



# МАГИЯ ФИЗИКИ



КАК УПРАВЛЯТЬ  
ТАЙНЫМИ СИЛАМИ МАТЕРИИ,  
СОЗДАВАТЬ ВЕЩЕСТВА ИЗ КВАНТОВОГО МИРА  
И ВЫЗЫВАТЬ КРИСТАЛЛЫ ИЗ ХАОСА

ФЕЛИКС ФЛИКЕР

**Феликс Фликер**  
**Магия физики. Как управлять**  
**тайными силами материи,**  
**создавать вещества из**  
**квантового мира и вызывать**  
**кристаллы из хаоса**

*[http://www.litres.ru/pages/biblio\\_book/?art=69556288](http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=69556288)*

*Магия физики. Как управлять тайными силами материи, создавать вещества из квантового мира и вызывать кристаллы из хаоса:*

*КоЛибри, Азбука-Аттикус; Москва; 2023*

*ISBN 978-5-389-23866-4*

### **Аннотация**

Представьте себе, что у вас есть кристалл, который начинает светиться по вашему приказанию – это, конечно, магия, а вы, несомненно, волшебник. Впрочем, это не игра воображения: вы то и дело используете такие заклинания в жизни. Современное название колдовства – физика конденсированного состояния. Она изучает окружающий нас мир – состояния вещества и то, как они возникают из квантового мира. Благодаря этой практической магии мы можем создавать лазеры, прорезающие твердые металлы, поезда, парящие в воздухе, и кристаллы,

освещающие наши дома. Это одна из самых надежно охраняемых тайн науки; хотя в этой области работает треть всех физиков, ее историю никогда не рассказывали.

Позвольте оксфордскому ученому Феликсу Фликеру познакомить вас с магией физики конденсированного состояния. В этом путешествии вам откроются хитроумные заклинания, которые вызывают из хаоса кристаллы и создают новые частицы, никогда ранее не существовавшие. «Магия физики» произведет переворот в ваших представлениях о физике и реальности; вы никогда больше не будете смотреть на мир так, как раньше.

«Мир и так рассказывает вам свои заклинания; цель этой книги – помочь вам услышать». (Феликс Фликер)

В формате PDF A4 сохранён издательский дизайн.

# Содержание

I	7
II	36
Конец ознакомительного фрагмента.	59



**Феликс Фликер  
Магия физики. Как  
управлять тайными  
силами материи, создавать  
вещества из квантового  
мира и вызывать  
кристаллы из хаоса**

Felix Flicker

THE MAGICK OF MATTER

Crystals, Chaos and the Wizardry of Physics

© Felix Flicker, 2022

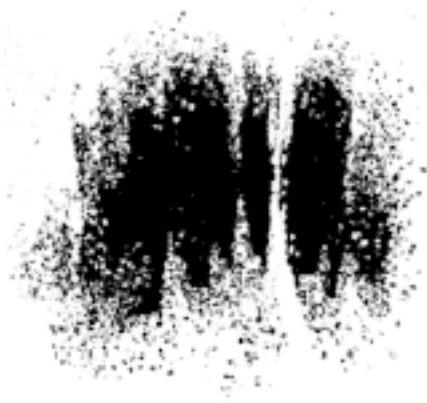
© Прокофьев Д.А., перевод на русский язык, 2023

© Издание на русском языке. ООО «Издательская Группа

«Азбука-Аттикус», 2023 КоЛибри®

# I

## «Физика грязи»



Волшебница Вериана пробиралась по холодной, темной пещере, привычно нашептывая в свой кристалл заклинание. Дунув на камень, как если бы она сдувала семена с одуванчика, она пробудила в кристалле ослепительный красный свет, озаривший окружающие ее мшистые скалы.

Пройдя еще немного, она оказалась перед входом. Путь ей преградила большая деревянная дверь, укрепленная широкими железными брусками. В резком свете кристалла она нашла дверную ручку – толстое кольцо из черного железа. Она потянула за кольцо, но дверь не поддалась: она была заперта. Найдя край двери,

волшебница запустила пальцы в узкую щель между дверью и окружавшим ее камнем и нащупала засов, сделанный из того же грубого железа, что и кольцо.

Веряна снова заговорила с кристаллом тем же уверенным негромким голосом, и он стал постепенно темнеть. Через несколько секунд она вновь оказалась в абсолютной темноте. Встав напротив засова, она положила кристалл на ладонь и поднесла его к двери, как пучок травы к морде лошади. Когда она произнесла несколько слогов древнего языка, на этот раз более резким тоном, вновь появился свет – теперь это был узкий, сфокусированный красный пучок интенсивного жара. Проникнув в щель, луч прорезал засов, оставляя после себя красно-оранжевое свечение расплавленного железа. В воздухе разлился острый запах кузнечного горна. Свет исчез так же быстро, как появился. Она снова потянула за кольцо; дверь неохотно открылась. При этом с другой стороны, от сложенной из каменных глыб лестницы, в расширяющийся проем начали просачиваться свет и жизнь. Волшебнице предстояло потрудиться.

Эта книга – о колдовстве. В ней раскрываются секреты искусства волшебников и рассказывается, как научиться их использовать. Кроме того, в ней излагается история магии – повествование о том, как волшебники вывели из своих наблюдений за миром заклинания, которые они используют, и как современные волшебники продолжают разрабатывать новое волшебство для преобразования мира прямо на наших гла-

зах.

В современном мире магию называют физикой, а колдовство, которым занимаются волшебники – *физикой конденсированного состояния*. Прежде чем мы поговорим о значении этих слов, я должен предупредить вас об одной особенности этой книги. Когда вы узнаете, как использовать то или иное заклинание, производимое им действие перестает казаться вам волшебным. Оно становится прозаическим. Обыденным. *Скучным*. Такова цена магического знания. Чтобы вновь обрести способность поражаться так, как вы поражались, когда вам только показывали это волшебство, требуется много практики и терпения.

На протяжении большей части истории – и даже на памяти ныне живущих людей – история, которую вы только что прочитали, относилась к жанру фантастики. Если вы могли достать из кармана кристалл, способный осветить пещеру по вашему желанию, тут, несомненно, происходило нечто волшебное, а вы были колдуном. Однако в наши дни это действие стало совершенно прозаическим: такой кристалл называется светодионом; нажав на выключатель, вы пускаете через него электрический ток, и от этого появляется свет. Лазерный диод – тоже кристалл – испускает интенсивный свет, и, если его сфокусировать, он может разрезать твердый металл. Сейчас вам, вероятно, кажется, что вас обманули. В использовании светодиодного фонарика нет никакой магии. Светодиодный фонарик – это *скучно!* В магии должно быть

нечто непонятное, нечто неизвестное. Светодиодные фонарики неинтересны, потому что они нам знакомы и потому что мы – до той или иной степени – понимаем, как они работают. Но если бы можно было показать такой фонарик человеку, жившему в Средние века, он, несомненно, счел бы его вещью волшебной, потому что лежащая в его основе технология выходила за рамки привычного. При наличии достаточного времени средневековому человеку можно было бы объяснить эту технологию. При этом, по мере все большего знакомства с ней, фонарик переставал бы казаться волшебным. Но в самом ли деле он теряет свои волшебные качества? Или это всего лишь иллюзия?

Чтобы увидеть волшебные аспекты привычных вещей, нужно потрудиться, но эти аспекты у них есть. Физика – это программа рационализации и познания мира. Многие из того, что некогда считалось волшебным, стало теперь частью повседневности. Но наше понимание мира, как правило, развивается шаг за шагом, опираясь на уже имеющиеся знания. Анекдот может оставаться смешным вечно, но «въехать» в него можно только один раз. Зато, если вы поняли анекдот, это позволяет вам пересказывать его другим. Если вы делаете это достаточно умело, то при небольшом везении этот анекдот произведет на других такое же впечатление, какое он произвел на вас. То же происходит и с волшебством. Главное в познании магии мира – изучении физики – постоянно смеяться над анекдотом космического масштаба. Нам

не просто показывают, как фокусник исполняет свой номер, а объясняют, как устроен этот фокус. Я надеюсь, что, когда вы впервые познакомитесь с некоторыми из идей, о которых идет речь в этой книге, они смогут вызвать в вас это ощущение волшебства. И что, когда вы прочитаете эту книгу, вы будете понимать, откуда взялись эти идеи, и они покажутся вам более естественными. Возможно, вам придется приложить некоторые усилия, чтобы сохранить то ощущение волшебства, которое они вызывали у вас раньше, но знакомство с заклинаниями позволит вам использовать их на благо других.

