

УДК 53(091)  
ББК 22.3г  
Ш65

The Matter of Everything: How Curiosity, Physics,  
and Improbable Experiments Changed the World  
by Suzie Sheehy

Copyright: © Suzie Sheehy, 2022

This edition is published by arrangement with Aitken Alexander Associates Ltd.  
and The Van Lear Agency LLC

В оформлении обложки использованы иллюстрации:  
Morphart Creation, nadiia\_oborska, Istry Istry, Nattle, Nata\_Alhontess,  
Alexander\_P, Undrey, Arthur Balitskii / Shutterstock / FOTODOM  
Используется по лицензии от Shutterstock / FOTODOM

### **Шихи, Сьюзи.**

Ш65 Принцип эксперимента. 12 главных открытий физики элементарных частиц / Сьюзи Шихи ; [перевод с английского И. Сыроевой]. — Москва : Эксмо, 2024. — 384 с. — (Научпоп для начинающих).

ISBN 978-5-04-173468-8

Перед вами — удивительная история физики XX века, рассказанная через 12 экспериментов, изменивших наш мир. Тысячелетиями люди задавались вопросами о природе материи. В XX веке это любопытство привело к настоящему взрыву научных открытий, которые изменили ход истории.

Автор знакомит нас с людьми, которые благодаря сочетанию гениальности, настойчивости и удачи поставили эти новаторские эксперименты: от полетов на воздушных шарах в поисках новых частиц до счастливого открытия рентгеновских лучей в немецкой лаборатории; от гонки за расщеплением атомного ядра до поисков третьего поколения материи.

Вы узнаете, как эти выдающиеся эксперименты изменили жизнь человечества, подарив ему радио, телевидение, МРТ-сканеры, радиолокационное оборудование, микроволновые печи и чипы, в том числе для наших смартфонов.

УДК 53(091)  
ББК 22.3г

ISBN 978-5-04-173468-8

© Сыроева И., перевод на русский язык, 2024  
© Оформление. ООО «Издательство «Эксмо», 2024

# Оглавление

---

Вступление . . . . .	6
Часть I. Демонтаж классической физики . . . . .	15
Глава 1. Электронно-лучевая трубка: рентгеновское излучение и электрон . . . . .	16
Глава 2. Эксперимент с золотой фольгой: строение атома . . . . .	39
Глава 3. Фотоэлектрический эффект: квант света. . . . .	60
Часть II. Материя за пределами атомов . . . . .	91
Глава 4. Облачные камеры: космические лучи и ливни новых частиц . . . . .	92
Глава 5. Первые ускорители частиц: расщепление атома . . . . .	122
Глава 6. Циклотрон: искусственная радиоактивность. . . . .	153
Глава 7. Синхротронное излучение: неожиданный свет . . . . .	177
Часть III. Стандартная модель и выход за ее пределы . . . . .	199
Глава 8. Физика элементарных частиц выходит на новый уровень: странные резонансы . . . . .	200
Глава 9. Мега-детекторы: поиск неуловимого нейтрино . . . . .	229
Глава 10. Линейные ускорители: открытие кварков. . . . .	252
Глава 11. Тэватрон: третье поколение частиц . . . . .	277
Глава 12. Большой адронный коллайдер: бозон Хиггса и не только . . . . .	308
Глава 13. Будущие эксперименты . . . . .	335
Благодарности. . . . .	349

## Вступление



Несколько лет назад я сидела за ноутбуком, хмурясь над, казалось бы, простым вопросом, который мне только что задали четыре профессора кафедры физики элементарных частиц Оксфордского университета. Я не запомнила их имена не только из-за нервов, но и потому, что мое собеседование для поступления в докторантуру проводилось через нестабильное интернет-соединение из номера мотеля в глубинке Австралии. Они спросили меня: «Чем вас так увлекает физика элементарных частиц?»

Это, конечно, была уловка: вступительные собеседования в Оксфорд, как известно, очень трудные. Тогда я решила, что лучше быть честной. Я сказала им о моем удивлении тому, как физика, кажется, может описать все: от мельчайших субатомных частиц и атомов, из которых состоят наши тела, до необъятных пространств Вселенной — и как все это связано.

