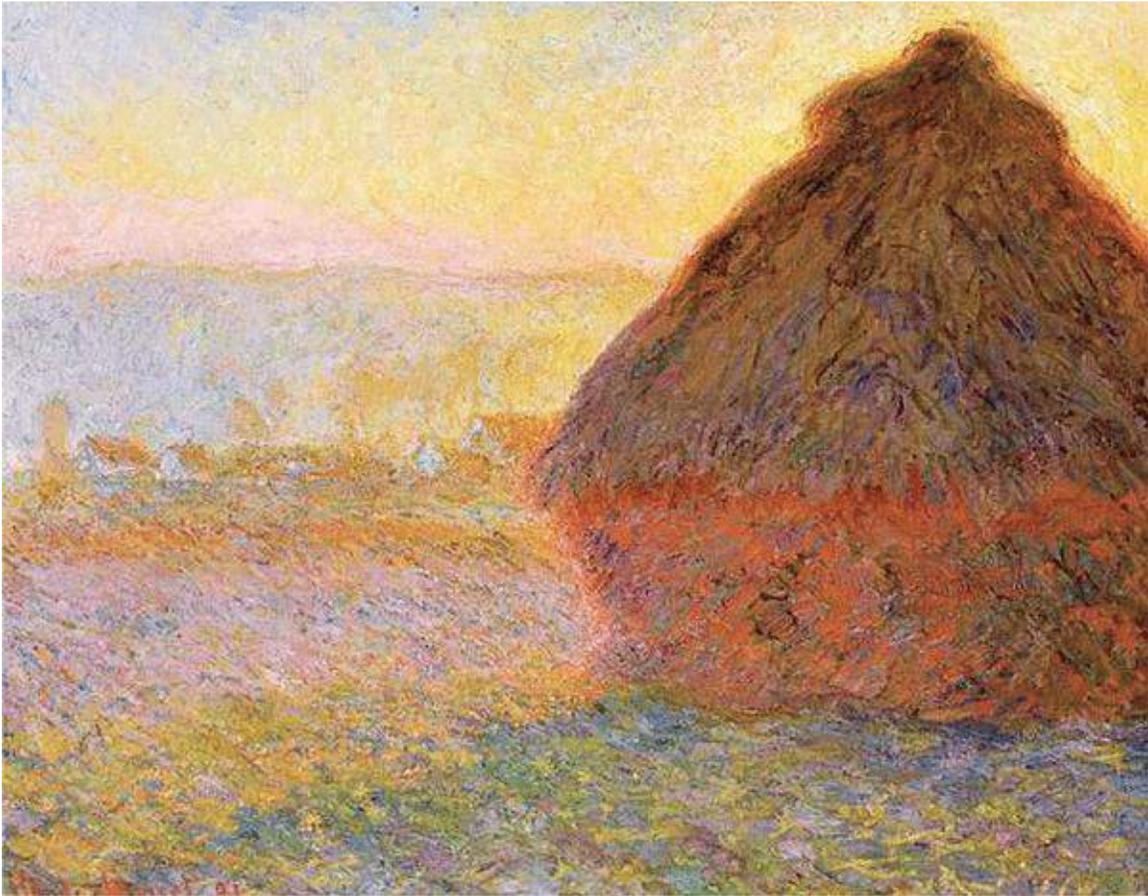


**Илл. Т.** Сочетая лучи красного, зеленого и синего спектра, мы получаем множество воспринимаемых особым образом цветов, включая желтый и белый. Цвет, воспринимаемый в данном случае как белый, значительно отличается от белого солнечного света

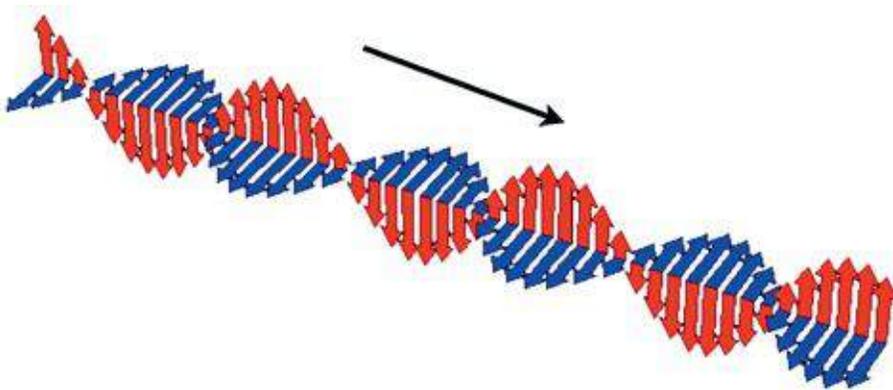


**Илл. У.** Если наклеить эту фигуру на твердый картонный диск и быстро раскрутить вокруг ее центра, мы получим смесь красного и зеленого цветов из одной полосы и желтый из другой, так что их можно будет легко сравнить. Мы можем регулировать яркость каждой из полос

за счет включения черных секторов, которые не отражают никакого света



**Илл. V.** Художники-импрессионисты воспользовались возможностью создания определенного воспринимаемого цвета из различных смесей других цветов. Примером является картина Моне «Сток, закат солнца» из цикла «Стога»



**Илл. W.** «Моментальный снимок» электромагнитной природы света в соответствии с (правильной) теорией Максвелла. Электрические поля показаны красными стрелками, а магнитные поля – синими. С течением времени этот комплекс возмущений движется вдоль направляющей на юго-восток – со скоростью света!



**ЧТО ВИДИТЕ  
ВЫ**

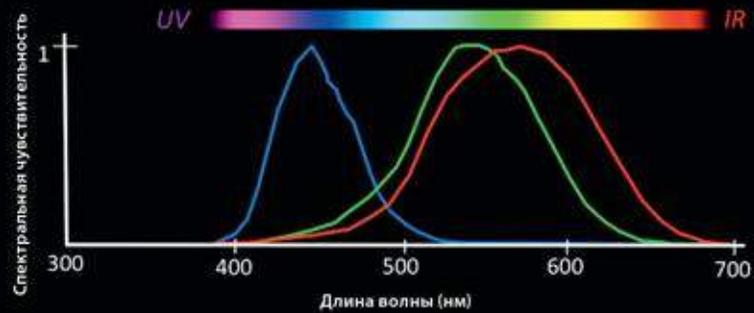
**Илл. X.** Сделав определенную обработку исходного изображения и спроектировав три цвета на два цветовых измерения, мы можем получить примерное представление о том, чего не видят собаки – и люди, страдающие дальтонизмом



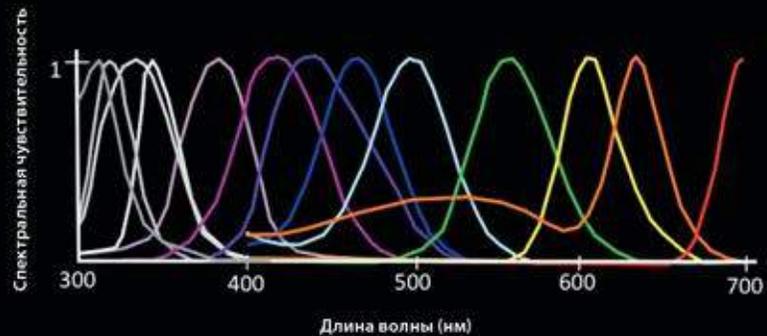
**ЧТО ВИДИТ  
СОБАКА ФИДО**

## РАК-БОГОМОЛ: НЕОБЫКНОВЕННЫЕ ГЛАЗА

*Homo sapiens*



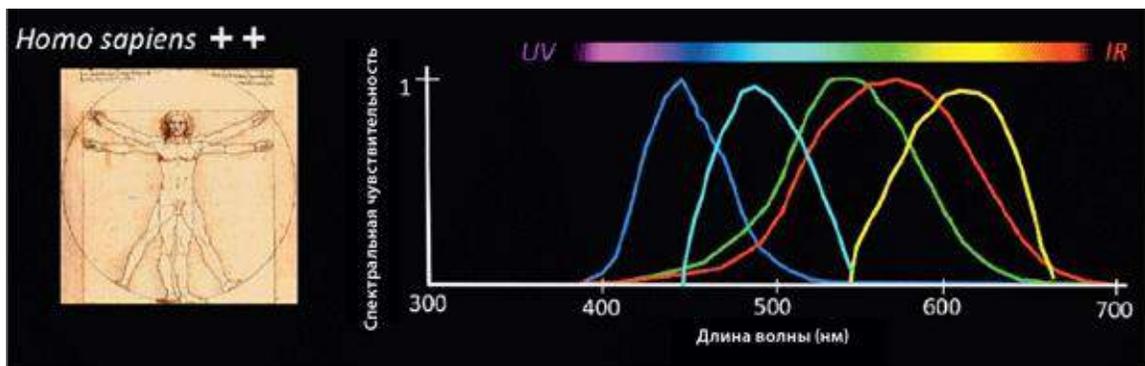
*Neogonodactylus oestedii*



**Илл. У.** Система зрения человека основана на трех цветовых рецепторах, а вот у рака-богомла их намного больше. Эти схемы с соответствующими кривыми относительной спектральной чувствительности дают некоторое представление о более мощных цветовых возможностях рака-богомла