## *Правила колдовства*

Теперь, раз вы уже предупреждены, можно поговорить о волшебниках. Когда я говорю о волшебниках, я имею в виду волшебников вполне классических. Тех, кто занимается магией<sup>1</sup>. На мой взгляд, волшебникам свойственны следующие основополагающие черты – назовем их «Правилами колдовства»:

1. Волшебники изучают мир.
2. Волшебники понимают, что являются частью того мира, который они изучают.

---

<sup>1</sup> Я не хочу использовать слово «ведьмы» из-за его ассоциаций с историей преследований. Под «волшебниками» здесь подразумеваются занимающиеся магией люди любого типа и происхождения. – *Примеч. автора.*

3. Благодаря своему разуму волшебники замечают скрытые закономерности и связи, которых не видят другие.

4. Знания волшебников – это знания практические, прикладные.

5. Волшебники могут вызывать изменения мира, но производят такие изменения с заботой о нем (см. п. 2).

Иногда исследования волшебников могут быть образовательными – как учеба Гарри и Гермионы в «Хогвартсе». Бывает, что исследование представляет собою молчаливое размышление – как это свойственно Рей и Йоде в «Звездных войнах», мудрецам классических даосских текстов наподобие «Чжуан-цзы» или сверхъестественно одаренным мастерам боевых искусств вроде Катары и Аанга из эпического телесериала «Аватар»<sup>2</sup>. Часто исследование принимает

---

<sup>2</sup> Avatar: The Last Airbender (в российском прокате «Аватар: Легенда об Аанге») – мультсериал, вышедший в 2005–2008 гг. К одноименному фильму Джеймса Кэмерона отношения не имеет. – *Примеч. перев.* Иногда я привожу ссылки на научные статьи, подтверждающие то, что я рассказываю о недавних исследованиях. Многие из этих статей написаны для специалистов; не предполагается, что их можно понять, не имея ученой степени в соответствующей области. Однако во многих случаях, если произвести поиск по названию статьи, можно найти в других местах ее краткое популярное изложение. Я привожу «цифровые идентификаторы объекта» (digital object identifiers, DOI), которые позволяют однозначно идентифицировать каждую работу. Доступ к материалам по некоторым ссылкам требует платной подписки. Однако почти все современные публикации по физике также загружаются в виде препринтов на сайт arXiv.org, который обеспечивает бесплатный доступ к ним. Обычно препринты отличаются от журнальных публикаций только форматом, но не содержанием. Имейте в виду, что для загрузки статьи на сайт arXiv.org ей не требуется рецензирование специалистами; если статья, выложенная на arXiv.org, прошла рецензирование и была опублико-

форму экспедиции, путешествия по миру – как это происходит с Гэндальфом во «Властелине колец», Морганой и Мерлином в легендах артуровского цикла или Тенар и Гедом в классических романах о Земноморье Урсулы Ле Гуин. Во многих современных примерах волшебником бывает сверхъестественно талантливый ученый. Свершения Дока Брауна в фильмах «Назад в Будущее», Рика в «Рике и Морти» и Доктора Кто приписываются научным достижениям, но используемые ими технологии настолько превосходят понимание остальных персонажей и зрителя, что больше похожи на магию. Если внимательно перечитать этот список примеров, станет ясно, что «Правила волшебников» неявно предполагают существование одного важного негласного правила – «Правила бунтарства»:

*Волшебники понимают, что правила существуют для того, чтобы их нарушать.*

Взгляните еще раз на пять с половиной правил волшебников и замените слово «волшебники» на слово «ученые». Подходит, не правда ли? Более поэтически это сформулировано Дж. Дж. Фрэзером в его летописи магических практик под названием «Золотая ветвь»:

*В основе как магии, так и науки лежит твердая вера в порядок и единообразие природных явлений... Как магия, так и наука открывают перед тем, кто знает причины вещей и может прикоснуться к тайным*

*пружинам, приводящим в движение огромный и сложный механизм природы, перспективы, кажущиеся безграничными*<sup>3</sup>.

Эти слова Фрэзера описывают связь между магией и наукой. Но колдовство – это особый вид магии, особый вид науки. И у него есть свое название – физика конденсированного состояния.

### *Магия истинных имен*

Зоология изучает животных. Ботаника изучает растения. А что изучает физика? Ее название происходит от древнегреческого *τα φυσική* (*та физики*), что означает «естественное». Оно позаимствовано из названия сборника работ Аристотеля о физическом мире. Однако это не слишком-то помогает определить область, о которой идет речь, сколько-нибудь точнее. Возможно, наилучший ответ заключается в том, что физику определяют не столько те явления, которые она изучает, сколько те уникальные методы и инструменты, которые она использует. Грубо говоря, эти инструменты делятся на три группы. Как правило, каждый конкретный физик специализируется лишь на одной из них, хотя для получения искомым знаний о естественном мире необходима совместная работа всех трех.

---

<sup>3</sup> Пер. с англ. М. К. Рыклина. Цит. по: *Фрэзер Дж. Дж. Золотая ветвь: Исследование магии и религии*. 2-е изд. М.: Политиздат, 1983.

Эти три категории инструментов – это эксперимент, вычисления и теория. Физики-экспериментаторы исследуют поведение мира, ставя практические опыты. Какими бы экстравагантными и малопонятными ни становились наши научные теории, они всегда должны давать проверяемые на опыте предсказания. Эти предсказания могут быть подтверждены или опровергнуты путем наблюдений: волшебники не изобретают заклинания, а изучают их. Там, где мы видим в своих вымышленных рассказах о волшебниках, как они выучивают свои заклинания, они неизменно делают это путем наблюдения за самим миром. Например, в «Аватаре» некоторые люди обладают врожденной способностью оказывать магическое воздействие на воду, которой их предки научились, наблюдая за влиянием Луны на приливы и отливы.

Специалисты по вычислительной физике создают и испытывают компьютерные модели мира. В таких моделях явления могут происходить в более регулируемых условиях и с большей частотой, чем в экспериментах, проводимых в реальном мире. Однако при этом физики, работающие с численными моделями, должны быть уверены, что те обладают всеми существенными свойствами реальных аналогов.

Физики-теоретики тоже работают с моделями реальности. Но, если вычислители обычно предпочитают наиболее точные модели, теоретики, как правило, пытаются найти простейшую из моделей, отражающих суть того или иного явления. Теоретику нужно научиться видеть истинную сущность

вещей; этот процесс, несомненно, лежит в самом сердце любой магии.

Сам я теоретик, хотя также работаю в тесном сотрудничестве с экспериментаторами и вычислителями. Это руководство по современному колдовству написано с точки зрения теоретика – отчасти потому что это моя точка зрения, а отчасти потому что книгам такого рода свойственно сводить сложные истории к самой сути. Теоретики сочиняют аналогии, басни. Но, как сказал мне однажды коллега, доктор Янс Хенке, математическая модель – это самый сильный вид аналогии, потому что она не просто соотносит явления со знакомыми обстоятельствами: она также позволяет нам описать, причем весьма подробно, как те же явления будут происходить в новых, не испытанных на опыте ситуациях. Затем экспериментаторы могут проверить эти явления и узнать, ведут ли они себя так, как предсказывает модель. Зачастую вначале появляются опытные наблюдения, и теория – «басня» – строится на их основе. Предположим, предсказания модели подтверждаются на опыте, причем повторяемым, проверяемым образом. Это придает убедительности предположению, что простые элементы, вошедшие в эту модель, содержат в себе суть явления. Теоретическая физика часто бывает близка к математике; различие между ними возникает из разрыва между математической моделью – идеальной и предсказуемой – и реальностью, запутанным миром, который мы ощущаем на опыте. Теоретическая физика – это со-

чинение повествований, делающих математические модели более понятными.

Работа теоретика всегда напоминала мне магию истинных имен. Во многих культурах, от Древнего Египта до нынешних хакеров, существовала и существует идея о том, что знание истинного имени сущности дает власть над ней. Прекрасный пример такого представления в жанре фэнтези дают книги Урсулы Ле Гуин о Земноморье, которые считают первым примером литературного повествования, в котором волшебник является главным героем, а не второстепенным персонажем. В мире Земноморья волшебники учатся магии, прислушиваясь к миру и узнавая истинные имена вещей. Повседневные названия, которые мы используем для обозначения вещей, – всего лишь ярлыки, которые мы навешиваем на них, чтобы называть их в разговорах. В Земноморье они называются обиходными именами, но кроме них у каждой вещи есть истинное имя. Говорят, что эти имена происходят из *Языка созидания*. Например, читатель узнает, что истинное имя камня – «ток». Когда в разговоре с другими мы называем вещь ее обиходным именем, нечто теряется в переводе. Когда я говорю «камень», в моем сознании возникают определенные ассоциации, которых нет у других людей. Моя невеста Доминик объяснила мне это следующим образом. Если назвать истинное имя вещи, ничто не может потеряться в переводе просто по определению; у любого другого человека будет то же абсолютное понимание значения этого сло-

ва. Поэтому вполне естественно связывать истинные имена с заклинаниями. Как гарантировать абсолютное понимание в отсутствие самого предмета? Когда я говорю «камень», я могу иметь в виду какое-нибудь более общее свойство, присущее всем камням. Однако, чтобы произнести имя «ток», мне нужно сначала понять сущность камня.

