

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
Раздел 1. Неделимый	9
Природа всего	10
О стихиях	12
Атомисты	14
Тайна света	16
Опыт Юнга	20
Волны эфира	22
Электричество	24
Магнетизм	26
Серебряный молот Максвелла	30
Конец эфира	32
Раздел 2. Внутри атома	35
Элементы Дальтона	36
Электрон	38
Атом Броуна	40
Рождественский пудинг	42
Папиросная бумага Резерфорда	44
Миниатюрная Солнечная система	46
Объясненные элементы	48
Тайна изотопов	50
Нейтроны спешат на помощь	52
Расщепляя атом	54
Цепные реакции	56
Молодое Солнце	58
Фантастическое слияние	60
Раздел 3. Предотвращенная катастрофа	63
Небольшая проблема	64
Фотоэлектрический эффект	70
Радикальное предложение Эйнштейна	72
Бор исправляет атом	74
Квантовый скачок	76
Частица и волна	78
Снова о двух щелях	80
Волны материи	82
Атомные волны	84

Раздел 4. Квантовая реальность	87
Матричная механика	88
Уравнение Шрёдингера	90
Сапожник Эйнштейн.	96
Принцип неопределенности	98
Тот самый кот	100
В двух местах одновременно?	102
Копенгагенская интерпретация	104
Волна-пилот	106
Декогеренция	108
Другие миры	110
Квантовое туннелирование	112
Быстрее света	114
Раздел 5. Квантовая электродинамика	117
Выручающий принцип Паули	118
Дирак и теория относительности	120
Поля повсюду	126
Квантовая электродинамика	128
Поляризация	136
Путешественники во времени	138
Опережающий и запаздывающий свет	140
Амплитуды	142
Раздел 6. Запутанная сеть	145
Квантовое вращение	146
Тайна окон	148
Светоделители	150
Задачи Эйнштейна	152
ЭПР	154
Мгновенная передача	162
Квантовое шифрование	164
Квантовая телепортация	168
Квантовый эффект Зенона	170
Раздел 7. Золотой стандарт	173
Антивещество повсюду	174
Ускорители и коллайдеры	176
Частицы из космоса	178
«Зоопарк» частиц	180
Принципы симметрии	182
Великие превращения нейтрино	188
Стандартная модель	190
Почему у частиц есть масса?	192
Суперсимметрия	198
Темная материя	200

Раздел 8. Квантовые сюрпризы	205
Природа не терпит пустоты	206
Абсолютный нуль	210
Сверхпроводники	212
Сверхтекучие жидкости	216
Конденсаты Бозе — Эйнштейна	218
Макро- и микромиры	224
Квантовые энзимы	226
Туннелирование ДНК	228
Фотосинтез	230
Ведение голубя	232
Раздел 9. Квантовая жизнь	235
Квантовое повсюду	236
Неожиданно квантовое.	238
Трубки Крукса	240
Электроника	242
Радиолампа	244
Полупроводники	246
Транзистор	248
Все в одном.	250
Изобретение лазера	252
МРТ-сканеры	260
Летающие поезда	262
Флеш-память	264
Квантовая фотография	266
Джозефсоновские переходы и СКВИДы	268
Квантовая оптика	270
Квантовые точки	272
Кубиты	274
Квантовые компьютеры	276
Раздел 10. Квантовая Вселенная	279
Квантовая теория Вселенной	280
Никаких теорий всего	282
Большой взрыв	284
Черные дыры	286
Квантовая гравитация	288
Гравитационные волны	290
Гравитон	294
Теория струн	296
Другие измерения	298
M-теория	300
Петлевая квантовая гравитация	302

ВВЕДЕНИЕ

Квантовая физика интригует, потому что она содержит в своей основе некоторую тайну. Эта фундаментальная область науки описывает поведение атомов и субатомных частиц, которые составляют материю, заодно и объясняя неуловимое, но важное явление света. Она лежит в основе электричества и магнетизма, как и большинства ключевых открытий XX и XXI вв. В то же время квантовая физика описывает мир, в котором происходят совершенно невероятные события.

Очень просто считать частицы вроде электронов маленькими шариками. Мы знаем наверняка, что произойдет с обычным мячом при броске, если учитывать все особенности места, в котором он находится. Таинственность квантового мира связана именно с отсутствием определенности. К ужасу некоторых из первых создателей квантовой теории, в особенности Альберта Эйнштейна, уравнение, описывающее положение частицы через определенный промежуток времени, имеет дело лишь с вероятностью. Мы не можем точно сказать, где она будет через 10 секунд, — возможно лишь найти вероятность обнаружения ее в различных местах. И до того момента, когда мы на самом деле найдем частицу, есть только вероятность. На квантовом уровне подобная неопределенность имеет место для многих других характеристик объектов.