«Физика элементарных частиц, — сказала я, — вот основа всего».

Пятью годами ранее я училась на инженера-строителя в Мельбурнском университете. Я тогда даже не рассматривала возможность стать физиком: хотя мне и нравилась физика в школе, я всегда думала, что она ведет лишь к карьере инженера. Но все переменялось, когда мои одногруппники пригласили меня на ежегодное мероприятие студенческого общества физиков — астроллагерь.



В пятницу после полудня мы покинули Мельбурн и через два часа прибыли на площадку Leon Mow Dark Sky. Ухабистая грунтовая дорога привела нас к зданию с жестяной крышей, где мы распаковали пиво и телескопы, а затем установили палатки рядом с большой поляной. С наступлением сумерек воздух становился все прохладнее, а стрекот цикад наполнял округу. Чтобы видеть ночью, я резинкой закрепила на фонарике кусок красного целлофана. Забравшись в спальный мешок, я еще раз порадовалась тому, что он защищает не только от ночной прохлады, но и от насекомых. Вдохнув знакомый аромат эвкалипта, я подняла глаза.

«Вот один!» — закричал кто-то неподалеку, когда метеор пронесся по небу. Когда мои глаза привыкли к темноте, открылось истинное чудо этого места, называемого «заповедником темного неба». Болтовня перешла в шепот, но и тот вскоре стих. Венера медленно опускалась за горизонт, и в поле зрения появились другие планеты. Той ночью я получила представление о медленной, но постоянно меняющейся природе ночного неба. В телескопы моих друзей я увидела величественные кольца Сатурна, знакомые по фотографиям, но странно новые через объектив, звезды, формирующиеся в туманностях, полных светящейся пыли и шаровых скоплений, которые вращаются вокруг нашей галактики в 100 тысяч световых лет от нас.

Самым захватывающим зрелищем была яркая полоса звезд и пыли — сияющая дуга Млечного Пути. С Южного полушария мы смотрим в середину нашей дискообразной галактики. Мы находимся на расстоянии примерно в две трети радиуса от центра, вращаемся вокруг нашей звезды, которая сама движется внутри Млечного Пути. А он курсирует в космосе вместе со своей местной группой галактик со скоростью около 600 километров в секунду. И за ним — еще миллиарды других подобных галактик, звезд и туманностей, черных дыр и квазаров, материи, образованной из энергии, сформировавшейся в безграничном пространстве-времени.

В тот миг я по-настоящему осознала, насколько я мала, насколько недолговечна — и как невероятно сложно выразить словами масштаб того, что я увидела. Звезды и планеты не *где-то*



*там наверху, а я не где-то внизу: все это часть одной огромной физической системы, называемой Вселенной. Я тоже ее часть. Конечно, я уже знала это, но никогда прежде настолько не чувствовала* своего в ней места.

Внезапно все остальное перестало иметь значение. Я хотела больше узнать о гравитации, частицах, темной материи и теории относительности. О звездах, атомах, свете и энергии. И прежде всего — то, как все это связано и как я сама связана с этим. Я хотела узнать, правда ли есть теория всего. Я глубоко чувствовала, что это важно для меня как для человека, что понять это — достаточно большая цель, и если мне удастся понять хотя бы немного, я не потрачу впустую то мгновение, в течение которого существую как сознательное существо. Я решила стать физиком.

Цель физики — понять, как ведет себя Вселенная и все, что в ней есть. Один из способов это сделать — задавать вопросы, и по мере моего знакомства с физикой я понимала, что вопрос, который лежит в основе, звучит так: «Что такое материя и как она работает, создавая все вокруг, включая нас самих?» Полагаю, я пыталась понять смысл собственного существования. Но вместо того чтобы изучать философию, я выбрала более косвенный способ: попыталась понять саму Вселенную.