Истинные имена бывают и у людей. В графическом романе «Невидимые»<sup>4</sup> человек, становящийся магом, должен принять магическое имя. При этом очень серьезно предупреждают, что подходить к выбору имени ни в коем случае нельзя легкомысленно: имя определяет личность. У меня есть друг, религия которого требует обращаться к праведнику при выборе имени новорожденного. Считается, что праведник способен получить некое мистическое понимание сущности ребенка и дать ему соответствующее имя. На разных этапах жизни человека, по мере его развития, тот же праведник дает ему новые имена. Имя действительно может определять некоторые аспекты жизни человека. Мое собственное имя – Феликс Фликер – звучит абсурдно и привлекает внимание; я поневоле задумываюсь, развились ли у меня самого под его влиянием эти черты. Но воздействие имени может быть и более серьезным. В исследовании, проведенном в 2012 году, было установлено, что при рассмотрении одинаковых заявлений на соискание должности в научном учреждении заяв-

---

<sup>4</sup> The Invisibles (1994–2000) – серия комиксов по сценариям шотландского писателя Гранта Моррисона. – *Примеч. перев.*

ления, поданные от лица кандидатов с женским именем, оцениваются ниже, чем поданные от мужского имени, и это считается достаточным основанием для назначения существенно более низкой зарплаты<sup>5</sup>. Даже в нашем мире имя – это не просто произвольный ярлык.

Теоретики изучают не сами сущности, а модели сущностей. Представим себе, что некий теоретик однажды бросает свой хрустальный шар с лестницы своей башни. Поскольку шар пропитан могущественной магией, он не разбивается при падении. Но теоретику нужно знать, когда он докатится до низу, чтобы вызванный орел мог своевременно подобрать его<sup>6</sup>. В мгновение ока он решает построить математическое уравнение, моделирующее качение шара по ступенькам, используя законы движения Ньютона. Но он не будет пытаться включить в модель все аспекты физического процесса. По всей вероятности, он предположит, что шар катится по ступенькам без трения, пренебрежет сопротивлением воздуха и не станет учитывать возможное возникновение несильных порывов ветра, потому что их нельзя достоверно предсказать. Наш теоретик будет надеяться, что результат процесса – который он точно может вычислить в своей модели, – будет соответствовать реальности, в которой он окажется, бро-

---

<sup>5</sup> *Corinne A. Moss-Racusin et al.* Science faculty's subtle gender biases favor male students // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. Vol. 109 (41). P. 16474–16479 (2012); doi.org/10.1073/pnas.1211286109

<sup>6</sup> Как мы знаем из Толкина, орлы всегда рады явиться на помощь в самый нужный момент. – *Примеч. автора.*

сив свой шар. «Хрустальный шар» – это обиходное имя, вот этот конкретный шар, а математическая модель – имя истинное, идеальное, не запятнанное реальностью. Если вы поняли математическое выражение, вы понимаете его в точности так же, как понимает его любой другой человек, на каком бы языке вы ни говорили. Два плюс два равно четырем, как бы это ни было записано. В модели нет никаких приближений; приближения появляются при переходе от модели к реальности. Вопрос о том, «существует» ли модель, является предметом ожесточенных философских дебатов. Если она существует, не будет чрезмерным преувеличением сказать, что это существование вызвано пониманием модели. Чтобы видеть мир с точки зрения физика-теоретика, нужно научиться слышать истинные имена: научиться вызывать из небытия совершенные математические модели. Искусство состоит в умении выбирать простейшие модели, отражающие суть изучаемого. Простота важна: карта в масштабе 1:1 будет абсолютно точной, но в то же время абсолютно бесполезной, потому что в ней не будет никаких упрощений.

Физика – это набор инструментов, которые можно применить к чему угодно, от невидимо малого до непознаваемо большого. Но внимание волшебника сосредоточено на более конкретной области, на том, что есть здесь и сейчас. Между крайностями лежит срединная область – тот знакомый мир, в котором мы живем.

## *У срединной области свои обычаи*

Все разделы физики занимаются вещами вполне волшебными. Космологи изучают рождение и жизнь Вселенной и предсказывают ее судьбу. Астрофизики слушают гравитационные волны, чтобы услышать столкновения черных дыр. Те, кто занимается физикой частиц, возбуждают квантовые поля, создавая элементарные частицы, которые до этого никогда не регистрировались. Во всех этих областях используется великолепная магия, и им посвящено множество превосходных книг. Однако между квантовым микрокосмом и вселенским макрокосмом существует срединная область. Она не менее волшебна, но ее магия принимает другие – знакомые нам – формы, и поэтому научно-популярные книги по большей части обходят ее стороной. Тем не менее это самая крупная область физики, в которой работает около трети всех исследователей.

Изучение срединной области – это физика конденсированного состояния. Это физика того, что мы видим вокруг нас, изучение материи – сгустков вещества, которые можно взять в руки, – и их описание вплоть до квантовой области, из которой они рождаются. Как известно, Вольфганг Паули, один из создателей квантовой механики, презрительно называл физику конденсированного состояния *Schmutzphysik*, «физикой грязи». Это название превосходно

описывает искусство колдовства. На мой взгляд, можно сказать, что ближайшая родственница физики конденсированного состояния – это физика элементарных частиц. Важно понимать сходства и различия между этими двумя дисциплинами. Элементарные частицы, которыми занимается вторая из них, – электроны, протоны и так далее – можно вполне обоснованно определить приблизительно следующим образом:

*Элементарная частица может существовать сама по себе в космическом вакууме и не может быть сведена к другим объектам, обладающим тем же свойством.*

Электрон соответствует этим критериям. Однако атом им не соответствует, так как, хотя в некоторых случаях он может существовать сам по себе, он состоит из других объектов (электронов, протонов и нейтронов), также обладающих этим свойством. Протон, в свою очередь, состоит из трех кварков, но кварки не могут существовать по отдельности, так что они не являются элементарными частицами в смысле приведенного выше определения.

Физика же конденсированного состояния изучает то, что возникает при взаимодействии множества элементарных частиц. Если это так, не сводится ли она попросту к физике элементарных частиц? В этой книге я постараюсь убедить вас, что это не так. Если бы у физики конденсированного состояния был девиз, он был бы таким:

*Целое больше, чем сумма составляющих его частей.*

Возможно, самую важную иллюстрацию этого принципа дает поведение частиц в материи – на мой взгляд, центральный элемент волшебства реальности. Когда электрон летит сквозь космический вакуум, у него есть определенная масса, электрический заряд и магнитное поле (так называемый «спин»). Эти определяющие свойства уникальны для электронов, и все электроны одинаковы. Если этот электрон попадает в вещество, он взаимодействует с другими частицами, находящимися в этом веществе, в соответствии с правилами квантовой механики. При этом его свойства изменяются; поскольку все электроны имеют одинаковую массу, эта частица уже не может быть электроном. Более того, она уже не может быть элементарной частицей: она превращается в «эмерджентную квазичастицу», целое, которое больше суммы составляющих его частей.