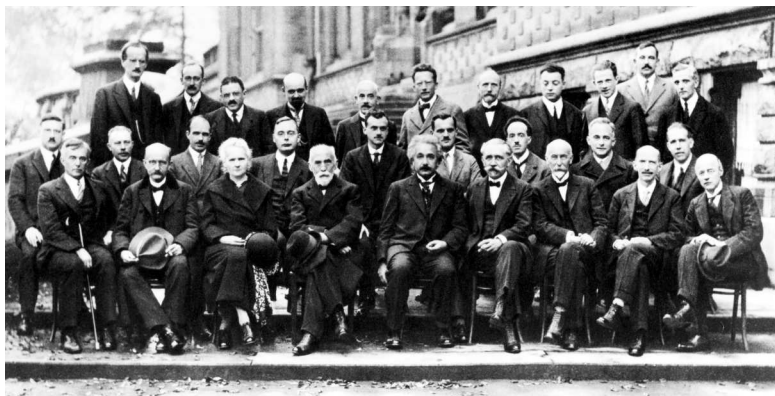
Сравним эти частицы с нормальным объектом, которым, на первый взгляд, тоже управляет вероятность, например с монетой. Если мы подбрасываем монету, существует шанс 50 на 50 получить в результате «орла» или «решку». Однако после того как монета упала, даже если мы на нее не смотрим, она обращена к нам только одной стороной. В квантовом эквиваленте существует только вероятность 50 на 50 до того момента, когда частица вступит во взаимодействие с миром вокруг нее. Когда корифеи квантовой физики встретились на Сольвеевском конгрессе в 1927 г., это явление стало предметом жарких споров между участниками. Одни ученые, например Альберт Эйнштейн и Эрвин Шрёдингер, были убеждены в существова-

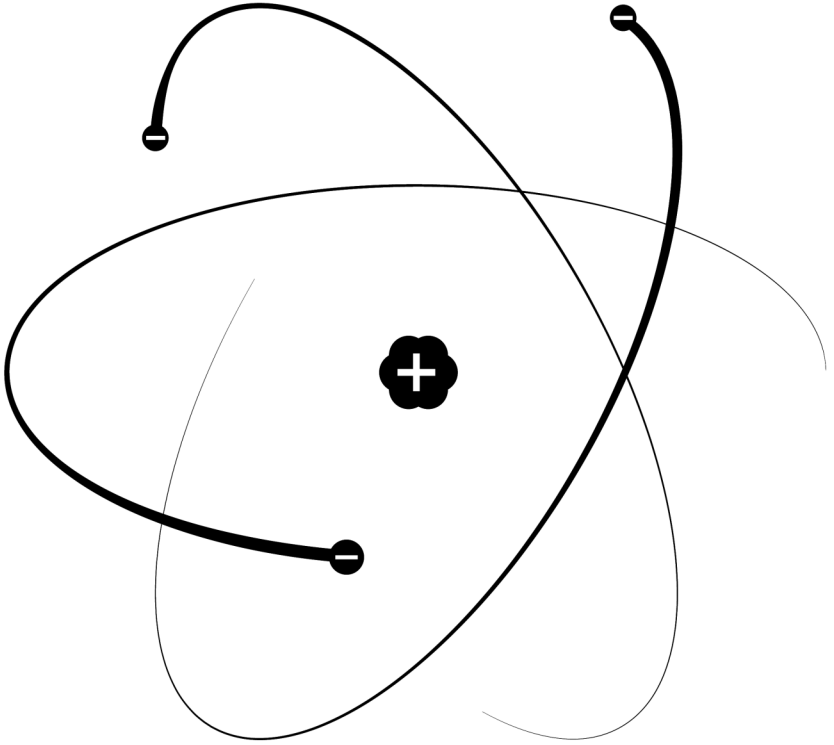
нии чего-то, лежащего в основе всех явлений, чего-то, что было в большей степени «реальным» и не зависящим от вероятности. Другие, в число которых входили Нильс Бор и Вернер Гейзенберг, не видели никакой необходимости в такой реальности. И оказалось, что именно Бор и Гейзенберг были правы.