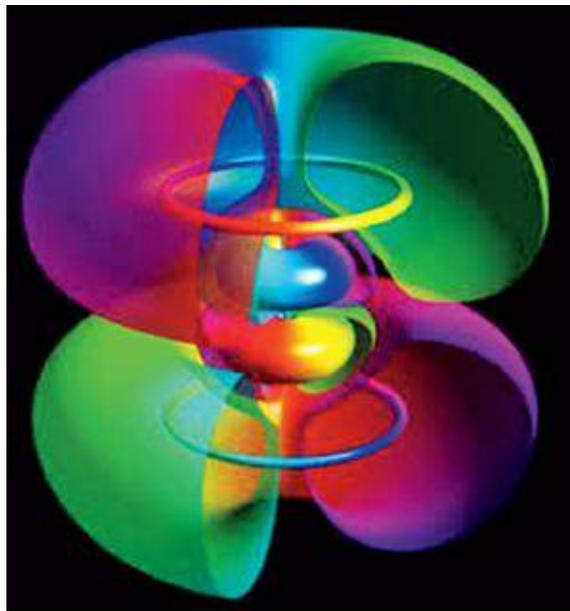
**Илл. Z.** Наиболее богатые в отношении цветного зрения виды раков-богомолов также и очень ярко окрашены, как вы можете видеть на этом снимке. Конечно, фотография передает лишь то, каким рака-богомола можете видеть вы



**Илл. АА.** Используя временную модуляцию, мы можем добавить новые каналы восприятия, усиливая человеческое зрение. Например, мы можем добавить два новых искусственных канала и сделать цветовое пространство пятимерным

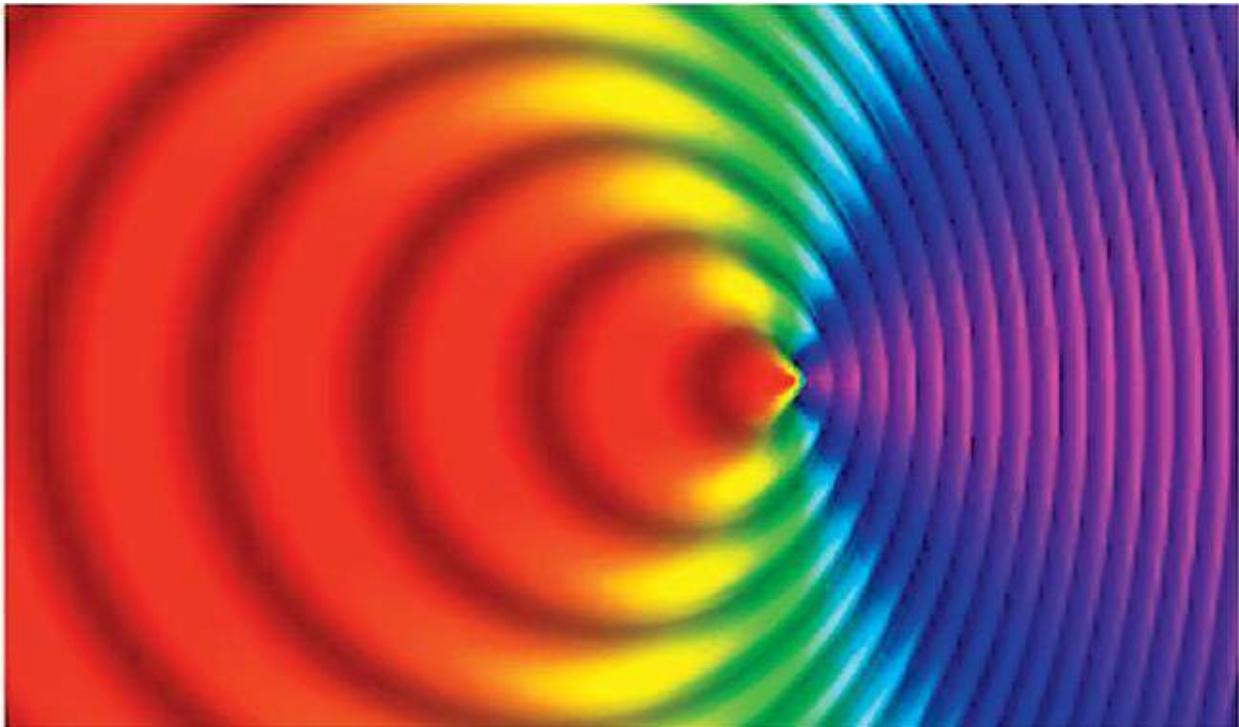
R1	R2										
R3	R4										
R1	R2										
R3	R4										
R1	R2										
R3	R4										
R1	R2										
R3	R4										
R1	R2										
R3	R4										
R1	R2										
R3	R4										

**Илл. ВВ.** Периодические матрицы с четырьмя различными типами рецепторов, небольших и близко расположенных друг к другу, могут дать «картинку», тонкая структура которой поддерживает четыре цветовых измерения. Дисплеи, основанные на этой же архитектуре, где по крайней мере один из элементов использует временную модуляцию, способны сделать такую информацию доступной взгляду



**Илл. СС.** Физические атомы, описанные математически, являются

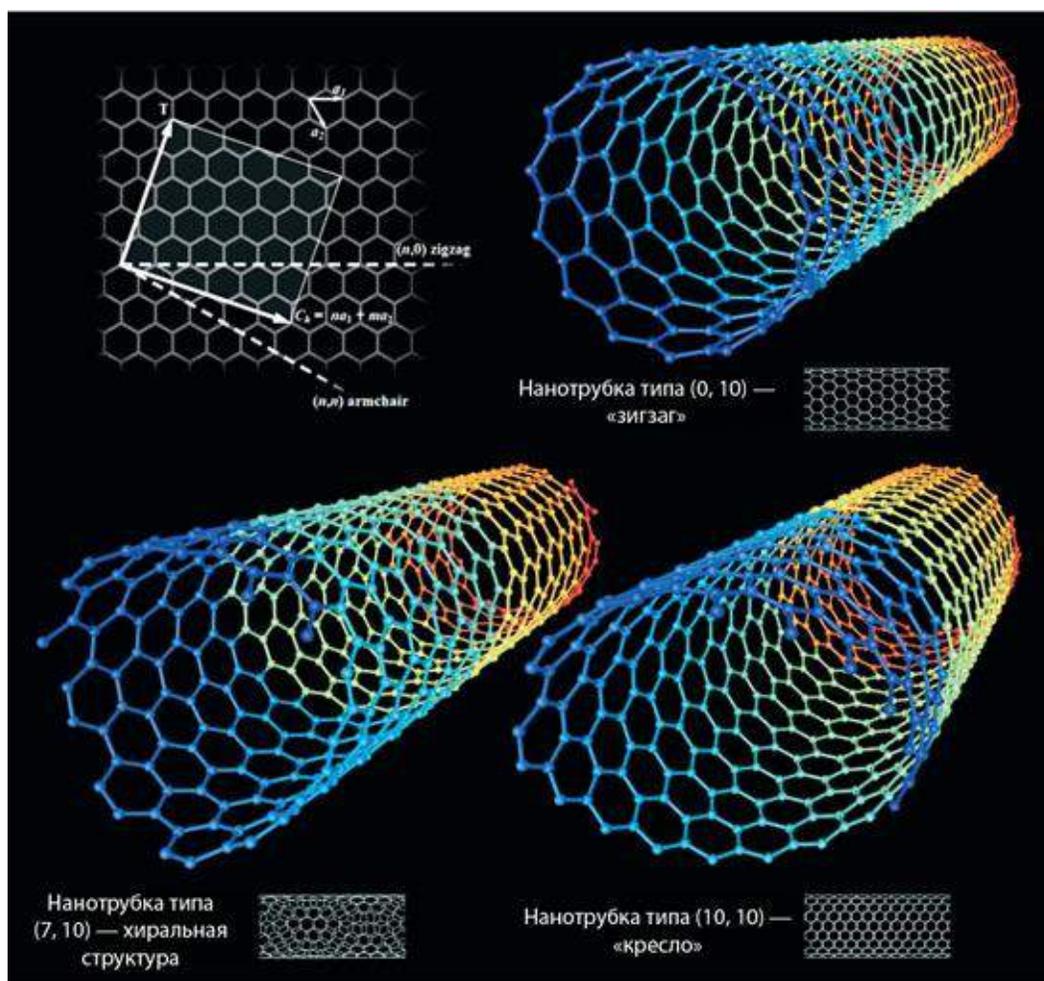
трехмерными объектами, которые для вдохновенного чувства художника представляются картинами исключительной красоты. Вот перед вами в разрезе электронное облако водорода в возбужденном состоянии. (Для специалистов: в состоянии  $(n, l, m) = (4, 2, 1)$ .) Поверхности, которые вы видите, – это поверхности равной вероятности, а цветами отображены относительные фазы



**Илл. DD.** Если наблюдатель находится в быстром относительном движении, световой пучок будет выглядеть как имеющий различные цвета. Здесь изображен пучок света, излученный источником, который движется направо со скоростью в  $7/10$  скорости света. Если вы находитесь справа и луч приближается к вам, цвет будет синим, а если вы слева и луч удаляется, то он покажется красным. На изображении представлен «мгновенный снимок» волновой картины, источник находится возле его центра