Чтобы объяснить, как это происходит, я перефразирую изящную аналогию, которую профессор Дэвид Дж. Миллер предложил для объяснения поведения одной из элементарных частиц – бозона Хиггса. Поскольку профессор Миллер упоминал, что позаимствовал ее основной образ из физики конденсированного состояния, я надеюсь, что он не будет возражать против временного возврата этого долга. Представьте себе, что в полуразрушенный бальный зал заколдованного замка набилось множество охотников за привидениями, о чем не подозревает призрак в кружевном жабо, без-

заботно плывущий вдоль по коридору, держа под мышкой собственную отрубленную голову. Призрак всплывает в зал, и внезапно на него оказываются обращены все взгляды (и сомнительные измерительные приборы). Толпа, до этого рассеянная по всему залу, скапливается вокруг него. К несчастью для призрака, он похож на привидение из книги «Полуночный сад Тома»<sup>7</sup>, то есть не способен беспрепятственно просачиваться сквозь людей. Его скорость резко падает, и ему приходится проталкиваться сквозь толпу охотников, которые никак не могут его сфотографировать. Масса призрака увеличивается – в том смысле, что для придания ему ускорения требуется большее усилие, чем когда он летел по коридору: теперь нужно сдвинуть с места не только его, но и окружающую его толпу. Чтобы несколько приблизить эту аналогию к настоящим квантовым странностям реальности, можно вообразить, что призрак ведет себя так же, как в фильме «Новые приключения Билла и Теды» (Bill & Ted's Bogus Journey, 1991): он не проталкивается сквозь толпу в своей исходной форме, а поочередно вселяется в тела людей, перескакивая из одного в другое. Его скорость все равно падает, а эффективная масса возрастает, но в зале теперь нет ничего, похожего на исходного призрака; тем не менее, когда он наконец выбирается на террасу, он вновь обретает свой изначальный вид. Когда электрон находится в веществе, он

---

<sup>7</sup> Tom's Midnight Garden (1958) – детский роман Филиппы Пирс. – *Примеч. перев.*

изменяется, однако он может вылететь из вещества и снова стать элементарной частицей.

Другие эмерджентные квазичастицы не имеют аналогов среди элементарных частиц. Например, если свет передается элементарными частицами, которые называют фотонами, то звук не может быть описан элементарными частицами, так как он не может существовать в вакууме. Поскольку звук – это вибрация, он не может распространяться в отсутствие среды. Но в веществе он распространяться *может*, и тогда его тоже можно представить в виде эмерджентных квазичастиц, называемых фононами<sup>8</sup>. Возвращаясь к аналогии Миллера, на этот раз одному из охотников за привидениями просто кажется, что он «ощутил некое присутствие», и он рассказывает об этом охотнику, стоящему рядом. Сосед последнего, услышав эти слова, передает их дальше, и вскоре слух распространяется по всему залу. Всюду, куда доходит этот слух, толпа сдвигается плотнее, *как будто* там есть призрак – хотя никакого призрака там нет. Уплотнение толпы ведет себя как объект, имеющий массу: оно оказывает сопротивление воздействию, изменяющему его скорость, в точности как фонон. Вещество, не содержащее никаких квазичастиц, можно считать аналогом космического вакуума для физики конденсированного состояния, ведь вакуум – это просто отсутствие элементарных частиц. Наглядный пример дают фо-

---

<sup>8</sup> Некоторые физики предпочитают называть фононы не квазичастицами, а коллективными возбуждениями. Я не делаю здесь этого различия. – *Примеч. автора.*

ноны. Их можно считать вибрацией атомов в кристалле; когда кристалл охлаждается, атомы вибрируют меньше и фононы исчезают. Когда в кристалле не остается ни одного фонона, он находится в состоянии наименьшей энергии, так называемом основном состоянии. Когда вы говорите в кристалл спокойным, привычным голосом, вы сообщаете ему энергию, тем самым возбуждая вибрацию его атомов и вызывая из небытия фононы. Исходя из этого, можно предложить следующее определение:

*Эмерджентная квазичастица может существовать сама по себе выше основного состояния материала и не может быть сведена к другим объектам, обладающим тем же свойством.*

Эмерджентные квазичастицы не могут быть сведены к элементарным частицам без потери существенной части этого описания: представьте себе толпу, в которой все притискиваются друг к другу, чтобы расслышать слух о появлении призрака. Разумеется, эту ситуацию можно описать в терминах индивидуальных охотников за привидениями, но при этом теряется общая картина. В этом суть идеи «эмерджентности», концепции, согласно которой целое может быть чем-то большим, чем сумма его составляющих: у толпы есть свойства – например ограничения возможностей движения, – которых нет у составляющих эту толпу индивидов. В физике конденсированного состояния роль индивидов обычно играют атомы и элементарные частицы,

а эмерджентными свойствами являются макроскопические свойства вещества, понимаемые в терминах эмерджентных квазичастиц.

Квазичастицы встречаются только в физике конденсированного состояния. Многие из них обладают поразительно призрачными, ирреальными свойствами: фононы можно зарегистрировать в эксперименте, но при попытке найти их на уровне элементарных частиц оказывается, что их не существует. Это просто коллективная вибрация атомов.

Исходя из этого, может возникнуть искушение заявить, что квазичастицы «менее реальны», чем те элементарные частицы, из которых они рождаются. Однако взглянем на этот вопрос вот с какой точки зрения: мы считаем окружающий нас мир – срединную область – реальным. Напротив, квантовая область кажется нам полной мистического морока. Однако знакомый нам мир оказывается свободен от квантовых трюков *именно потому*, что он эмерджентен. Отрицать реальность квазичастиц – значит отрицать реальность повседневного бытия. Не существует элементарных частиц, переносящих звук, но это не мешает нам слышать далекое уханье сов в соседнем лесу.

### *Совы – не то, чем они кажутся*

Теоретики работают во всех отделах физики, выделяя из реальности ее суть. Но это выделение может принимать мно-

го разных форм. Те, кто занимается физикой элементарных частиц, стараются выявить отдельные составляющие элементы Вселенной – самые мелкие движущиеся части реальности. Эта программа добилась поразительных успехов, главным из которых стало создание Стандартной модели, учитывающей все известные элементарные частицы. Возможно, конечной целью этого предприятия следует считать «теорию всего», которая добавит к Стандартной модели последний недостающий ингредиент – гравитацию. Если такая теория действительно будет создана, в ней будет содержаться ключ к пониманию будущего Вселенной. Но, как вы, вероятно, понимаете, на самом деле она не будет теорией *всего*. По сути, такая теория не будет описывать *ничего* из того, с чем мы сталкиваемся каждый день. Она будет теорией всех элементарных частиц и их взаимодействий, но не будет теорией, скажем, сов.

Не существует элементарной частицы сов, и все же мы считаем, что сами совы существуют. Они состоят из атомов множества разных типов. Каждый атом состоит из протонов, нейтронов и электронов. Таким образом, совы не элементарны, а эмерджентны. Сова представляет собой сложный, беспорядочный набор характеристик; она больше, чем сумма составляющих, из которых она возникает. Простейшими из этих составляющих могут быть элементарные частицы, атомы, клетки, гены или что-нибудь еще. Эти описания нижнего уровня не исключают друг друга, и ни одно из них, строго

говоря, нельзя назвать неверным. Однако они не отражают когтей сов, их крика, их клюва или распространенных представлений об их связях с колдовством.

Физика конденсированного состояния не изучает сов (во всяком случае, пока). Однако она изучает то, что возникает при взаимодействии множественных объектов, и именно этим срединная область отличается от мира микроскопического. Старая пословица утверждает, что одна голова хорошо, а две – лучше. Реже отмечают тот факт, что две головы лучше одной более чем вдвое: дополнительное преимущество дает эмерджентность. А когда огромное множество частиц собирается вместе и образует комок вещества, могут возникать целые новые миры.

Эта книга рассматривает вопрос о том, какие формы могут принимать эти новые миры. Если выпарить повествование до самой сути, полученная эссенция даст ответ на следующий вопрос: что такое материя?

Понять этот ответ можно многими разными способами, и каждая из глав будет посвящена одному из возможных, взаимно дополнительных подходов. Наше исследовательское путешествие будет состоять из трех этапов.

## *Туда и обратно*

Однажды, странствуя по пустыне, я встретил фокусника. Мы беседовали о том и о сем и в конце концов заговорили об

эстрадных фокусах. Я спросил фокусника, знает ли он моего любимого иллюзиониста Деррена Брауна, который напоминает публике в начале каждого представления, что использует сочетание «магии, внушения, психологии, отвлекающих маневров и актерского мастерства». Фокусник о нем знал.

Я рассказал фокуснику, что мое уважение к Деррену Брауну развивалось в два этапа. Вначале, когда я смотрел его выступления, меня восхищали его блестящие сеансы телепатии и внушения. Он читал мысли, заставлял видеть то, чего там не было, или исполнять невероятные трюки. Он использовал пробелы в нашем восприятии реальности, чтобы показать, что наши модели мира уязвимы для манипуляций. Но по мере маниакального, многократного просмотра его выступлений я в конце концов понял, что многого можно достичь не психологическими манипуляциями, а хитроумной ловкостью рук и традиционными фокусами. Тогда-то мое восхищение и перешло на новый уровень. Это было *настоящее* волшебство! Браун заставил меня, рационального скептика, снова поверить в магию, и добился он этого, используя слепое пятно науки – тайны мозга.

