

Сибирское отделение РАН  
Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера

Тема реферата  
История философских и научных воззрений на структуру  
вещества

Выполнил  
Оейников Владислав Петрович

Научный руководитель  
Поросев Вячеслав Викторович

Проверил философ-консультант  
Супрун Владимир Иванович

Новосибирск – 2015

# Содержание

<b>1. Введение</b>	<b>2</b>
1.1. Поле понятий . . . . .	2
<b>2. Античность</b>	<b>2</b>
<b>3. Средневековье</b>	<b>4</b>
<b>4. Эпоха возрождения</b>	<b>4</b>
<b>5. Современность</b>	<b>5</b>
5.1. Открытие электрона . . . . .	11
5.2. Опыт Резерфорда . . . . .	13
5.3. Атом Бора . . . . .	15
5.4. Античастицы . . . . .	17
5.5. Стандартная модель . . . . .	19
5.6. Универсальная модель . . . . .	22

# 1. Введение

С древних времен и по наше время многие философы и ученые пытались понять строение вещества. В данном реферате рассказывается о долгом историческом процессе, в результате которого и сформировалось современное представление о структуре вещества. Строение вещества - это один из самых фундаментальных вопросов мироздания. Фундаментальная наука позволяет открывать новые грани использования природы, получать качественно новые источники энергии и т.д. Кроме того, фундаментальная наука меняет наш взгляд на мир, что определяет систему ценностей и, следовательно, социо-культурный контекст.

## 1.1. Поле понятий

Материя, вещество, атом, частица, неделимость, атом, атомизм, элементарная частица, химические соединения, молекула, химическая реакция, ядро, электрон, орбита, заряд, античастица, кварк, взаимодействие, стандартная модель.

# 2. Античность

Слово «атом» — греческого происхождения, и переводится оно «неделимый». Принято считать, что первым идею о том, что кажущаяся гладкой и непрерывной материя на самом деле состоит из великого множества мельчайших и потому невидимых частиц, выдвинул древнегреческий философ Демокрит (чей «расцвет», согласно восхитительному по образности выражению классиков, пришелся на V век до н. э.). О жизни Демокрита нам, однако, практически ничего неизвестно, и оригинальные труды этого мыслителя до наших дней не дошли. Поэтому об идеях Демокрита остается судить в основном по цитатам из его работ, которые мы находим у других авторов, прежде всего у Аристотеля.

Логика рассуждений Демокрита, если перевести ее на современный язык, была крайне проста. Представим, говорил он, что у нас есть самый острый в мире нож. Берем первый попавшийся под руку материальный объект и разрезаем его пополам, затем одну из получившихся половинок также разрезаем пополам, затем разрезаем пополам одну из получившихся четвертинок и так далее. Рано или поздно, утверждал он (основываясь, как и все древнегреческие мыслители, прежде всего на философских соображениях), мы получим частицу столь мелкую, что дальнейшему делению на две она не поддается. Это и будет неделимый атом материи.

По представлениям Демокрита атомы были вечными, неизменными и неделимыми. Изменения во Вселенной происходили исключительно из-за изменений в

связях между атомами, но не в них самих. Тем самым он тонко обошел давнишний спор древнегреческих философов о том, подвержена ли переменам сама суть видимого мира или все перемены в нем носят чисто внешний характер.

От древнегреческих представлений об атоме на сегодняшний день сохранилось разве что само слово «атом». Теперь мы знаем, что атом состоит из более фундаментальных частиц (см. Элементарные частицы). Ясно, что между древнегреческой теорией и современными научными исследованиями мало общего: идеи Демокрита не основывались ни на каких наблюдениях или практических опытах. Демокрит, подобно всем натурфилософам античности, просто рассуждал и делал умозрительные заключения относительно природы мира.

В прекрасных стихах поэмы Лукреция дошло до нас бессмертное учение Левкиппа (V в. до н. э.), Демокрита (470—357 до н. э.) и Эпикура (341—270 до н. э.) о первоначалах всех вещей и явлений — атомах. Отрицая божественное происхождение мира, эти философы пытались объяснить все явления природы движением различных по форме и массе мельчайших невидимых частиц. Многочисленные подтверждения своим взглядам они находили в наблюдениях за окружающим миром:

За основанье тут мы берём положение такое:  
Из ничего не творится ничто по божественной воле.  
И оттого только страх всех смертных объемлет, что много  
Видят явлений они на земле и на небе нередко,  
Коиx причины никак усмотреть и понять не умеют,  
Вот посмотри: всякий раз, когда солнечный свет проникает  
В наши жилища и мрак прорезает своими лучами,  
Множество маленьких тел в пустоте ты увидишь, мелькая,  
Мечутся взад и вперёд в лучистом сиянии света;  
Будто бы в вечной борьбе они бьются в сраженьях и битвах...  
Знай же: идёт от начал всеобщее это блужданье.  
Первоначала вещей сначала движутся сами,  
Следом за ними тела из малейшего их сочетанья,  
Близкие, как бы сказать, по силам к началам первичным,  
Скрытно от них получая толчки, начинают стремиться  
Сами к движенью, затем понуждая тела покрупнее.  
Так, исходя от начал, движение мало-помалу  
Наших касается чувств и становится видимым также  
Нам и в пылинках оно, что движутся в солнечном свете,  
Хоть незаметны толчки, от которых оно происходит.[5]