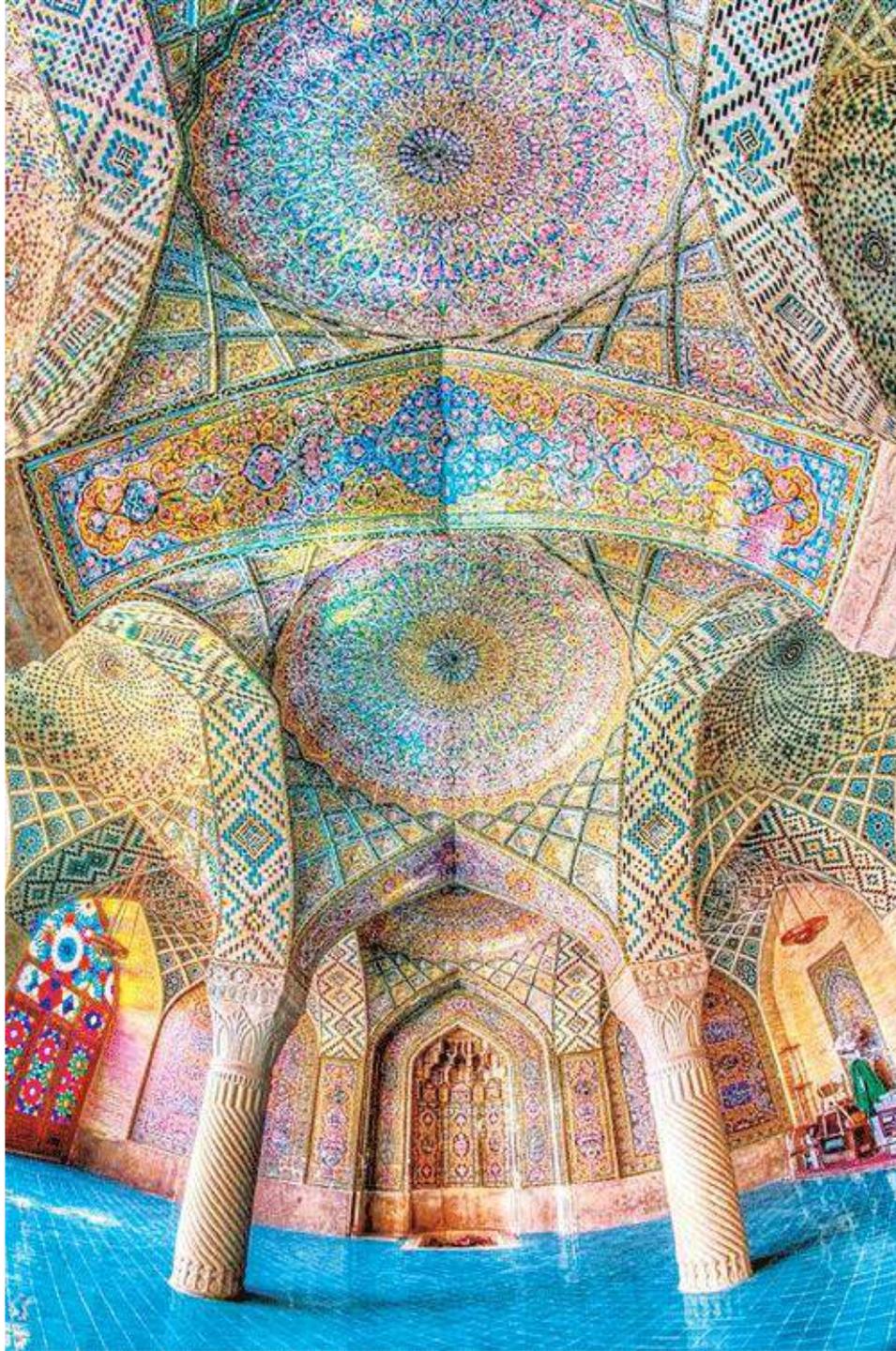
**Илл. ЕЕ.** В анаморфном искусстве отражаются не только изменения под действием перспективы, но и некоторые более общие виды трансформаций. Диапазон возможных изображений, которые могут представлять некоторую сцену, намного больше и включает некоторые очень искаженные варианты



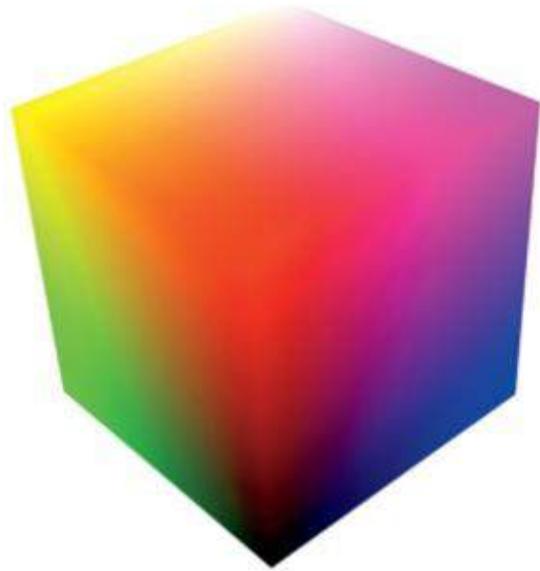
Илл. FF. Сворачивание листа графена различными способами дает много вариантов линейных одномерных молекул – нанотрубок



**Илл. GG.** Иллюстрация трансформаций в цветовом пространстве. Слева сверху мы видим оригинальное изображение прилавка с конфетами в Барселоне. Справа сверху к нему применено простое жесткое преобразование цветового пространства. На двух нижних рисунках применены два различных локальных преобразования: одно слабое и одно достаточно сильное



**Илл. НН.** Геометрические фигуры, цвет, симметрия, анаморфия и анахромия порождают удивительную красоту



**Илл. II и JJ.** Цветной RGB-куб изображает имеющиеся возможности выбора окрашивания элемента изображения (пикселя) в каждой точке. Посредством цветового зрения мы получаем доступ к трем дополнительным измерениям



электромагнитное



слабое

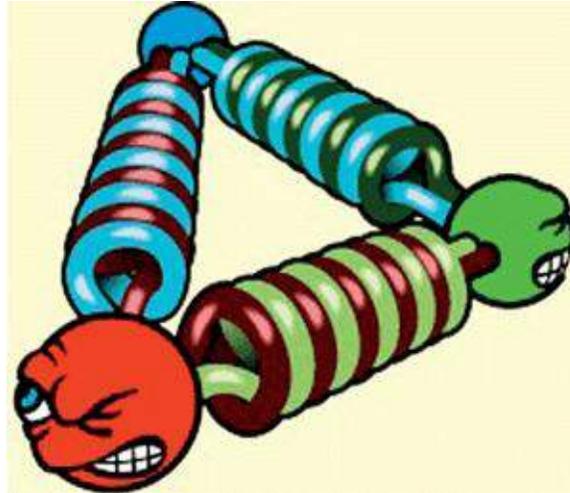


сильное

**Илл. КК.** Здесь концепция цветового пространства свойств иллюстрируется путем ограничения изображения долями цвета, соответствующими линии и лицу, прежде чем мы обращаемся ко всему кубу. Подписи под рисунками (электромагнитное, слабое и сильное) намекают на тот факт, что наши Главные теории электромагнитного, слабого и сильного взаимодействий основаны на пространствах свойств размерностью 1, 2 и 3



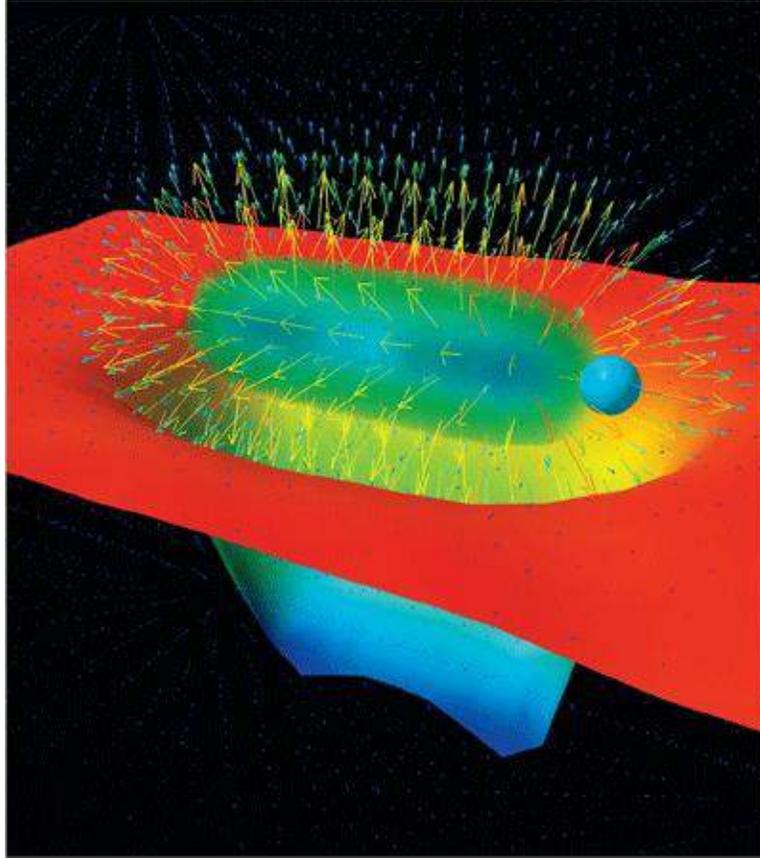
**Илл. LL.** Использование объектива типа «рыбий глаз» добавляет второй уровень анаморфии к этому поразительному интерьеру современной мечети