Фокусник из пустыни сказал мне, что считает Деррена Брауна величайшим из живущих фокусников. Он согласился, что в его случае, как и в отношении любых по-настоящему великих фокусов, существуют две степени восхищения. Но, добавил он, есть и третья степень: восхищение коллеги, профессионала, смотрящего эти фокусы. Фокусник зна-

ет, сколько приемов использовано в том или ином фокусе и как именно этот фокус исполняется, – но все равно, глядя на работу Деррена Брауна, поражается его несравненному техническому искусству. Наблюдать столь мастерское исполнение фокусов доставляет профессионалу истинное наслаждение.

В том, о чем говорил фокусник, я узнал нечто аналогичное пути к пониманию, который проходит ученый. Это и есть то трехэтапное путешествие, в которое отправляемся все мы. В молодости мир приводит нас в восхищение. Все в нем для нас ново, его чудеса поражают нас. Это первый этап: восторг от представления. По мере взросления мы начинаем узнавать, как вещи устроены. Так мы приближаемся ко второму этапу – пониманию того, как именно мир делает свои фокусы. На этом этапе легко заблудиться, забрести в холодную, темную пещеру рационализма. Но если вы способны поддержать в себе хотя бы тлеющий огонек восторга, его всегда можно снова зажечь всего лишь легким дуновением. При наличии терпения и небольшого везения вы сможете разжечь это пламя и перейти к третьей стадии понимания – стадии ученого, понимающего, как устроены фокусы, которые показывает нам мир, и любящего его еще больше за то, как искусно он это делает.

Познание окружающей нас материи – это история, которую дополняют и пересказывают на протяжении веков. По мере продвижения по этой книге мы познакомимся с разны-

ми взглядами на природу материи. Мы начнем с далекого прошлого, когда все состояло из земли, воздуха, огня и воды, и дойдем до отдаленного будущего: там нашу жизнь преобразуют вещи, в которых физика конденсированного состояния только сейчас начинает разбираться. В первых главах мы составим основные заклинания – сведения, передававшиеся из поколения в поколение и охватывающие те знания, которые должны получить в процессе обучения все желающие заниматься этой наукой. Подготовившись таким образом, в следующих главах мы начнем продвигаться в будущее, знакомясь с заклинаниями, которые специалисты по физике конденсированного состояния только учатся использовать.

Если из этой книги можно извлечь один главный урок, я надеюсь, что он будет состоять вот в чем. Волшебники существуют, и, если вы хотите стать одним из них, вас с радостью примет сообщество физики конденсированного состояния. Если вас беспокоит то обстоятельство, что вы не соответствуете традиционному образу физика, вы тем более нужны нам. Физикой конденсированного состояния занимаются, и чем дальше, тем чаще, люди из самых разных областей. Я вкратце расскажу о тех вкладках, которые внесли в эту дисциплину в прошлом и настоящем некоторые конкретные физики, и надеюсь, что это даст вам хотя бы общее представление о разнообразии тех, кто занимается этой наукой.

С другой стороны, рассказы о персонажах прошлого не следует воспринимать как согласие со всем тем, что они го-

ворили. Процитированный выше Дж. Дж. Фрэйзер обладал изящным слогом, но взгляды его были реакционными даже для его времени. Кроме того, не во всем еще одержана победа. Например, до 2017 года лишь два из 216 нобелевских лауреатов по физике были женщинами;<sup>9</sup> первый лауреат, не бывший выходцем из Европы или Северной Америки, появился только через 30 лет после учреждения премии;<sup>10</sup> эту премию до сих пор не получил ни один человек из Африки, из Южной Америки или с Ближнего Востока. Нобелевские премии – лишь один из симптомов гораздо более широкомасштабной проблемы, состоящей в том, что только узкий срез нашего общества получает возможность заниматься наукой, а вклад тех, кто не соответствует стереотипам, не оценивается по достоинству или игнорируется. Я буду время от времени упоминать Нобелевские премии, так как это удобный способ подчеркнуть важность той или иной работы, но следует помнить, что отсутствие премии часто говорит только о предрассудках и ни о чем больше. Ситуация постепенно улучшается: Нобелевские премии были присуждены женщинам в 2018 и 2020 годах<sup>11</sup> (правда, лауреатов мужского пола за тот же период было семеро). Этот прогресс жизненно ва-

---

<sup>9</sup> Мария Кюри (1903) и Мария Гёпперт-Майер (1963). – *Примеч. перев.*

<sup>10</sup> Это был индийский физик Чандрасекхара Венката Раман (1930). – *Примеч. перев.*

<sup>11</sup> В 2018 г. премию получила Донна Стрикленд, а в 2020-м – Андреа Гез. – *Примеч. перев.*

жен для будущего науки: лучший способ решения сложных задач – учет как можно большего числа разных взглядов и подходов. Поэтому если вам покажется, что вы не соответствуете описаниям ученых или волшебников прошлого, значит, будущее этой науки именно за вами.

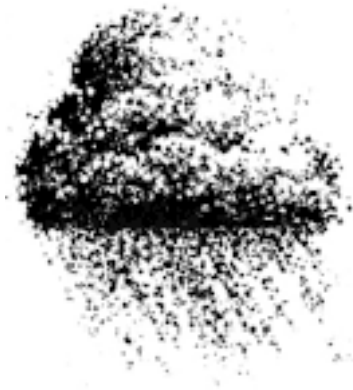
Мне хотелось бы рассказать вам, что на изучение физики меня вдохновило желание стать волшебником или любовью к фэнтези. Я действительно помню, как меня привлекали мистические слова и идея эзотерических знаний, открытых лишь посвященным, но на самом деле и к тому, и к другому меня влекло нечто более глубокое: любовь к воображению. Те же способности, которые используются для создания вымышленных миров, применяются и для воплощения этих миров в физических теориях, и для изобретения способов добраться до них в экспериментах. Я буду использовать эту связь на протяжении всей книги, подчеркивая магию физики вымышленными историями и ссылками на классические книги и фильмы. Как видно из отрывка, который открывает эту книгу, магию часто бывает легче увидеть, когда она представлена в виде вымысла. Однако я надеюсь, что к концу этой книги вы согласитесь: реальный мир не менее волшебен, чем самые увлекательные из содержащихся в нем историй.

Приступим же к изучению «физики грязи». О многих заклипаниях в этой книге не говорится, и она не ставит себе целью научить вас использовать их. Мир и так рассказывает

вам свои заклинания; цель этой книги – помочь вам услышать.

## II

# Четыре стихии



Однажды леди Долгоух и мистер Калабаш сбивали с дерева оливки. Вокруг них роились поденки. Мистер Калабаш сказал:

– Задумывалась ли ты когда-нибудь, что эти поденки проводят с нами всю свою жизнь? Мы приходим работать на заре. К нашему утреннему чаепитию они рождаются, к нашему обеду достигают среднего возраста, а к тому моменту, когда мы спускаемся с горы и уходим домой, они уже мертвы. Те, кому повезет, успевают спариться, но многие другие проводят свою короткую и бессмысленную жизнь незамеченными, разве что иногда помешав нам работать.

– Их жизнь не бессмысленнее твоей или моей, – ответила леди Долгоух. – Взгляни, например, на эту оливу. Она проросла во времена наших давно забытых предков. К тому времени как она достигла зрелости, в наших семьях родились и умерли многие поколения. Когда придет ее час, нас с тобой давно не будет на свете.

«К тому же, – добавила к ее словам олива, – вы двое тоже не совершили ничего заметного, разве что иногда досаждали мне.

Первые люди, которые меня нашли, меня не тревожили. Дети их детей попробовали мои плоды и сочли их отвратительными. Их внуки научились засаливать эти плоды. С тех пор меня никак не оставят в покое. Всего лет через сто вы начали выращивать ниже по склону моих отпрысков. Еще через поколение вы даже научились правильно поливать их, хоть и не настолько правильно, как питают меня воды этой горы».

«Да уж я думаю, – вступила в разговор гора. – Твои, олива, наблюдения, неполны. Для меня вы все незначительны. Я, дорогое дерево, видела, как бесчисленные поколения животных приспособивались есть твои плоды, а ты точно так же приспособивалось использовать животных.

В юности я вышла из моря и смотрела, как сталкиваются континенты. Взрослея, я наблюдала появление и исчезновение видов. Для меня все ваши виды – лишь мимолетные блики. Я живу временем всей нашей планеты и понимаю временные масштабы самой Вселенной».