Люди задавали вопросы о природе материи на протяжении тысячелетий, но только за последние 120 лет это любопытство наконец привело нас к некоторым ответам. Сегодня наше понимание мельчайших составляющих природы и сил, которые ими управляют, описывается физикой элементарных частиц — одной из самых впечатляющих, сложных и творческих областей, которыми когда-либо занимался человек. Сегодня мы обладаем глубокими знаниями о физической материи Вселенной и о том, как она работает. Мы обнаружили, что реальность обладает богатством и сложностью, которые люди всего несколько поколений назад и представить себе не могли. Мы отвергли идею, что атом — мельчайшая частица нашего мира, открыв фундаментальные частицы, не играющие никакой роли



в обычной материи, но необходимые по расчетам математики, которая — несколько чудесным образом — описывает нашу реальность. Всего за несколько десятилетий мы научились собирать все эти фрагменты воедино — от взрыва энергии в начале Вселенной до самых точных измерений.

Наш взгляд на мельчайшие составляющие природы быстро менялся на протяжении последних 120 лет — от радиоактивности и электрона до атомного ядра и ядерной физики, наряду с развитием квантовой механики (которая описывает природу в мельчайших масштабах). В XX веке это стали называть «физикой высоких энергий», фокус сместился с атомного ядра на обнаруженные новые частицы. Сегодня изучение всех многочисленных частиц и того, как они формируются, ведут себя и трансформируются, просто называется физикой элементарных частиц.

Стандартная модель физики элементарных частиц классифицирует все известные частицы в природе и силы, с помощью которых они взаимодействуют. Эта модель разрабатывалась многими физиками на протяжении десятилетий, а наша нынешняя версия появилась в 1970-х годах. Эта теория — абсолютный триумф: математически элегантная и невероятно точная, но при этом компактная, как принт на кружке. Студенткой меня невероятно увлекало то, насколько полно Стандартная модель, казалось, описывает работу природы на фундаментальном уровне.

Стандартная модель говорит нам, что вся материя, составляющая наше повседневное существование, состоит всего из трех частиц. Мы состоим из двух типов кварков, «верхних» и «нижних», которые формируют наши протоны и нейтроны. Эти два типа кварков вместе с электронами составляют атомы, удерживаемые вместе силами электромагнетизма и сильным и слабым ядерным взаимодействием. Вот и все! Это мы и все, что нас окружает<sup>1</sup>. Но, несмотря на то что мы состоим всего

---

<sup>1</sup> Вы можете заметить, что я не включила сюда гравитацию, несмотря на то, что мы испытываем ее ежедневно. Гравитация не включена в Стандартную модель и невероятно слаба по сравнению с тремя другими силами. Вопрос, почему это так и как объединить эти теории вместе, представляет собой одну из величайших проблем физики XXI века.



лишь из кварков и электронов, мы — люди — каким-то образом поняли, что в природе есть *нечто большее*.

Мы достигли триумфа не только благодаря концептуальным и теоретическим успехам. Стереотип о гении-одиночке, теоретизирующем за письменным столом, в значительной степени неверен. На протяжении более чем столетия такие вопросы, как «Что находится внутри атома?», «Какова природа света?» и «Как эволюционирует Вселенная?», рассматривались физиками сугубо практическим образом. Причина, по которой мы можем сегодня сказать, что наверняка знаем ответы на эти вопросы и что наши теоретические модели отражают реальность, заключается не в том, что наши расчеты кажутся верными, а в проводимых нами экспериментах.

Когда многие из нас в детстве сталкиваются с идеей о том, что протоны, нейтроны и электроны составляют окружающий нас мир, очень мало говорится, *как именно* человечество узнало о материи, силах и вообще обо всем. Протон в миллион миллионов раз меньше песчинки, и далеко не очевидно, как можно работать с чем-то столь малым. Это и есть искусство экспериментальной физики: следовать за нашим любопытством, от зародыша идеи до реального физического оборудования и накопления новых знаний. Тем вечером в астролагере понимание того, что физика нравится мне больше, когда я имею дело с ней лично, привело меня к идее стать физиком-экспериментатором.

В то время как физики-теоретики могут наслаждаться математическими возможностями, эксперименты подводят нас к пугающей границе уязвимости — реальному миру. Вот в чем разница между теорией и экспериментом: идеи физика-теоретика должны учитывать результаты экспериментов, а у физика-экспериментатора — более тонкая работа. Экспериментатор не просто проверяет идеи физиков-теоретиков — он задает собственные вопросы, а также проектирует и создает оборудование, с помощью которого можно на них ответить.