Все обсуждаемое здесь может показаться по-философски изощренным. Но все же мир вокруг нас и вещи в нем ведут себя так, как мы ожидаем, несмотря на то, что они состоят из квантовых частиц. Так важно ли на самом деле то, что происходит на квантовом уровне? Однозначно да! Именно это таинственное поведение объектов микромира дает возможность атомам существовать, а Солнцу — светить, оно же лежит в основе большинства технических средств, которые мы используем сегодня, — от смартфонов до лазеров и магнитно-резонансных томографов.

У квантовой физики есть репутация сложной науки, и математика, лежащая в ее основе, действительно непроста. Но основные концепции легки для понимания и весьма важны, если мы хотим разобраться в мире вокруг нас, основанном на квантовых явлениях. Перед тем как мы пойдем на решительный шаг, стоит, однако, выяснить, откуда эти концепции пришли. Для этого необходимо обратить взгляд назад и посмотреть, как развивались наши представления о веществе и свете.

В 1927 г. Сольвеевский конгресс собрал вместе всех основателей квантовой физики.





РАЗДЕЛ 1

НЕДЕЛИМЫЙ

ПРИРОДА ВСЕГО

Физика — это сердце науки, основа наших знаний о природе. Это наш путь в описании и понимании того, как работает Вселенная. А значит, физика играла существенную роль в течение всего времени, когда человечество размышляло о науке.

Это относится к каждой культуре, оставившей значительный след в истории человечества, несмотря на сильно отличающиеся стартовые позиции разных культур. Поскольку наша современная научная традиция построена на фундаменте греческой мысли, будет наиболее полезно оглянуться на идеи древних греков, которые привели к развитию современной физики и преобразованию, которое включало в себя и квантовую физику.

Хоть наука Древней Греции в основном уже совсем бесполезна, есть более ценная вещь, которую нам дали древние греки, — новый взгляд на мир.



Фалес
(около 624 —
547 до н. э.)



Пифагор
(около 570 —
490 до н. э.)



Платон
(около 428 —
347 до н. э.)



Аристотель
(около 384 —
322 до н. э.)

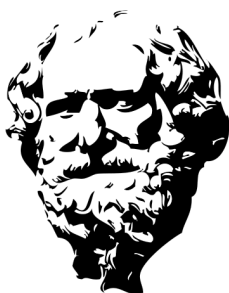
ТЕОЛОГИЯ И ФИЗИКА

В то время как все, что связано с природой, рассматривалось как творение богов, греческий философ Фалес, родившийся под самый конец VII в. до н. э., и его последователи искали материальные, а не духовные причины. Другой греческий философ, Аристотель, творивший более 200 лет спустя, назвал тех, кто следовал за Фалесом, «физиками» (φυσικοί), чтобы отличить их от теологов (θεολόγοι).

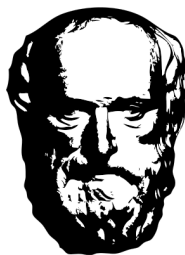
Для древних греков физика означала науку о вещах на Земле, включая живых существ, тогда как астрономия была частью математики.



Евклид
(жил в III в. до н. э.)



Архимед
(около 287 —
212 до н. э.)



Эратосфен
(276–195 до н. э.)



Гиппарх
(190–120 до н. э.)

О СТИХИЯХ

Древнегреческие философы предложили идею того, что материя состоит из элементов. Шел V в. до н. э., когда Эмпедокл первым утверждал, что все состоит из земли, воздуха, огня и воды. Такое представление может показаться банальным, но оно было разработано на основе научного принципа, согласно которому теория должна основываться на наблюдениях. Эмпедокл наблюдал, например, как при сгорании деревянный брусочек давал дым, похожий на воздух, извергал огонь, как вытекал сок растения, похожий на воду, и как сгорание кончалось образованием пепла, похожего на землю.

Эта теория была объяснена Аристотелем, добавившим пятый элемент — квинтэссенцию, или эфир, — поскольку он считал, что все находящееся выше орбиты Луны было совершенным и должно быть сделано из чего-то менее мирского, менее приземленного. Четыре элемента были также использованы для того, чтобы объяснить, как работает гравитация.

Подход Аристотеля к гравитации был основан на его идее, что стихии имеют естественное место: если что-то состоит в основном из земли и воды, оно стремится быть в центре Вселенной, тогда как огонь и воздух удаляются от центра (строго говоря, тяжесть была



Эмпедокл, изображенный на гравюре XVII в.

стремлением к центру, а легкость — движением от него). Это было одно из самых убедительных доказательств обращения Солнца вокруг Земли, а не наоборот.