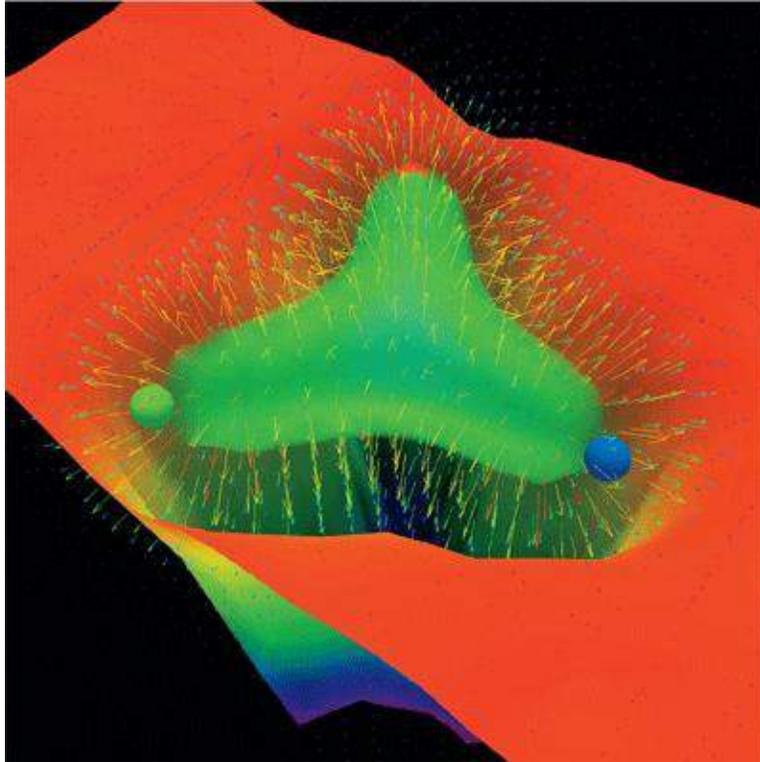
**Илл. MM.** Кажется, что кваркам нужны какие-то силы, сходные по природе с пружиной или резиновым жгутом, которые усиливаются по мере того, как растягивается соединяющая два кварка связь



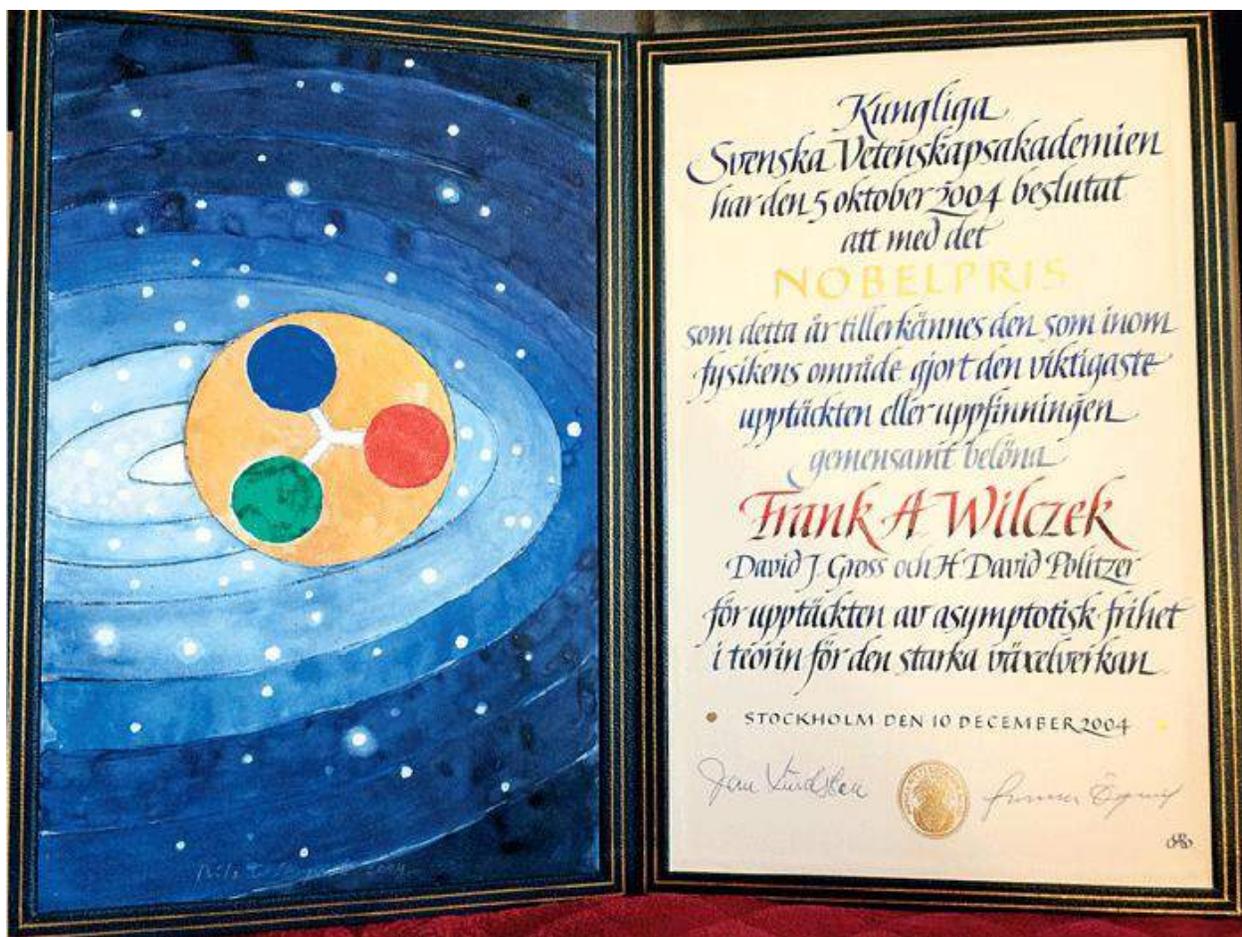
**Илл. NN.** Электрон и позитрон, ускоренные до высоких энергий и двигавшиеся в противоположных направлениях, аннигилировали, и на картинке представлены последствия этого события. Мы видим три группы частиц, движущихся – очень быстро! – в трех различных направлениях. Эти три струи являются аватарами кварка, антикварка и цветного глюона



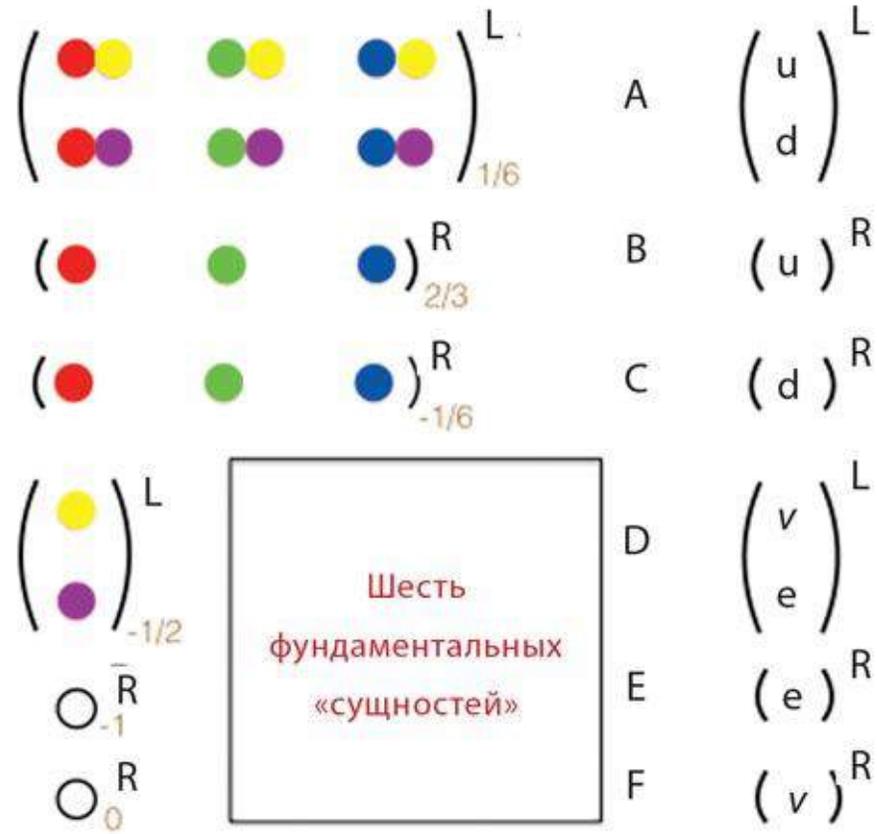
**Илл. 00.** «Силловые линии», говоря языком Фарадея, которые соединяют кварк и антикварк, образуют плотную трубку. Эта трубка представляет поток цветового электрического поля, который течет от источника-кварка к поглощающему его антикварку. Поскольку глюоны, которые образуют цветовые электрические поля, «клейкие», они связываются вместе. Это явление – ключ к удержанию кварков



**Илл. РР.** Эта фигура представляет собой важный вариант предыдущей. Здесь распределение потока соединяет три кварка, и это – основа барионов, например протонов, которые образуют наше вещество «То ты еси» или «Tat tvam asi» на санскрите



Илл. QQ. Существует возможность того, что три силовые трубки соединятся в точке – это специальная черта трехцветной квантовой хромодинамики, «правило обесцвечивания», которое объясняется в тексте. Распределение потоков на вклейке MM, с постера, которым была отмечена моя Нобелевская премия, не вполне верно (см. вклейку PP), но на этом рисунке из лауреатского диплома все точно!