Экспериментатор должен понимать теорию и уметь ее использовать, но он не должен ею ограничиваться. Он должен оставаться открытым для поиска чего-то неожиданного и не-



известного, а также понимать многое другое: от электроники до химии, от сварки до обращения с жидким азотом. Затем он должен объединить эти знания, чтобы манипулировать материей, которую нельзя увидеть. Правда в том, что эксперименты — сложный процесс, с фальстартами и неудачами. Они требуют любопытства и характера. Тем не менее на протяжении всей истории у многих хватало страсти и настойчивости ими заниматься.

За последнее столетие ученые, проводя эксперименты с элементарными частицами, прошли путь от домашних установок, управляемых одним человеком, до самых больших машин на Земле. Эпоха «Большой науки», начавшаяся в 1950-х годах, теперь переросла в проведение экспериментов, в которых участвуют более ста стран и десятки тысяч ученых. Мы строим подземные коллайдеры, состоящие из многокилометрового высокоточного электромагнитного оборудования, в рамках проектов, длящихся более 25 лет и стоящих миллиарды долларов. Мы достигли точки, когда успех науки не зависит только от одной страны.

Наша повседневная жизнь претерпела столь же сильные изменения. В 1900 году в большинстве домов до электричества оставалось 20 лет, лошади были основным видом транспорта, а средняя продолжительность жизни в Великобритании или Соединенных Штатах составляла менее 50 лет. Сегодня мы живем дольше — отчасти потому, что, заболев, можем обратиться в больницу, где есть МРТ, компьютерная томография и ПЭТ-сканеры, помогающие диагностировать болезни, а также целый ряд вакцин, лекарств и высокотехнологичных устройств для нашего лечения. У нас есть компьютеры, Всемирная паутина и смартфоны, которые нас соединяют и создают совершенно новые отрасли и способы работы. Даже окружающие нас товары разрабатываются, дополняются и улучшаются с использованием новых технологий — от шин для наших автомобилей до драгоценных камней в украшениях.

Думая о современных идеях и технологиях, мы редко связываем их с экспериментальной физикой, но эта связь тесна. Все приведенные выше достижения были получены в результате



экспериментов, направленных на то, чтобы узнать больше о материи и силах природы, и этот список — лишь верхушка айсберга. Всего за два поколения мы научились управлять отдельными атомами, чтобы создавать настолько маленькие вычислительные устройства, что даже микроскоп с трудом их видит, использовать нестабильную природу материи для диагностики и лечения болезней и заглядывать внутрь древних пирамид с помощью высокоэнергетических частиц из космоса. И все это возможно благодаря нашей способности манипулировать материей на уровне атомов и частиц, знаниям, полученным в результате исследований, движимых любопытством.

Я решила стать физиком-экспериментатором в области физики ускорителей: я специализируюсь на изобретении реального оборудования, которое манипулирует материей в крошечном масштабе. Специалисты по физике ускорителей постоянно открывают новые способы создания пучков, чтобы больше узнать о физике элементарных частиц, но наша работа все больше необходима другим сферам общества. Студенты, друзья и читатели до сих пор удивляются, когда я говорю им, что в их ближайшей больнице почти наверняка есть ускоритель частиц, что их смартфон основан на квантовой механике и что мы можем просматривать веб-страницы только благодаря физике элементарных частиц. Мы строим ускорители частиц для изучения вирусов, шоколада и древних свитков. Наше детальное понимание геологии и древней истории нашей планеты многим обязано исследованиям в области физики элементарных частиц.

Исследования выводят нас за пределы того, что мы знаем и чего ожидаем, приводят к идеям и решениям, которые меняют ход истории. В поиске новых знаний мы сокращаем пропасть между тем, что кажется нам возможным, и тем, что мы считаем невозможным. Именно здесь любопытство приводит к поистине прорывным инновациям. Физика — в частности физика элементарных частиц — предлагает, пожалуй, самые яркие примеры этого феномена. Так как же серия физических экспериментов привела нас ко всем этим особенностям современного мира?