Тут и сама Вселенная не удержалась и присоединилась к беседе:

«Гора, ты говоришь, что понимаешь мои временные масштабы, но не осознаешь, что их у меня нет. Я простираюсь далеко в твое будущее и твое прошлое, но также живу и в каждом событии между ними. Ты видишь, как появляются и исчезают виды, но поколения настолько не важны для тебя, что ты не можешь отличить одно от другого.

Дерево, мне очень нравится твое существование. У тебя тоже есть своя гордость. Ты видишь целые поколения таких, как Долгоух и Калабаш, но сами они позволяют тебе увидеть лишь мимолетные мгновения своего существования.

Ты, Калабаш, утверждаешь, что целые жизни поденок незначительны по сравнению с единственным лишенным событий днем твоей собственной жизни. Возможно, тебе следует задуматься вот о чем.

Все вы и правы, и неправы, как и я. Мою истинную природу невозможно высказать, но я дам вам грубое приближение. Я сосуществую с вами на временных масштабах каждого из вас, но при этом еще и содержу в себе все другие события, какие только случались в прошлом и случатся в будущем. В вашем понимании всё это происходит совместно.

Я содержу в себе аннигиляцию частиц, существующих столь недолго, что, по сути дела, нельзя сказать, что они вообще существуют, и других, которые

существуют вечно, никогда не встречаясь ни с чем другим. Во мне существуют поденки, проживающие свой век, и планеты, проживающие свой, и все эти вещи абсолютно важны и совершенно бессмысленны».

Тогда мистер Калабаш признал неправоту своих замечаний о поденках и отправился домой, чтобы как следует подумать о том, чем он сегодня будет ужинать.

## *Эмерджентность*

Сколько нужно собрать песчинок, чтобы получилась куча?

Явного и удовлетворительного ответа на этот вопрос не существует. Можно предложить какое-нибудь число – скажем, четыре. Но куча из четырех песчинок не будет особенно убедительной, и, если кто-нибудь спросит, почему три песчинки не образуют кучи, а пять уже образуют, вы сможете только ответить, что назвали число и не откажетесь от него. Приблизительно так же поступили ученые, когда определили число атомов, образующих кусок вещества разумных размеров. Это число, называемое постоянной Авогадро, в точности равно

602 214 076 000 000 000 000 000.

Это чуть больше полутриллиона триллионов. Число это очень велико: для сравнения скажем, что в Млечном Пути содержится всего лишь двести миллиардов звезд. Но, как бы

ни была велика постоянная Авогадро, это тем не менее фиксированное число: если атомов будет на один меньше, размер вашего куса вещества, если верить определению, будет чуть-чуть недостаточным.

Возможно, расплывчатый ответ будет лучше точного. Даже если дать точное определение кучи трудно, часто бывает легко сказать, образует ли то или иное число песчинок кучу. Неопределенность местоположения береговой линии не отменяет того факта, что мы легко можем указать, что одна точка несомненно находится в море, а другая – определено на суше. Две песчинки – это явно не куча, но миллион песчинок, соприкасающихся друг с другом и собранных в нечто приблизительно конической формы, определено составляют кучу: куча возникает из песчинок.

Эта глава посвящена эмерджентности: тому, как взаимодействия атомов на мельчайших пространственных и временных масштабах порождают измеримые крупномасштабные эффекты в нашей срединной области.

Наша область построена из состояний вещества – то есть видов коллективного поведения атомов. Понимание эмерджентности означает понимание того, как из мира атомов вырастают состояния вещества. Я хожу по земле, плаваю в воде, дышу воздухом и греюсь у огня. Все это может показаться ничуть не более удивительным, чем возникновение кучи песка из отдельных песчинок. Но те же самые атомы могут проявлять много разных видов эмерджентного пове-

дения: например, сочетания молекул воды могут образовывать лед, жидкую воду или пар. Нам приходится постигать множество таких тонкостей. Чтобы понять состояния материи и переходы перед ними, нам нужно научиться мыслить в разных пространственных и временных масштабах, как научился этому мистер Калабаш; так же, как Калабаш, мы будем одновременно сталкиваться с образованиями, возникающими на разных пространственных и временных масштабах, от самых малых до самых крупных. Наши исследования заведут нас в отдаленное прошлое, где мы увидим изначальный проблеск физики конденсированного состояния, ранних концепций эмерджентности. Это будет самым настоящим посвящением в волшебники.

Нельзя отрицать, что волшебники очень жадны по части накопления сокровенных знаний. Но они копят эти знания не ради самого накопления: ими всегда руководят некие практические цели (см. правило 4: *Знания волшебников – это знания практические, прикладные*). Чем лучше мы понимаем состояния вещества, тем лучше мы можем использовать их с выгодой для себя. Это не означает подчинять их своей воле: мы по-прежнему остаемся частью мира (правило 2: *Волшебники понимают, что являются частью того мира, который они изучают*). Эта мысль изящно выражена в «Ле-цзы», даосском трактате, написанном в Китае в IV веке. Там рассказывается, что однажды Конфуций увидел, как некий пловец легко пересекает кажущийся непреодолимым

водоворот. Пловец объясняет:

*Я вхожу в воду посредством преданности и доверия, а выходя из воды, по-прежнему блюду преданность и доверие. С преданностью и доверием погружаюсь я в поток и не позволяю себе действовать самочинно<sup>12</sup>.*

Пловец понимает, что является частью водного потока, и следует ему с выгодой для себя. Если в таких дисциплинах, как физика элементарных частиц, космология и астрофизика, вполне можно отличать ученого от предмета его исследований, то физика конденсированного состояния неразрывно связана с миром повседневного опыта. Эта практическая сторона сокровенного знания была частью физики конденсированного состояния начиная с самых ранних, доисторических этапов ее существования. О ней же в первую очередь думали два человека, давшие этой дисциплине ее имя.

### *Больше – другое*

Один из основателей физики конденсированного состояния, профессор Филип Уоррен Андерсон, свел суть этой науки к одной простой фразе: больше – другое. В этом и заключается принцип эмерджентности. В статье 1972 года под таким же названием Андерсон утверждал:

---

<sup>12</sup> Пер. с др. – кит. В. В. Малявина. Цит. по: Чжуан-цзы. Ле-цзы. М.: Мысль, 1995. Серия «Философское наследие». Т. 123.

*Способность свести всё к простым фундаментальным законам не предполагает способности восстановить Вселенную, исходя из этих законов. Собственно говоря, чем больше физика элементарных частиц сообщает нам о природе этих фундаментальных законов, тем менее применимыми они кажутся к чрезвычайно реальным задачам остальных отраслей науки и уж тем более общества.*

В Кавендишской лаборатории Кембриджского университета, где Андерсон работал на протяжении значительной части своей карьеры, некогда существовала исследовательская группа под названием «Теория твердого состояния». Сотрудникам этой группы довольно давно стало ясно, что их интересы выходят далеко за пределы области твердых веществ. В 1967 году Андерсон и его коллега профессор Фолькер Гейне дали группе новое название – «Теория конденсированного вещества», – включив тем самым в рассмотрение все вещества, в той или иной мере «конденсированные», то есть такие, в которых взаимодействие между частицами порождает некое коллективное поведение, наблюдаемое на повседневном уровне. Называние есть акт творения: давая имя, мы включаем в категорию одни сущности и исключаем из нее другие. Эту идею лаконично выразила в книге «Чистота и опасность» (Purity and Danger, 1966), исследовании ритуальных табу и магических верований, социолог Мэри Дуглас:

*По мере научения объектам присваиваются имена. Эти имена влияют на то, как эти объекты будут восприняты в следующий раз: получив метки, они скорее будут попадать каждый в свою классификационную ячейку<sup>13</sup>.*

Название «физика конденсированного состояния» распространило область интересов этой науки с твердых веществ на всю материю вообще, и это переименование и по сей день продолжает определять развитие этой дисциплины.

Мне повезло встретиться как с Гейне, так и с Андерсоном. С Гейне я познакомился в 2015 году, когда заканчивал свою диссертацию в Бристольском университете. Я приехал в Кембридж провести семинар и, повинувшись внезапному порыву, постучал в дверь его кабинета. Он появился передо мною в рубашке совершенно психоделической расцветки и со здоровенным металлическим медальоном на груди и радостно пригласил меня войти, хотя понятия не имел, кто я такой. Его кабинет украшала собранная на протяжении всей жизни коллекция загадочных артефактов, а наша беседа стала одной из самых интересных в моей жизни. Разговор начался с физики, но потом мы поговорили о множестве самых разных предметов, пока не добрались до бегства из нацистской Германии в Новую Зеландию, которое он пережил в детстве. К сожалению, тема подобных побегов часто воз-

---

<sup>13</sup> Пер. с англ. Р. Г. Громова. Цит. по: *Дуглас М.* Чистота и опасность: анализ представлений об осквернении и табу. М.: Канон-пресс-Ц, Кучково поле, 2000.