Илл. RR и SS. Обзор Главной теории, шаг 1

$$\left( \begin{array}{ccc} \text{red} & \text{yellow} & \\ \text{red} & \text{purple} & \end{array} \right)^L_{1/6}$$

A

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}^L$$

$$\left( \begin{array}{ccc} \text{red} & & \text{blue} \end{array} \right)^R_{2/3}$$

B

$$(u)^R$$

$$\left( \begin{array}{ccc} \text{red} & & \text{blue} \end{array} \right)^R_{-1/6}$$

C

$$(d)^R$$

$$\left( \begin{array}{c} \text{yellow} \\ \text{purple} \end{array} \right)^L_{-1/2}$$

D

$$\begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}^L$$

$$\text{O}^R_{-1}$$

E

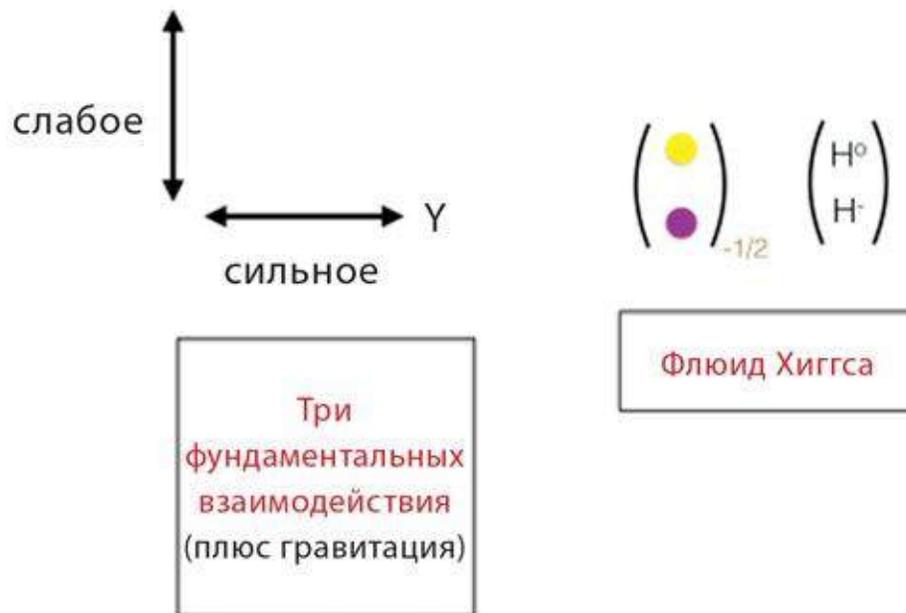
$$(e)^R$$

$$\text{O}^R_0$$

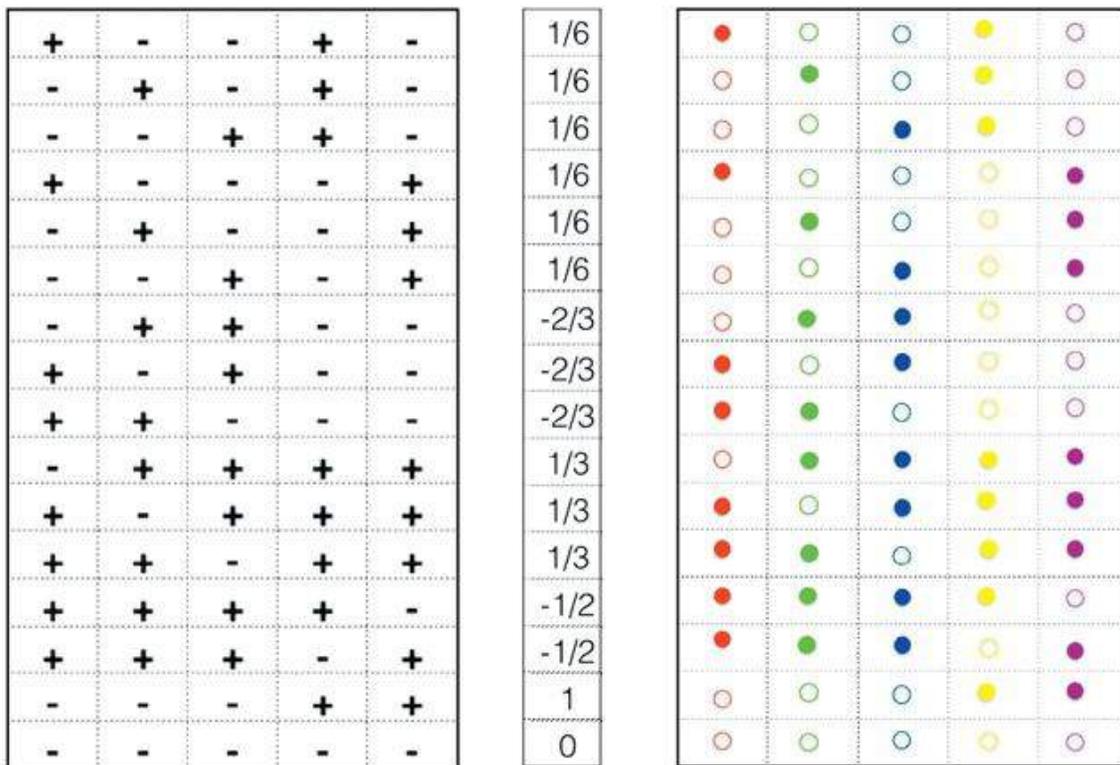
F

$$(\nu)^R$$

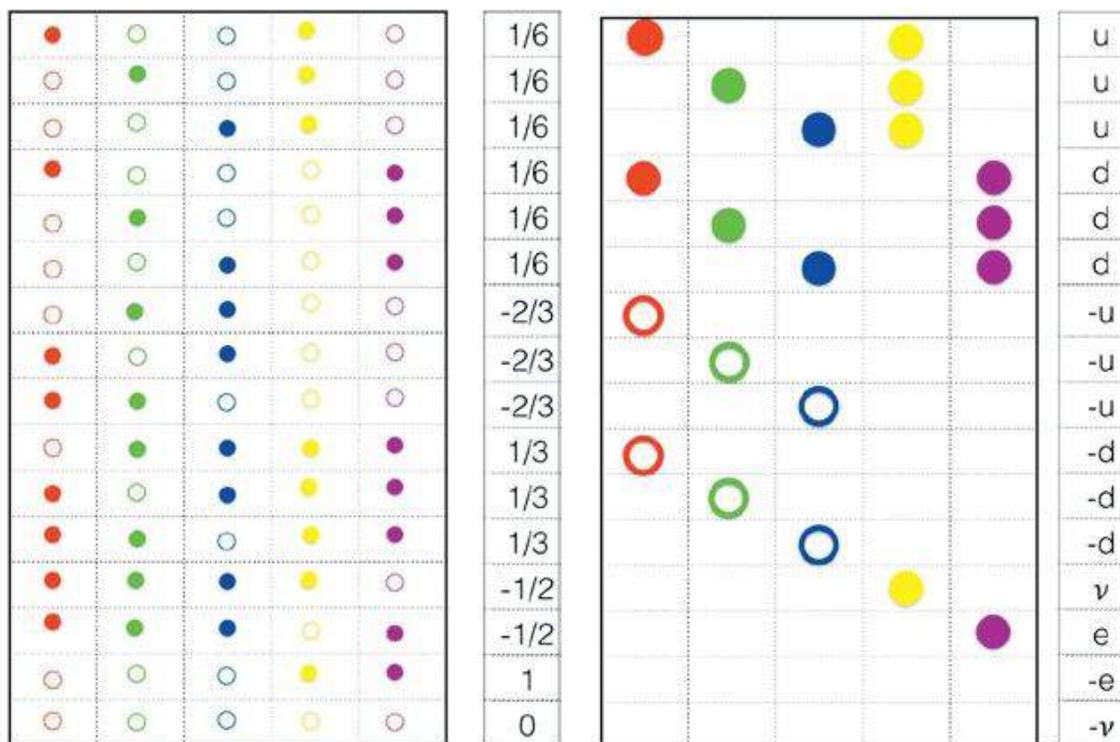
Шесть  
фундаментальных  
«сущностей»  
(плюс два повтора)



Илл. ТТ и UU. Обзор Главной теории, шаг 2

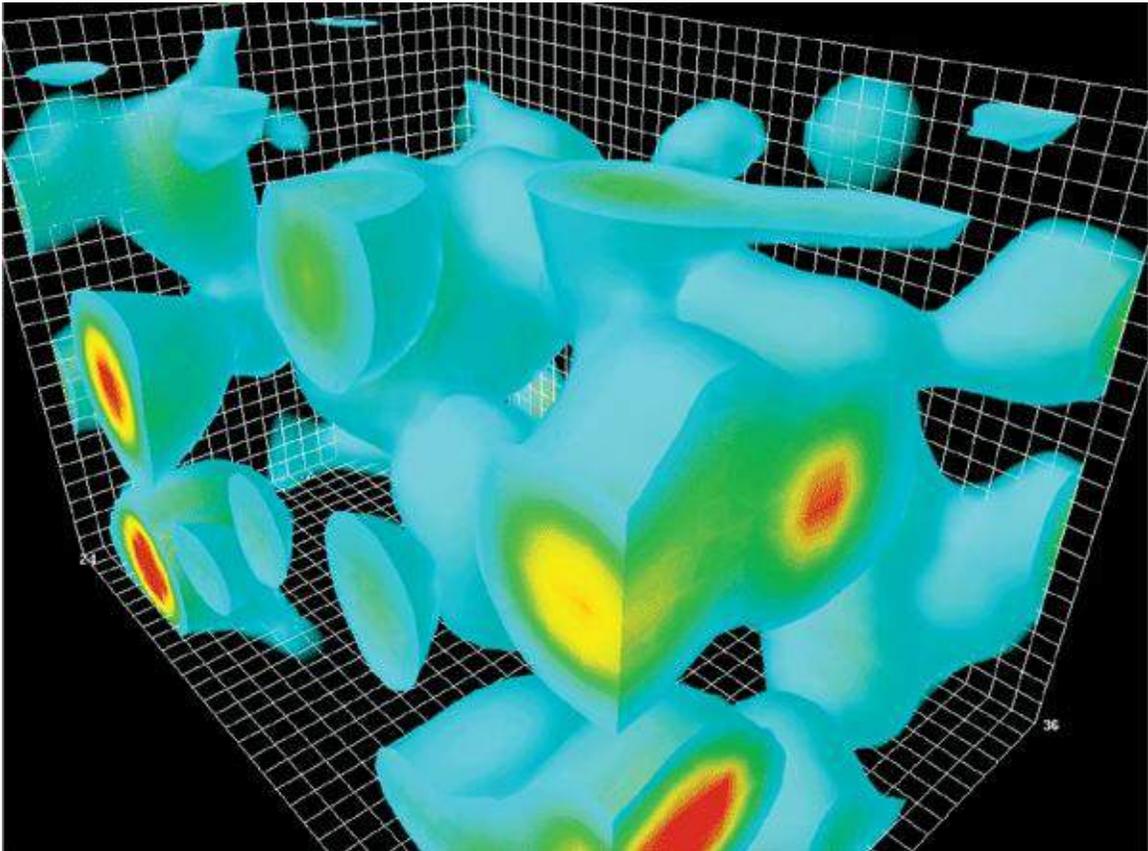


$Y = -1/3$  (красный + зеленый + синий) +  $1/2$  (желтый + фиолетовый)