Сторонником атомизма был Платон, который считал, что атомы имеют фор-

му идеальных Платоновских тел (правильных многогранников). Эпикур, основатель эпикуреизма, воспринял от атомистов учение об атомах. Мысль об атомистическом строении мира развивается Эпикуром в письмах к Геродоту и Пифоклу (Диоген Лаэртский, гл. X).

Противники атомизма Демокрита утверждали, что материя делится до бесконечности. То, что материя делится до бесконечности, утверждали ещё Аристотель, Декарт и Лейбниц. В каждой частице, какой бы малой она ни была, «есть города, населенные людьми, обработанные поля, и светит солнце, луна и другие звёзды, как у нас» — утверждал греческий философ Анаксагор в своём труде о гомеомериях в V веке до нашей эры. [4]

### 3. Средневековье

С момента возникновения атомистическое учение жестоко преследовалось служителями церкви. Последователей Демокрита подвергали гонениям, а их произведения сжигали. В эпоху средневековья атомистические представления были полностью отброшены и в течение более тысячи лет в науке господствовало учение Аристотеля (384—322 до н. э.) о происхождении всего существующего из четырёх начал: воды, земли, воздуха и огня.

Сторонниками атомизма были европейские схоласты Николай из Отрекура, Гильом из Конша, арабский философ Ар-Рази.

### 4. Эпоха возрождения

Одна из первых попыток объяснения химических явлений на основе атомистических представлений принадлежит профессору медицины из г. Виттенберга Даниэлю Зеннерту (1572—1637), который утверждал, что при растворении в кислотах атомы металлов сохраняют свою индивидуальность и потому всегда могут быть извлечены из образовавшихся соединений. В середине XVII в. французский философ и физик Пьер Гассенди (1592—1655) заново пересказал учение Эпикура, дополнив его новым понятием “молекула” для обозначения различного сочетания атомов друг с другом.

Католическая церковь упорно противилась возрождению атомистических представлений. Об этом свидетельствует хотя бы тот факт, что 4 сентября 1624 г. парижским парламентом был издан специальный указ, запрещающий под страхом смертной казни распространение и обсуждение произведений древних авторов. Однако все попытки “отцов церкви” задержать развитие науки были напрасны. Во второй половине XVII в. произошло множество открытий в областях физики

и химии. Огромную роль в этом сыграли работы выдающихся английских учёных Роберта Бойля (1627—1691) и Исаака Ньютона (1643—1727).

После более чем десяти лет тщательного экспериментирования в своей хорошо оснащённой лаборатории Р. Бойль написал знаменитую книгу “Химик-скептик”, в которой доказал нереальность “начал” Аристотеля и ввёл представление о химических элементах как о веществах, не поддающихся дальнейшему разложению. Определив задачей химии изучение элементов и их соединений, Р. Бойль поставил её на научную основу. Ф. Энгельс отметил эту заслугу исследователя кратко и определённо: “Бойль делает из химии науку”

И. Ньютон тоже занимался химией почти всю свою жизнь. Он изучал сплавы, много работал над усовершенствованием методов пробирного анализа. Результаты своих многолетних экспериментальных исследований ученый изложил в большом сочинении, которое очень высоко ценил и ставил его в один ряд со своими главными трудами по механике и оптике. К сожалению, рукопись этого произведения погибла во время пожара и её содержание до нас не дошло.

Взгляды древнегреческих философов вновь стали распространяться среди западноевропейских учёных лишь в эпоху Возрождения. Атомистические представления развивали такие выдающиеся мыслители, как Николай Кузанский (1401—1464), Джордано Бруно (1548—1600), Ренэ Декарт (1596—1650).

Сторонники атомизма: Джордано Бруно, Галилей, Исаак Бекман, Пьер Гассенди, Зеннерт, Даниил, Бассо, Себастьян и др.

## 5. Современность

Задача учёных XVII в. заключалась главным образом в том, чтобы дать наглядное представление о химических явлениях с помощью образов, заимствованных из механики. Атомы наделялись поэтому шероховатой или гладкой поверхностью, колечками, клинышками, крючками, иголками и прочим фантастическим оснащением. Это обстоятельство не могло не вызывать насмешек со стороны многих естествоиспытателей, которые стали называть атомистические представления “философией остриёв и крючочков”.