никает в истории физики XX века.

На следующий год я начал работать научным сотрудником в Калифорнийском университете в Беркли. Оттуда я полетел – тоже провести семинар – в Принстон, где и познакомился с профессором Андерсоном, обосновавшимся в Принстоне после выхода на пенсию в 1984 году (физики, как и волшебники, никогда по-настоящему не отходят от дел). Поскольку гостевой кабинет находился прямо напротив кабинета Андерсона, а его дверь, как мне показалось, всегда оставалась открытой, я постучался и поздоровался. Там я удостоился еще одного увлекательнейшего разговора, всячески стараясь не терять самообладания в присутствии сразу двух Андерсонов – живого и его картонной фигуры в натуральную величину, стоявшей рядом с ним. Меня очень обнадежил рассказ Андерсона о том, как он пришел к своим столь высоко ценимым сейчас идеям. Я думаю, дело было в том, что я понял: живые легенды – тоже люди; им тоже случается ощущать неуверенность относительно того, как будут восприняты их идеи.

Вечером того же дня я рассказал о своем разговоре с Андерсоном некоторым из принстонских постдоков. Это их поразило: они никогда не слышали, чтобы с ним кто-нибудь беседовал! Поскольку никто не решался к нему приблизиться, его считали неприступным. На самом же деле его моральная поддержка оказалась очень полезной в карьере, которая часто бывает непредсказуемой.

Хотя очертания берегов физики конденсированного состояния могут быть нечеткими, все волшебники могут назвать одной из определяющих характеристик этой дисциплины море эмерджентности. Тем не менее, хотя эта идея кажется интуитивно понятной, ее может быть трудно выразить словами. Начать можно со знаменитого коана дзен-буддизма:

*Это [хлопает в ладоши] – звук хлопка двумя ладонями. А каков звук хлопка одной ладонью?*

Хлопок не содержится ни в одной из двух ладоней; он возникает из их сочетания. Мой друг, философ Леонид Тарасов предложил следующее определение:

*Явление эмерджентно тогда, и только тогда, когда оно объяснимо в терминах других явлений, но его объяснение не может быть сведено только к ним.*

Другими словами, при исключении из объяснения самого эмерджентного явления из него исчезает нечто существенное. Нужно отметить, что эмерджентность в этом смысле не противоречит другой основе научной мысли – редукционизму, который стремится сводить явления к их сути. Редукционизм – это процесс отделения важных элементов от несущественных. Когда Шерлок Холмс расследует дело, он повторяет нам историю, которую мы только что прочитали, но в редуцированном виде, сохраняя лишь существенные детали. Он способен на это, потому что понял задачу и знает, на

какие детали можно не обращать внимания. Как любит подчеркивать мой друг, теоретик Крис Хули, эмерджентность на самом деле представляет собой один из видов редукционизма, но существенные детали в ее случае – это не мельчайшие элементы (элементарные частицы), а коллективные явления. И это вполне понятно: если вам предложат за несколько секунд нарисовать волшебника, вы, вероятно, набросаете условную человеческую фигуру с несколькими деталями – остроконечной шляпой, усыпанной звездами, жезлом, может быть, и совой на плече. Вряд ли вы попытаетесь нарисовать за отведенное время как можно больше атомов, хотя волшебника можно описать и таким образом.

Понятное объяснение можно сформулировать на примере муравьев. Вероятно, вполне можно утверждать, что отдельные муравьи не придумывают особенно замысловатых схем, но целая колония муравьев способна принимать весьма хитроумные коллективные решения. Физик Ричард Фейнман довольно подробно пишет о своих наблюдениях за муравьями в автобиографии «Вы, конечно, шутите, мистер Фейнман!» (Surely You're Joking, Mr Feynman! 1985). Сначала он заметил, что если посмотреть на цепочку муравьев, пробирающихся к источнику пищи – например кусочку сахара – и от него, оказывается, что они часто выбирают весьма рациональный маршрут. Но как муравей узнает, какой маршрут будет самым лучшим? С учетом масштаба муравья сахар находится далеко от гнезда; на таком расстоянии муравей,

вероятно, не видит сахара и не слышит его запаха. Фейнман наблюдал следующее явление. Муравей находит кусочек сахара, по сути дела, случайно. Когда это происходит, он набирает некоторое количество сахара и возвращается к муравейнику довольно-таки окольными путями. Фейнман предположил, что муравей, возможно, оставляет на своем обратном пути ароматические метки, сообщающие другим муравьям, что он нашел нечто ценное, потому что затем по пути, ведущему к сахару, начинают сновать другие муравьи. Постепенно маршруты, по которым следующие муравьи добиваются до сахара, становятся все рациональнее: муравьи срезают углы и находят более короткие пути. Очень скоро муравьиная тропа становится хорошим приближением к кратчайшему пути от муравейника к сахару.

Наблюдая это природное явление, Фейнман придумал гипотезу, объясняющую его. Однако, будучи добросовестным ученым, он придумал и эксперимент, позволяющий проверить эту гипотезу на практике. Муравьи попадали в дом через щель у окна и вначале оказывались на подоконнике. Он подвесил кусочек сахара на нитке, чтобы уменьшить вероятность того, что какой-нибудь муравей наткнется на него случайно. Затем он положил на подоконник клочок бумаги. Каждый раз, когда на бумаге оказывался муравей, он подносил бумагу к сахару. Каждый раз, когда муравей слезал с сахара обратно на этот бумажный паром, Фейнман возвращал его на подоконник. Муравьи очень быстро начали передви-

гаться по прямому пути к бумажному парому, переезжать на нем к сахару, а затем возвращаться на паром и далее в муравейник. Это подтверждало справедливость гипотезы о том, как муравьи выбирают свои маршруты.

Ни один отдельный муравей не понял, как использовать паром: эта идея возникла из совокупности муравьев, коллективно. В дикой природе наблюдали, как муравьи, сцепляясь друг с другом, образуют мосты через расселины шириной в десять или двадцать муравьиных тел. С другой стороны, их поведение иногда бывает ошибочным: иногда можно видеть, как огромные количества муравьев-солдат образуют «смертельные круги» – они ходят друг за другом по кругу, пока в конце концов не умрут от истощения сил. Выяснение того, как такое сложное поведение возникает на основе простых правил, открывает перспективы разнообразных приложений, от «роевой робототехники» (простых роботов, работающих совместно без руководителя) и нанотехнологий до «программируемой материи» (молекулы которой можно «научить» изменять положение для образования требуемой конфигурации). Одной из главных тем исследований в области информатики являются искусственные нейронные сети, позволяющие компьютеру распознавать образы, используя коллективную работу многочисленных простых процессов, – подобно нейронам мозга. Во всех этих случаях речь идет о крупномасштабном сложном поведении, объяснимом в терминах более простых составляющих меньшего масшта-

ба, но не сводимом к ним одним.

Однако самый классический пример, возможно, дает именно то, что интересует нас в этом исследовании больше всего, – сама материя.

## *Состояния материи*

Состояния материи хорошо описал греческий философ Эмпедокл, предположивший, что все на свете состоит из сочетаний классических «стихий» (элементов) – земли, воздуха, огня и воды. Поразительно сходные теории материи существовали и во многих других культурах, в том числе в Древней Индии, Египте, Вавилоне и Тибете, а также в индуизме и буддизме.

На самом деле эта идея, возможно, зародилась в Западной Персии. От названия зороастрийских жрецов – магов, занимавшихся эзотерическими исследованиями в алхимии, астрологии и астрономии, – произошли слова, обозначающие магию во многих языках. Логично предположить, что они были своего рода древними предшественниками современных ученых; если это так, то четыре стихии представляли изначальные познания в физике конденсированного состояния.

Эти стихии поразительно хорошо сохранились и в современной физике в виде знакомых нам четырех состояний вещества: земле соответствует твердое состояние, воде – жид-

кое, воздуху – газообразное, а огню – плазма, пример четвертого состояния вещества. Хотя у всех этих состояний разные свойства, их общая черта состоит в том, что все они возникают лишь тогда, когда набирается достаточно индивидуальных частиц, чтобы их было не различить в общей толпе. Чтобы понять это, важно научиться рассматривать мир на разных пространственных масштабах.

Рассмотрение разных пространственных и временных масштабов жизненно важно для физики конденсированного состояния, потому что в этой дисциплине рассмотрение эмерджентных свойств повседневного мира часто начинается с описания в терминах элементарных частиц. Эти масштабы удобно классифицировать по методикам экспериментальных исследований, которые применяются для их изучения.