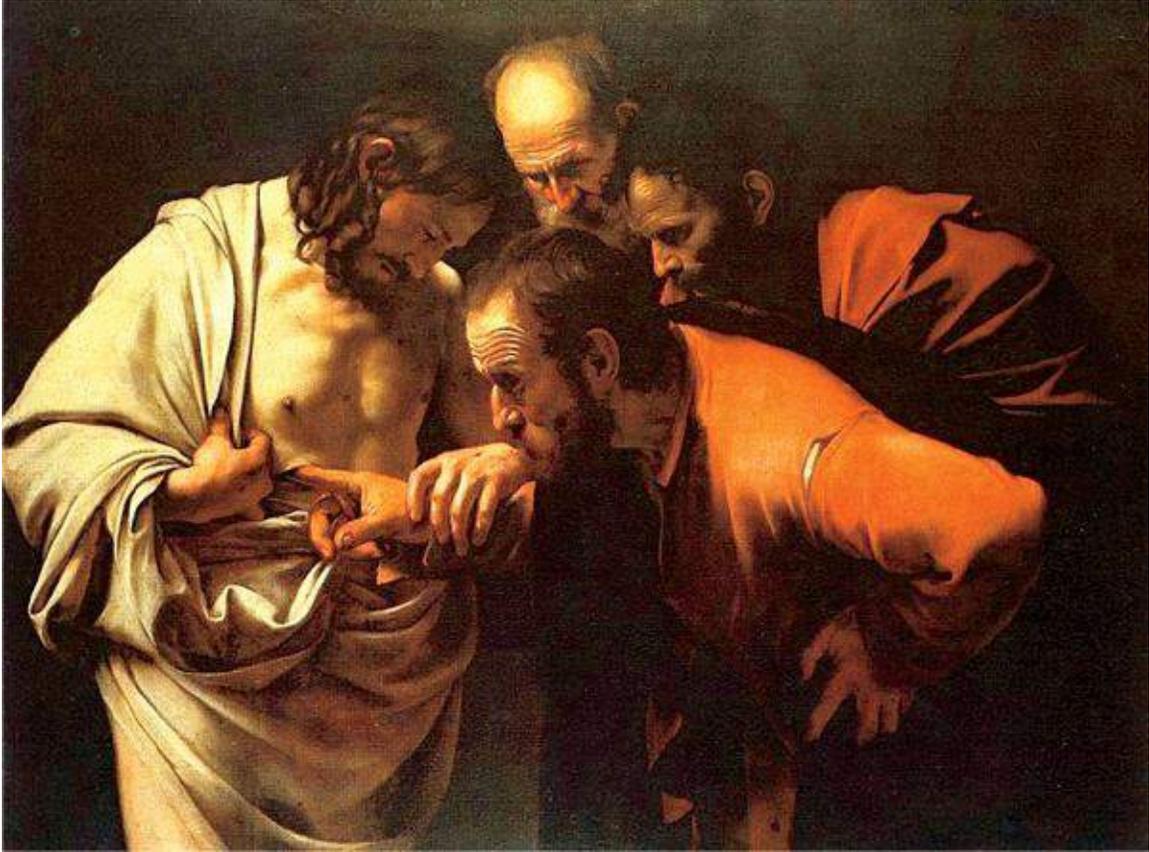


Одна сущность, одно взаимодействие

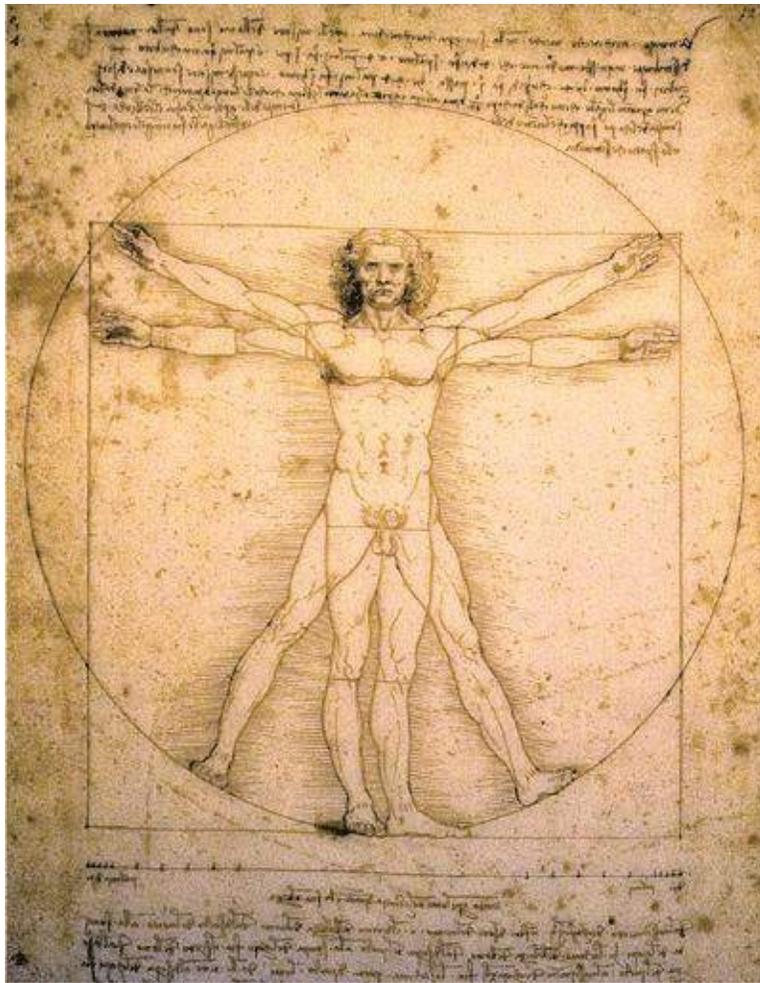
**Илл. VV и WW.** Предположив существование еще большей симметрии, мы можем очень существенно «расчистить» представление Главной теории, показанное на вклейках RR и SS. Тем самым мы приходим к такой замечательной иллюстрации на тему Реальное = Идеальному, интерпретация которой дана в тексте



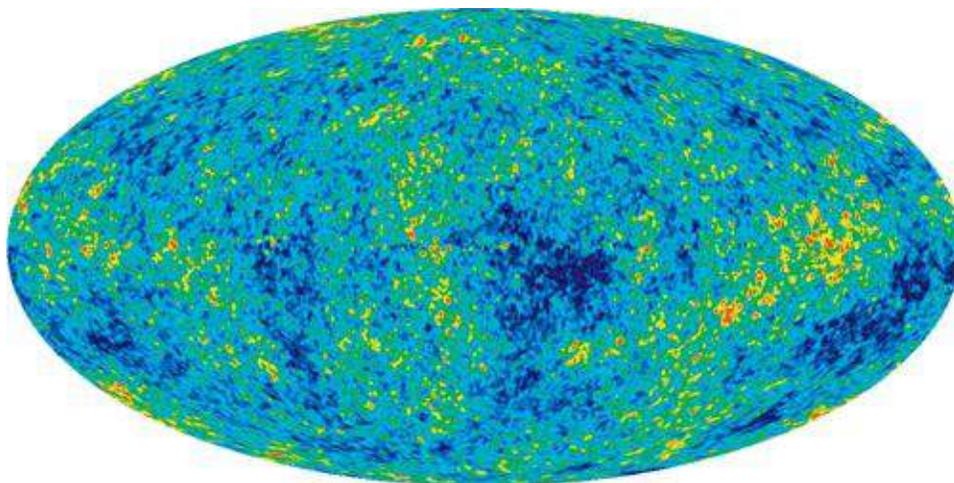
**Илл. XX.** Увеличенное изображение пустого пространства, рассматриваемое с исключительным пространственным и временным разрешением



**Илл. УУ.** «Неверие Святого Фомы» Караваджо. Фома – увлеченный исследователь, и его стремление все проверить поощряется



**Илл. ZZ.** Классический рисунок человека по Витрувию, выполненный Леонардо да Винчи. Как и кеплеровскую модель Солнечной системы, его вдохновили прекрасные, но ошибочные идеи о глубокой реальности. (Но ошибочны ли они на самом деле?)



**Илл. ААА.** Детально проработанная карта микроволнового фона выявляет «семена» структуры Вселенной

*Издание подготовлено при поддержке Фонда Дмитрия Зимина  
«Династия»*



Династия

Фонд некоммерческих программ «Династия» основан в 2002 году Дмитрием Борисовичем Зиминим, почетным президентом компании «Вымпелком».

Приоритетные направления деятельности Фонда – поддержка фундаментальной науки и образования в России, популяризация науки и просвещение.

«Библиотека Фонда «Династия» – проект Фонда по изданию современных научно-популярных книг, отобранных экспертами-учеными.

Книга, которую вы держите в руках, выпущена под эгидой этого проекта.

---

---

**notes**

# **СНОСКИ**

**1**

В английском языке слово «воплощать» происходит от корня body, т. е. «тело», а не от «плоти», как в русском. – *Прим. пер.*

Полное название предыдущей книги автора – «Легкость бытия: масса, эфир и объединение взаимодействий» (The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces, 2008).