Конечно, были проведены тысячи опытов, и все они каким-то образом внесли свой вклад в наши знания. В этой книге я познакомлю вас с 12 ключевыми экспериментами, которые ознаменовали первые шаги к пониманию мира, в котором мы живем. Мы начнем с экспериментов, проведенных несколькими учеными в небольших лабораториях в Англии и Германии на рубеже XIX и XX веков, — экспериментов, которые предрекали крах классической физики, заявляя нам о существовании объектов меньших, чем атомы. Далее мы увидим, как эксперименты в Чикаго помогли подтвердить зарождающиеся идеи квантовой механики, для подтверждения которых физики по всему миру воспарили на воздушных шарах и поднялись на горные вершины в поисках новых частиц. Каждый эксперимент напоминает мне о смеси разочарования и радости, которая хорошо мне знакома по работе собственной лаборатории. Но преимущество ретроспективного взгляда позволяет мне увидеть то, чего не могли видеть первые экспериментаторы: что стало с их открытиями и изобретениями.

Затем история приведет нас к гонке между Соединенными Штатами, Германией и Великобританией за создание первого ускорителя частиц и расщепление атома. Создание искусственных радиоактивных элементов в Калифорнии привело промышленных ученых к случайному открытию, которое создало как новый инструмент для исследований, так и новое понимание астрономии. Наконец, мы проследим истории команд, объединившихся для проведения грандиозных экспериментов, которые легли в основу моей собственной карьеры: от американских лабораторий, таких как Брукхейвен и Беркли, до Стэнфордского линейного коллайдера, Фермилаба и, в конечном счете, Европейской организации по ядерным исследованиям (ЦЕРН).

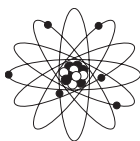
Рассмотренные вместе, эти эксперименты воплощают дух исследования, проистекающий из человеческого любопытства. За столетие они изменили нашу жизнь почти во всех аспектах — в вычислительной технике, медицине, энергетике, коммуникациях, археологии, искусстве. . . Физика всегда будет



направлена на понимание нашего места во Вселенной, и эту истину я почувствовала, когда увидела то ночное небо.

Наше путешествие проиллюстрирует, как физика привела к появлению многих современных технологий, которые мы сейчас считаем само собой разумеющимися, и к практическим результатам, которые мы даже не могли себе представить. Оно покажет, что физика может научить всех нас любопытству и дать силы совершать прорывы, которые могут изменить мир.

# Часть I



## Демонтаж классической физики

Воображение — это в первую очередь открытие новых способностей. Оно проникает в невидимые миры вокруг нас, миры науки. Оно чувствует и находит то, что есть, реальное, чего мы не видим, что неуловимо для наших чувств.

*Ада Лавлейс, из письма лорду Байрону,  
январь 1841 года*

## ГЛАВА 1

---

### Электронно-лучевая трубка: рентгеновское излучение и электрон



Наша история начинается в 1895 году. Германия, лаборатория в Вюрцбурге... Тогдашние лаборатории были не очень похожи на чистые белые пространства, в которых работают современные ученые. Здесь были красивые паркетные полы и впечатляющие высокие окна, выходящие на парк и виноградники напротив. Физик Вильгельм Конрад Рентген закрыл ставни и вернулся к своей работе. На длинном деревянном столе он установил стеклянную трубку размером с небольшую винную бутылку, из которой с помощью вакуумного насоса была удалена большая часть воздуха<sup>1</sup>. От металлических электродов отходили провода — один в конце трубки (отрицательно заряженный катод) и один примерно посередине (положительно заряженный анод). При подаче высоковольтного электричества внутри появлялось свечение — так называемые катодные лучи, которые и дали трубке название\*.

---

<sup>1</sup> Технически здесь я описываю трубку Крукса — Хитторфа, но все эти трубки были похожи. Подобные эксперименты должны проводиться в условиях, близких к вакууму, иначе катодные лучи будут сталкиваться с молекулами газа и рассеиваться или теряться. Среднее расстояние между столкновениями называется «длиной свободного пробега» и применяется ко всем молекулам, атомам и другим частицам, проходящим через газ. Длина свободного пробега катодного луча в воздухе мала, поэтому для трубок нужен вакуум.