Например, взгляните на свой волшебный посох, который стоит у стены. Предмет, который вы видите, живет на «макроскопическом масштабе», или макромасштабе – привычном масштабе повседневных вещей, которые можно увидеть невооруженным глазом. Речь идет о размерах, скажем, от миллиметра до нескольких метров.

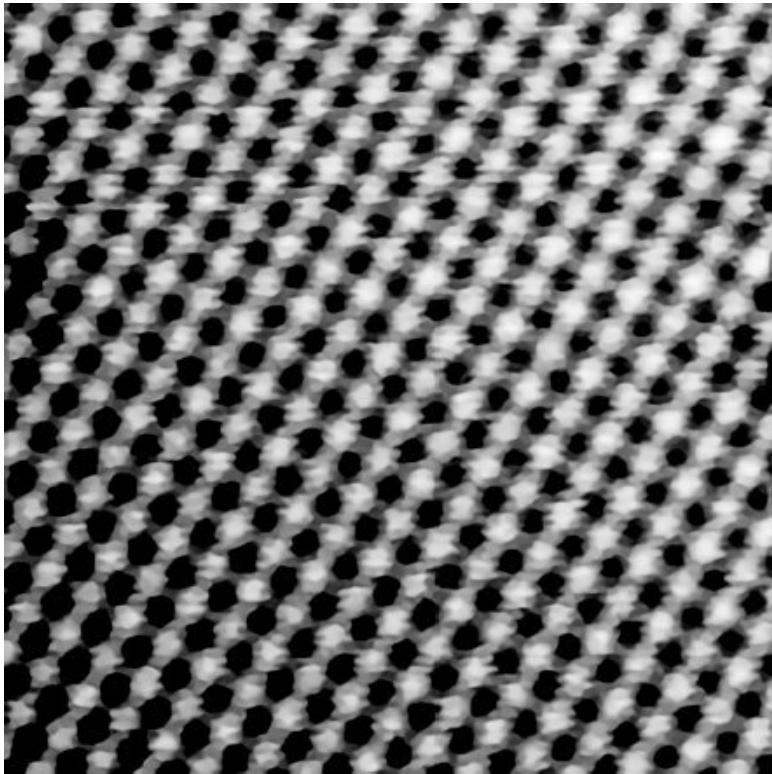
Если у вас есть под рукой микроскоп, вы можете исследовать свой посох поподробнее, до расстояний порядка одной тысячной миллиметра. Это соответствует верхней границе «микромасштаба». Под микроскопом можно увидеть отдельные растительные клетки посоха. Если же – что мало-

вероятно – у вас есть под рукой сканирующий туннельный микроскоп (они обычно занимают целую комнату), вы можете разглядеть расстояния нанометрового масштаба (порядка одной миллионной миллиметра), или «наномасштаба». На отрезке длиной в один нанометр поместятся всего пять атомов вашего посоха; ширина спирали ДНК составляет около трех нанометров. Лучшие из сканирующих туннельных микроскопов обладают разрешением около одной десятой нанометра, что приблизительно соответствует диаметру отдельного атома.

Когда я услышал, что можно получать изображения индивидуальных атомов, я в это не поверил. Уж наверное Вселенная должна была постараться, чтобы такое знание оставалось в тайне. Однако сейчас мне выпала честь работать с экспериментаторами, которые безо всякого труда рассматривают наномасштабные объекты, исследуя тайны нашего мира. Одним из ведущих мировых специалистов по сканирующей туннельной микроскопии является профессор Видья Мадхаван из Иллинойского университета в Урбане-Шампейне. Она и ее аспирант Хорхе Оливарес Родригес любезно прислали мне это изображение атомов стронция, которое они получили при помощи сканирующего туннельного микроскопа. Некоторая его нечеткость объясняется тем, что микроскоп подходит вплотную к фундаментальным пределам, установленным квантовой механикой.

Словосочетанием «микроскопический масштаб» иногда

обозначают все пространственные масштабы, для исследования которых нужны микроскопы любого рода. Я тоже буду использовать здесь это условное обозначение, подразумевая, что мир делится на две части – микроскопическую и макроскопическую. Вооружившись этой терминологией, мы можем разобраться в четырех стихиях и присущих им состояниях материи.



Отдельные атомы стронция в кристалле под сканирующим туннельным микроскопом. Изображение предоставлено профессором Видьей Мадхаван

Твердое состояние представлено в четырех стихиях землей. Вообще говоря, мы понимаем, что такое твердое вещество, но дать этому состоянию точное определение оказы-

вається делом весьма непростым. То определение, которое в конце концов выработали ученые, вряд ли будет первым, пришедшим вам в голову: они установили, что только твердые тела могут быть устойчивы к «напряжению сдвига». Напряжение сдвига – это усилие, возникающее, когда одну сторону тела толкают в одном направлении, а противоположную – в противоположном. Такое усилие создает фокусник, сдвигающий с колоды игральные карты. Вообразите, что конкурирующий иллюзионист тайно подменил его колоду точной копией, изготовленной из единого куска твердого вещества. Нашему фокуснику не удастся сдвинуть верхнюю карту, потому что атомы карт в этой копии колоды связаны друг с другом.

Твердые вещества естественным образом подразделяются на две категории – кристаллы и стекла. Различие между ними яснее всего видно на наномасштабе. Атомы кристалла расположены периодически, то есть через регулярные интервалы, подобно гребням волн или клеткам шахматной доски. На фотографии профессора Мадхаван видно, что атомы стронция находятся именно в такой структуре. Напротив, любое твердое вещество с беспорядочным расположением атомов называется стеклом. Стекло, из которого сделаны винные бутылки, – один из примеров такого вещества, но существует и множество других стекол, в том числе обсидиан и некоторые керамические материалы.

Отличие кристаллов от стекол выходит на передний план

в вечном споре относительно того, является ли стекло жидкостью. На самом деле ответ на этот вопрос зависит от временного масштаба, о котором идет речь. Одно из часто приводимых доказательств в подтверждение жидкостной природы стекла заключается в том, что окна в старых церквях бывают толще внизу, чем наверху, что позволяет предположить, что они медленно стекают вниз. В действительности это не так: по старинным производственным технологиям стекло раскатывали в нагретом добела (и определенно более похожем на жидкое) состоянии, в результате чего один из краев оконных стекол получался утолщенным. Когда делали окна, стекло обычно устанавливали этим концом вниз, и поэтому утверждать, что форма старых оконных стекол свидетельствует о том, что стекло – жидкость, неверно. Тем не менее стекло действительно течет – только очень, очень медленно. Но текут и некоторые твердые вещества: например, свинцовые трубы заметно прогибаются за несколько лет. Вопрос заключается в том, на каком временном масштабе происходит такое течение? Например, кажется разумным называть свинец твердым веществом, так что течение на масштабе в несколько лет, видимо, можно считать слишком медленным для жидкости. С другой стороны, некоторые сыры растекаются за считанные минуты или даже секунды.

Я поговорил с доктором Камиллой Скаллиет, исследовательницей из Кембриджа, специализирующейся на стекле и стеклоподобных веществах, и спросил ее, где исследователь-

ское сообщество проводит границу между твердыми веществами и жидкостями. Она ответила, что вещество, заметно текущее на масштабе сотни секунд, они считают жидкостью, а в противном случае – стеклом (или даже более твердым веществом). Вот вам и ответ! Это тоже природное волшебство, похожее на разговор о том, образуют ли четыре песчинки кучу. Определение, несомненно, точное, но вполне произвольное.

Процесс получения знаний о стекле очень похож на трехступенчатую последовательность изменения отношения к фокусам. Сначала вы просто наслаждаетесь зрелищем: природа создала твердое вещество, которое течет! Затем, на втором этапе, наступающем чуть позже, вы познаете технику, скрывающуюся за фокусом, и распространяете ее на более широкое мировоззрение. Стекло – жидкость; ничего удивительного, что оно течет. Погодите, вы разве не знали, что стекло – жидкость? Пфф. На этом этапе легко застрять. Но если вам очень повезет, еще чуть позже вы перейдете с него на третий – поймете, что вам не следовало так легко отказываться от веры в волшебство. Стекло – это аморфное твердое вещество или переохлажденная жидкость (то есть жидкость при температуре меньшей температуры замерзания), и существует огромное множество таких не поддающихся классификации материалов. Хотя они на виду, их скрывают от нас наши попытки разложить все по категориям. Мир все-таки волшебен, и теперь вы можете оценить зрелище, опи-

раясь на знания профессионального фокусника.

# Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.