3

Часть коры головного мозга, которая принимает и обрабатывает чувствительные нервные импульсы от глаз. – *Прим. пер.*

Отметим, что автор «Аттических ночей» Авл Геллий жил более трех столетий спустя в Риме, т. е. в другой стране. – *Прим. науч. ред.*

Американская писательница и основательница религиозной секты «Христианская наука» (1821–1910). – *Прим. пер.*

Или, в другом варианте перевода, «все вещи суть числа». – *Прим. ред.*

Здесь автор говорит о вынужденных колебаниях, частота которых близка к собственной частоте мембраны в данной точке. – *Прим. ред.*

Так называемый потенциал действия. – *Прим. ред.*

Имеется в виду Пентагон – главное административное здание Министерства обороны США. – *Прим. пер.*

Слой атомов углерода, соединенных в гексагональную двумерную кристаллическую решетку. – *Прим. пер.*

Евангелие от Матфея, 13:12. – *Прим. пер.*

Музей искусства и археологии в Оксфорде. – *Прим. пер.*

Цит. по: Ньютон И. Оптика, или Трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света. – М.-Л.: Госиздат, 1927. – С. 306.

Говорят, что знаменитый физик-теоретик Вольфганг Паули однажды раскритиковал беспомощную работу молодого ученого такими вошедшими в поговорку словами: «Это не просто неверно, это даже не дотягивает до ошибочного!» – *Прим. пер.*

Не во всех вирусах генетический материал представлен в виде ДНК; есть и РНК-содержащие вирусы. – *Прим. ред.*

Более известное название картины – «Тайная вечеря». – *Прим. пер.*

Здесь и далее цит. по: Платон. Государство. – М.: АСТ, 2006.

Отсылка к знаменитому роману Джорджа Оруэлла «1984». –  
*Прим. ред.*

Цит. по: Вавилов С. И. Исаак Ньютон (1643–1727). – М.: Наука, 1989. – С. 209.

Цит. по: Ньютон И. Оптика, или Трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света. – М.-Л.: Госиздат, 1927. – С. 263.

Цит. по: Ньютон И. Указ. соч. – С. 315.

«Поминки по Финнегану» – экспериментальный комический роман ирландского писателя-модерниста Джеймса Джойса, где автор увлекается словотворчеством и каламбурами настолько, что роман становится трудным для восприятия. – *Прим. пер.*

Четверть галлона, или 1,14 л. – *Прим. пер.*

«Википедия» определяет положение сабсайзера (subsizar) Тринити-колледжа в Кембридже, причем именно в применении к Ньютону, несколько иначе: он был освобожден от платы за обучение, но должен был выполнять работу по кухне и в общежитии колледжа. – *Прим. ред.*

Цит. по: Ньютон И. Указ соч. – 2-е изд. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. – С. 116.

У телескопа Ньютона были, однако, проблемы с другим видом искажения изображения. – *Прим. науч. ред.*

Во время солнечного затмения эту линию наблюдал только Пьер Жанссен. Норман Локьер наблюдал ее чуть позже, в солнечном свете уже без затмения. Их работы поступили в журнал Французской академии наук в один день. – *Прим. науч. ред.*

См., напр.: Ньютон И. Математические начала натуральной философии. – М.: Наука, 1989.

Равномерного и прямолинейного движения. – *Прим. науч. ред.*

В решении есть одна лишняя  $t$  – Ньютон не хотел, чтобы оно было слишком простым. – *Прим. авт.*

Джон Китс. Ламия. – Пер. С. Александровского. – *Прим. пер.*

Уризен, согласно «Википедии», – символ человеческого разума, ограничитель энергии, законодатель, завистливый тиран, мстящая совесть. – *Прим. науч. ред.*

Джон Китс. Ода греческой вазе. – Пер. В. Микушевича. – *Прим. пер.*

Ньютон И. Математические начала натуральной философии. – М.: Наука, 1989. – С. 659.

Вейль Г. О философии математики. – М-Л., 1934. – С. 26.

Вавилов С. И. Исаак Ньютон. – 2-е изд., доп. – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1945.

Тит Лукреций Кар. О природе вещей / Пер. Ф. А. Петровского. – М.:  
Художественная литература, 1983.

Ньютон И. Математические начала натуральной философии / Пер. с лат. и примечания А. Н. Крылова; Под ред. Л. С. Полака. – М.: Наука, 1989.

Карцев В. П. Приключения великих уравнений. – М.: Знание, 1986.

Максвелл Дж. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. – М.: ГИТТЛ, 1952.

Дж. Китс «После первого чтения чапменовского „Гомера“», перевод  
В. Микушевича.

Это не совсем верно. Прямых экспериментов действительно не было, но если бы Максвелл не внес в одно из уравнений дополнительное слагаемое, то он был бы вынужден согласиться с нарушением закона сохранения заряда, который был к тому времени проверен в многочисленных экспериментах. Вид этого слагаемого почти полностью определялся законом сохранения заряда, записанного в виде уравнения непрерывности. – *Прим. науч. ред.*

Мы обсудим это в следующей главе. – *Прим. авт.*

Мандала – сакральное схематичное изображение в буддистских и индуистских религиозных практиках. – *Прим. пер.*

Блейк У. Избранные стихи. Сборник. – М.: Прогресс, 1982.

RGB (Red, Green, Blue) – распространенная аббревиатура, используемая в компьютерной графике, в фото– и видеотехнике. – *Прим. пер.*

1,83 метра. – *Прим. пер.*

Мы решили сохранить это забавное различие – конечно же, в русском варианте истории Мюнхгаузен вытянул себя вместе с лошадью из болота за волосы. – *Прим. пер.*

В самом конце XX в. в космической технике (наблюдения Земли из космоса) и некоторых других областях начали применять гиперспектрометры, позволяющие заснять объект не в 12–16 цветовых каналах, а в 100 и даже более. Однако вопрос о том, как увидеть все их одновременно, а не в сочетаниях по три, по-прежнему остается открытым. – *Прим. ред.*

Так стихотворение *Comin' Thro' the Rye* называется в переводе С. Маршака. – *Прим. пер.*

Карцев В. П. Максвелл. – М.: Молодая гвардия, 1974.

Вейль Г. Симметрия. – М.: Наука, 1968.

Успехи физических наук. 1958. Т. 66. Вып. 1. С. 79.

Галилей Г. Диалог о двух системах мира. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1948.

Рассказывают, что на некой ферме коровы давали мало молока, поэтому фермер обратился в местный университет с просьбой о помощи. Приехала команда профессоров, возглавляемая физиком-теоретиком. Вскоре после этого физик вернулся на ферму и сказал фермеру: «У меня есть решение, но оно работает только для сферических коров в вакууме». – *Прим. пер.*

В физике их принято называть резонаторами, если они похожи на закрытый ящик, или волноводами, если они подобно трубе допускают распространение звуковых волн от одного края к другому. Стоячие волны бывают только в резонаторах. – *Прим. науч. ред.*

Начало истории квантовой теории было сложным. Несколько других, менее очевидных парадоксов также сыграли большую роль, направив мысли первооткрывателей определенным путем, но эти люди опробовали и много тупиковых путей. Здесь я излагаю понятную и относительно простую историю, которая является существенной идеализацией того, что было на самом деле. В истории, в отличие от глубинной структуры Природы, Реальное и Идеальное очень отличаются. Мудрый учитель, иезуит отец Джеймс Мэлли подарил мне прекрасную фразу: «Более достойно благословения просить прощения, чем разрешения». – *Прим. авт.*

Борн М. Альберт Эйнштейн и световые кванты // Успехи физических наук. 1956. Т. 59. № 1.

Для тех, кто разбирается в вопросе: требуется, чтобы интеграл импульса, взятый по длине орбиты, – так называемый интеграл действия – равнялся целому числу единиц, известных как постоянная Планка. – *Прим. авт.*

Эйнштейн А. Собрание научных трудов. – Т. 4. – М.: Наука, 1967.

Телевизионная игра-викторина, популярная во многих странах мира. Ее особенность в том, что вопросы звучат в утвердительной форме, а ответы игроков даются в вопросительной форме. «Своя игра» на российском телевидении сначала проводилась по аналогичным правилам. – *Прим. пер.*

Если это незнакомая для вас тема, вы можете справиться в «Терминах» или просто воспринимать это как поэзию. Мы не будем углубляться в детали свойств комплексных чисел, красивых, как и они сами. – *Прим. авт.*

Максвелл Дж. Статьи и речи. – М.: Наука, 1968.