Пока все шло так, как Рентген и ожидал. Затем краем глаза он заметил маленький светящийся экран на другой стороне лаборатории.

Он подошел к экрану. Экран с люминофорным покрытием излучал зеленый свет. Когда Рентген выключил электронно-лучевую трубку, свечение исчезло. Когда снова включил, оно вернулось. Может быть, это просто обман зрения, отражение света от светящейся электронно-лучевой трубки? Он накрыл трубку черным картоном, но обнаружил, что экран по-прежнему светится. Рентген никогда раньше не видел ничего подобного, но посчитал свою находку важной.

С этого момента физика уже никогда не будет прежней. Это первое случайное наблюдение вывело эксперименты с использованием электронно-лучевых трубок и физику в целом на совершенно новую территорию, перевернув принятые веками представления о природе. Со временем электронно-лучевая трубка приведет к появлению технологий, которые изменят образ жизни, работы и общения людей. Все началось здесь, в Вюрцбурге, с этого светящегося экрана и любопытства одного человека.

Вильгельм Рентген, как и большинство ученых по всему миру в конце XIX века, согласился с тем, что физика почти разгадана. Вселенная создана из материи, которая состоит из «атомов». Было выяснено, что существуют различные типы атомов, которые соответствуют различным химическим элементам. От деревьев до металлов, от воды до меха — все разнообразие окружающего нас материального мира отличается твердостью, цветом и текстурой, потому что все построено из разных атомов, которые ученым представлялись крошечными сферическими деталями вроде Lego. Будь у вас правильная инструкция, вы могли бы взять определенный набор атомов и создать все, что захочется.

Физики также знали, что существуют силы, благодаря которым все взаимодействует. Гравитация удерживает звезды

---

\* Электронно-лучевая трубка также называется катодной. — *Прим. пер.*



в нашей галактике и заставляет Землю вращаться вокруг Солнца. Даже таинственные силы электричества и магнетизма в конце концов были объединены в единую силу — электромагнетизм. Вселенная стала предсказуемой: если вам известен принцип работы внутренних механизмов и вы приводите их в движение, то можете с точностью предсказать поведение всей материи.

Теперь оставалось исследовать только детали — например, то, как именно работает электронно-лучевая трубка. Одна из немногих мелочей, которые ученые не могли до конца объяснить. Конечно, выдвигались разные теории, в том числе идея о том, что свечение внутри связано с колебаниями гипотетического эфира — среды, через которую, как считалось, свет распространяется почти так же, как звук передается по воздуху. Но, исследуя особенности электронно-лучевой трубки, Рентген столкнулся с трудностями: мало того, что внутри трубки происходит что-то необъяснимое, так еще и снаружи обнаружился странный эффект.

В детстве Вильгельм казался обычным ребенком. Сын торговца тканями, он любил исследовать природу в сельской местности и лесах<sup>1</sup>. Единственное, в чем у него действительно были незаурядные способности, — создание механизмов<sup>2</sup>, и это оказалось весьма полезным для его дальнейшей экспериментальной работы. Когда Рентген стал взрослым, его темные волосы постоянно вставляли дыбом на лбу, «как будто он постоянно был наэлектризован собственным энтузиазмом»<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Нобелевские лекции по физике 1901–1921 (Nobel Lectures, Physics 1901–1921), Elsevier, Амстердам, 1967.

<sup>2</sup> См. Otto Glasser. Wilhelm Röntgen and the Early History of the Roentgen Rays. Norman Publishing, San Francisco, 1993. Интересно, повлияла ли на это отдаленная часть его генеалогического древа, которая прославилась созданием сложных предметов мебели с причудливыми механическими элементами. Подробнее об этом читайте в книге Вольфрама Кеппе Extravagant Inventions: The Princely Furniture of the Roentgens. Издательство Йельского университета, Нью-Хейвен, штат Коннектикут, 2012.

<sup>3</sup> Otto Glasser. Röntgen.