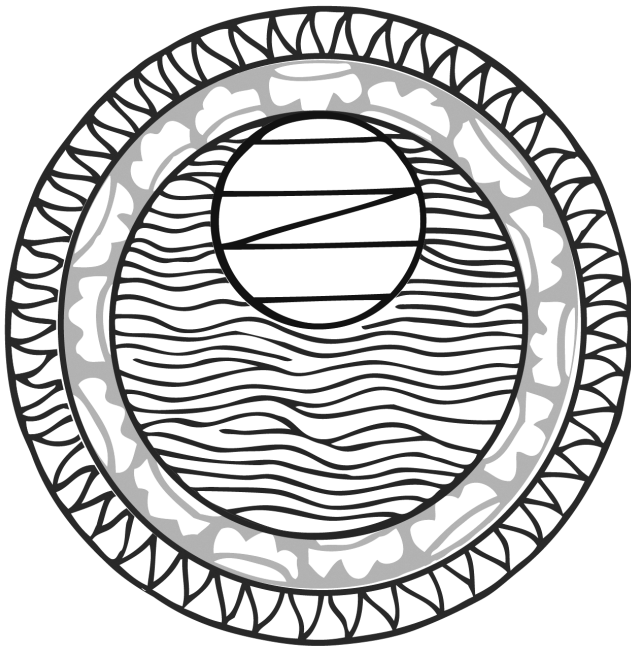


Рисунок из трактата Сакробоско (1501), изображающий сферы четырех элементов (из земли состоит самая маленькая из них, она смещена от центра для объяснения существования суши).

Кометы были настоящей проблемой. Несмотря на все внешние признаки, из-за того, что они изменяют свою форму при движении в пространстве, считалось, что они находятся под Луной.

АТОМИСТЫ

Хоть представление о четырех стихиях и оставалось признанной теорией строения вещества в течение почти двух тысяч лет, оно у древних греков было не единственным.

Два современника Эмпедокла, Левкипп и его ученик Демокрит, разработали на удивление современную теорию атомов. Она была основана на представлении о том, что если вы берете любую вещь, скажем, кусок сыра, и разрезаете его на кусочки все мельче и мельче, в конечном итоге вы получите такой кусочек, который дальше разрезать будет невозможно. Такие неразрезаемые кусочки они называли атомами (что и означает «неделимый»). Так они разделили все вещество на атомы.

Эти атомы были сделаны из одного и того же материала, но могли иметь множество различных форм, определяющих материал, который эти атомы составляли. Так, например, атомы сыра отличались от атомов воздуха.

Аристотель отвергал атомизм, распространяя теорию четырех стихий. Как мы уже знаем, он добавил пятый элемент — эфир, или квинтэссенцию, — который помог опротестовать принципы атомизма. Если бы все было сделано из атомов, утверждал Аристотель, тогда между этими атомами была бы пустота. Это пустое пространство (или вакуум) казалось Аристотелю невозможным, поскольку вещество естественным об-

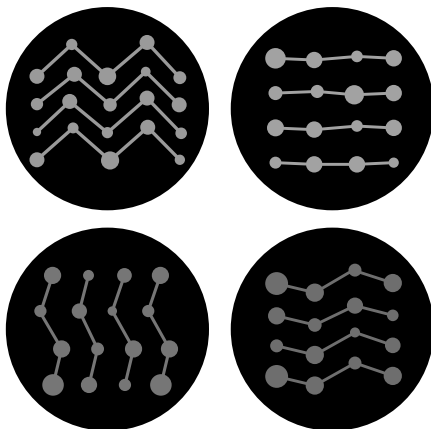
Во времена Средневековья атомом также называли наименьшую известную на тот момент единицу измерения времени — $1/376$ минуты. Вот как говорится о нем в «Облаке неведения», написанном неизвестным монахом в XIV в.:

«Атом, по определению истинных философов, которые разбираются в науке астрономии, является наименьшим промежутком времени. Он настолько маленький, что в принципе является неделимым и практически непостижимым».

СТИХИИ ПОБЕЖДАЮТ АТОМЫ

Хотя атомистический подход выглядит более близким к современному, чем земля, воздух, огонь и вода, четыре стихии были, пожалуй, более научными, поскольку они могли быть использованы для предсказания поведения объектов.

Напротив, каждое вещество имело свои собственные атомы, и поэтому атомистическая теория не давала более полного понимания природы.



разом его заполнило бы, и если бы вакуум действительно существовал, то не было бы никакой причины движущемуся объекту когда-либо останавливаться. Итак, в его модели стихий неподходящих пустот не было.

Согласно древнегреческим атомистам, все сделано из атомов, которые нельзя разделить на что-то более мелкое.