Так у автора. Согласно современным представлениям, палеозойская эра и кембрийский период начались примерно 540 млн лет назад. – *Прим. ред.*

Строго говоря, четыре трехмерных уравнения Максвелла объединяются в два четырехмерных уравнения, а не в одно, как можно было бы предположить из этого описания. – *Прим. науч. ред.*

С Робертом Кёрлом и Ричардом Смолли. – *Прим. ред.*

Мольер Ж.-Б. Мещанин во дворянстве. Пер. В. Лихачева. – *Прим. ред.*

Эти три понятия так тесно связаны между собой, что в сущности взаимозаменяемы. Чтобы узнать об этом больше, см. Измерение, Поле и Пространство свойств в разделе «Термины». – *Прим. авт.*

Стероиды – это вещества, ускоряющие образование и обновление структурных частей клеток, тканей и мышечных структур и используемые культуристами для быстрого искусственного увеличения массы и силы мышц. Ироническое выражение «на стероидах» применяют к любому новому объекту, кающемуся искусственно увеличенной, «накачанной» копией старого. – *Прим. ред.*

«Оклахома!» – мюзикл композитора Ричарда Роджерса и либреттиста Оскара Хаммерстайна. – *Прим. пер.*

14 июля 2015 г. коллаборация LHCb Большого адронного коллайдера в CERN заявила об открытии пентакварка, т. е. частицы, состоящей из пяти кварков. Пентакварки не являются ни мезонами, ни барионами. Результаты исследования были опубликованы в журнале *Physical Review Letters* за 12 августа 2015 г. На момент подписания книги в печать другие эксперименты на БАК не предоставили ни подтверждения, ни опровержения этого открытия. – *Прим. пер.*

Сокращенное наименование Стэнфордского линейного ускорителя (Stanford Linear Accelerator). – *Прим. ред.*

Буквально – «божий суд», испытание огнем и водой. – *Прим. ред.*

Эквивалентным термином, по большей части используемым в химии, является «хиральность». – *Прим. пер.*

После сообщения об обнаружении бозона Хиггса в прессе поднялась шумиха, в процессе которой родился еще один «термин» – «частица Бога». – *Прим. науч. ред.*

Точнее, это так называемое пространство свойств гиперзаряда. Более подробное обсуждение этого вопроса и нескольких других специальных терминов см. в разделе «Термины» и примечаниях в конце книги. – *Прим. авт.*

Перевод С. Я. Маршака. – *Прим. пер.*

Реймонд (Рей) Курцвейл – американский изобретатель и футуролог, известный, в частности, научными технологическими прогнозами, учитывающими появление искусственного интеллекта и средств радикального продления жизни людей. Завещал сохранить свое тело после смерти, чтобы с развитием медицины можно было устранить ее причину и оживить его. – *Прим. ред.*

Выражение «gild the lily» – сочетание двух шекспировских выражений «gild refined gold» и «paint the lily», т. е. «позолотить чистое золото» и «раскрасить лилию», которое означает «пытаться улучшить то, что в улучшении не нуждается». – *Прим. пер.*

Я выиграл несколько пари, пользуясь этим неуместным скептицизмом. – *Прим. авт.*

От англ. *super symmetry*; это сокращение можно прочесть как имя Сьюзи. – *Прим. пер.*

Написания «селектрон» и «сэлектрон» встречаются одинаково часто. –  
*Прим. ред.*

The Odd Couple – пьеса американского драматурга и сценариста Нила Саймона, по которой было снято несколько сериалов. – *Прим. пер.*

Название раздела пародирует, а заголовок книги содержит выражение «In God we trust», напечатанное на американских долларах и признаваемое официальным девизом США. В норме, разумеется, оно переводится как «на Бога уповаем». – *Прим. ред.*

Кроме этого, были сделаны еще многие операции вроде вычитания излучения отдельных источников, например в нашей Галактике, и пересчет картинки так, как она бы выглядела в системе отсчета, относительно которой реликтовое излучение в среднем неподвижно («вычитание диполя»). – *Прим. науч. ред.*

Скончался 5 июля 2015 г. – *Прим. пер.*

CERN (ЦЕРН) – Европейский совет по ядерным исследованиям и одноименная, крупнейшая в мире лаборатория физики высоких энергий. – *Прим. пер.*

Терминологический словарь Фрэнка Вильчека столь обширен и подробен, что представляет собой самостоятельную ценность. Мы решили придать ему дополнительную функцию русско-английского словаря, отражающего национальные особенности терминологии в квантовой физике и смежных областях. С этой целью заголовки словарных статей (кроме отсылочных) даны на двух языках. – *Прим. ред.*

От англ. glue ball, т. е. шар из глюонов. – *Прим. пер.*

От англ. Large Electron-Positron collider. – *Прим. пер.*

Антропный принцип часто применяется в космологии. Теории, в которых Вселенная может возникать вновь после коллапса (циклические Вселенные), но с другими свойствами или в которых многочисленные части Вселенной могут иметь разные физические законы (мультивселенная, Мультиверс, Омниверс, Поливерсум) имеют существенное преимущество при объяснении существования жизни именно благодаря антропному принципу. – *Прим. науч. ред.*

Чаще говорят о подчинении статистике Бозе – Эйнштейна. –  
*Прим. пер.*

Первоначально значение англоязычного термина booster (и booster stage) – это именно первая ступень ракеты-носителя, придающая необходимую скорость верхней ступени, которая завершает выведение полезного груза на орбиту. Впоследствии оно также стало применяться в отношении дополнительных ускорителей («бустеров»), навешиваемых на первую ступень для увеличения стартовой тяги. – *Прим. ред.*

У слова void (пустота) имеется также более приземленное значение: им называют обширные области пространства с низкой плотностью видимой и темной материи в ячеистой структуре видимой Вселенной. В этом значении оно обычно передается транскрипцией «войд». – *Прим. ред.*

От англ. weak (слабый). Обычно их называют бозонами слабого взаимодействия или  $W$ - и  $Z$ -бозонами. – *Прим. пер.*

Речь идет о так называемом космологическом горизонте. Его не следует путать с горизонтом (или горизонтом событий) у черных дыр. – *Прим. науч. ред.*

Уточним, что чем дальше находится объект наблюдения, тем дольше шел его свет к наблюдателю. Поэтому удаленные объекты мы видим, когда они были моложе, чем в данный момент. На очень больших расстояниях мы бы не смогли увидеть ни звезд, ни галактик, ведь эти объекты образовались не сразу, а через некоторый промежуток времени после Большого взрыва. – *Прим. науч. ред.*

Цит. по: Ньютон Исаак. Математические работы. – М.-Л.: ОНТИ, 1937.

Речь, естественно, идет о диапазоне воспринимаемых длин волн. Выражение «the doors of perception» («двери восприятия») использовал Олдос Хаксли как название книги о его опытах с употреблением мескалина, и оно же дало название известной рок-группе The Doors. В русском языке аналогом служит понятие «расширить сознание». – *Прим. науч. ред.*

Если бы Максвелл этого не сделал, то уравнение противоречило бы закону сохранения заряда. – *Прим. науч. ред.*

Заметим, что два хорошо различимых русских термина «измерение» и «размерность» (количество измерений) по-английски выражаются одним и тем же словом «dimension». – *Прим. пер.*

В русской научной терминологии эта величина называется освещенностью, точнее, энергетической или фотометрической освещенностью. – *Прим. науч. ред.*

То есть частицы обычного вещества совершают нулевые колебания, в то время как они сами должны служить измерительным прибором для обнаружения этих малых эффектов и в идеальном случае не должны были бы менять своего состояния без внешних влияний. – *Прим. пер.*

Или аргументом. – *Прим. пер.*

На самом деле нельзя, потому что существующая запись истории не включает нулевого года: первому году нашей эры предшествует первый год до нашей эры. Чтобы сохранить возможность вычисления промежутка времени между произвольными датами, придется присвоить пятому году до нашей эры временную координату  $-4$ . – *Прим. ред.*

Речь идет о массе покоя разогнанных частиц. – *Прим. науч. ред.*

Известное также как реликтовое излучение. – *Прим. ред.*

От слова «мутация» (изменение) и компонента – трон, входящего также в состав названий электрон и позитрон. – *Прим. пер.*

В русской научной литературе употребляется именно термин «общая ковариантность» (да и в английской в основном тоже). – *Прим. пер.*

В астрономии и космологии ее принято называть барионной материей. – *Прим. науч. ред.*

Д. И. Менделеева. – *Прим. ред.*

Проще запомнить «правило штопора», именуемое в школе обычно правилом буравчика. Если штопор (буравчик, винт с правой резьбой и т. д.) вращать в направлении обхода контура, то положительным направлением вдоль его оси считается то, в котором смещается штопор. – *Прим. науч. ред.*

В русском языке это значение слова «сила» используется редко, и в переводе в этом случае употребления обычно используется термин «взаимодействие», поскольку так больше принято, а также в связи с тем, что термины «слабая сила» или «сильная сила» не слишком удачны. – *Прим. пер.*

Для англоговорящих читателей автор поясняет, что media – то самое, которое вошло в выражение массмедиа и относится к сфере распространения информации, – является множественным числом от medium – среда. – *Прим. ред.*

Также существует теорема Гаусса для ньютоновской гравитации. –  
*Прим. пер.*

Электрический ток – это явление, заключающееся в упорядоченном движении электрических зарядов. Его мерой являются плотность тока и сила тока. В английском языке выражение electric current означает и сам ток, и его силу, а термин current density (плотность тока) употребляется редко и также обычно заменяется на current. – *Прим. науч. ред.*

Речь идет об упомянутой в предыдущем примечании плотности тока. Она равна произведению электрического заряда на среднюю скорость и объемную концентрацию его носителей, просуммированному для всех частиц, движение которых образуют ток. – *Прим. науч. ред.*

В английском языке слово current действительно используется для описания потока воды. Его можно перевести и как «поток», но для электрического тока в русском языке оно не принято. – *Прим. пер.*

Получили свое английское название по имени американского архитектора Бакминстера Фуллера, автора аналогичных макроскопических конструкций. – *Прим. ред.*

Приведем более строгое определение циркуляции для любого векторного поля. Выберем замкнутый контур и направление его обхода, затем вычислим вдоль контура интеграл от проекции вектора поля на направление контура. Это и будет циркуляция. Циркуляция электрического поля называется электродвижущей силой (ЭДС), магнитного – магнитодвижущей силой (МДС), силы – работой при перемещении по данному контуру. – *Прим. науч. ред.*

Более точно называть их переносчиками взаимодействия. – *Прим. ред.*

Вам потребуется определенная ловкость рук и гибкость мысли. –  
*Прим. ред.*

Обычно эту энергию называют энергией покоя. – *Прим. пер.*

Последнее легко понять и без формулы сложения синусов: если два тона одинаковой частоты достигают нашего уха в противофазе, они должны погасить друг друга. – *Прим. ред.*

Сохраняя авторские ссылки на рекомендованную англоязычную литературу, мы добавили указания на существующие переводы и аналогичные издания на русском языке. – *Прим. ред.*