От наивных представлений о сложной форме атомов одним из первых отказался замечательный русский учёный Михаил Васильевич Ломоносов (1711—1765). Его научная и практическая деятельность отличалась удивительной широтой и разносторонностью. “Только теперь, спустя два века, можно с достаточной полнотой охватить и должным образом оценить всё сделанное этим удивительным богатырём науки. Достигнутое им одним в областях физики, химии, астрономии, приборостроения, геологии, географии, языкознания, истории достойно было бы

деятельности целой Академии”<sup>3</sup>. Но более других наук М. В. Ломоносов любил химию. Он утверждал, что все происходящие в природе химические и физические явления обусловлены внутренним движением частиц вещества. Наделив атомы массой, шарообразной формой и способностью к движению, учёный объяснил процессы растворения, испарения и теплопередачи, а также высказал ряд важных положений, которые спустя 130 лет легли в основу кинетической теории газов. Полагая, что химические процессы тесно связаны с тепловыми, электрическими, световыми и капиллярными явлениями, М. В. Ломоносов считал знание физики залогом успешной деятельности в области химии. “Химик без знания физики, — писал он, — подобен человеку, который всего должен искать ощупом. И сии две науки так соединены между собой, что одна без другой в совершенстве быть не могут” [6]

М. В. Ломоносова по праву можно считать основоположником количественного метода исследования. Он одним из первых стал применять весы для изучения закономерностей протекания химических реакций. Повторив опыты Р. Бойля по накаливанию металлов в запаянных стеклянных сосудах, М. В. Ломоносов открыл закон сохранения массы веществ при химических реакциях. В 1909 г. правильность этого закона была доказана с точностью до  $10^{-6}$

Количественный метод исследования быстро завоевал всеобщее признание; к концу XVII в. он являлся уже основой химического эксперимента. Учёные стали систематически прибегать к измерению объёмов и взвешиванию. Большая заслуга в этом принадлежит также выдающемуся французскому химику Антуану Лавуазье (1743—1794), который не только развил и усовершенствовал количественный химический анализ, но и дал ему теоретическое обоснование. Независимо от М. В. Ломоносова, некоторые работы которого долгое время оставались неизвестными западноевропейским учёным, А. Л. Лавуазье экспериментально доказал, что масса веществ при химических реакциях всегда остаётся постоянной.

Способствуя установлению важных закономерностей, количественный метод исследования привёл к бурному развитию химии. Список элементов стал постепенно уточняться, ошибочные “элементы” обнаруживали сложную природу. Основываясь на результатах своих многолетних экспериментальных исследований, А. Лавуазье описал и систематизировал все известные в то время химические элементы и разработал кислородную теорию горения и дыхания. В 1789 г. учёный опубликовал ставший знаменитым “Элементарный учебник химии”, в котором блестяще обобщил все достижения химии того времени.

Дальнейшее развитие химической науки сдерживалось, однако, тем, что отсутствовало общепринятое мнение о составе чистых веществ. Учёные точно не знали, обладает ли химическое соединение двух элементов А и В постоянным составом.

вом  $AmBn$  с определёнными значениями  $m$  и  $n$  или же переменным составом  $AxBy$  с изменяющимися  $x$  и  $y$ . Вскоре на этот вопрос были даны два противоположных ответа. Известный французский исследователь Клод Луи Бертолле, проанализировав ряд сплавов и осадки солей в природных растворах, установил, что состав веществ может непрерывно меняться в зависимости от внешних условий, и сделал отсюда вывод, что химические соединения имеют переменный состав, а постоянный состав отдельных чистых веществ является частным случаем химического взаимодействия.

Свои исследования К. Бертолле опубликовал в 1799—1801 гг. Одновременно, и тоже во Франции, появились работы Луи Жозефа Пруста, который на основании результатов тщательного анализа карбоната меди и оксидов меди и олова пришёл к выводу о постоянстве состава индивидуальных химических соединений независимо от способа их получения. Завязалась оживлённая научная дискуссия, которая длилась около десяти лет. Она закончилась победой Л. Пруста и установлением закона постоянства состава: любое чистое вещество, независимо от способа его получения, имеет постоянный состав.

Однако время показало, что оба учёных были правы. Наряду с соединениями, имеющими постоянный состав, существуют вещества переменного состава. Они названы в честь К. Бертолле "бертоллидами". Бертоллиды широко распространены в природе: к ним относятся, например, многие кристаллы и сплавы.

Одновременно с появлением атомно-молекулярной теории Дальтона — Авогадро перед учёными встал вопрос о взаимном расположении атомов в молекулах простых и сложных веществ.

В 1808 г. Джон Дальтон возродил атомизм и писал: «Атомы — химические элементы, которые нельзя создать заново, разделить на более мелкие частицы, уничтожить путем каких-либо химических превращений. Любая химическая реакция просто изменяет порядок группировки атомов» Под неделимыми атомами Дальтон понимал химические элементы

В основу космологических представлений Канта легло признание существования бесконечного количества звёздных систем, которые могут объединяться в системы более высокого порядка. В то же время, каждая звезда со своими планетами и их спутниками образует систему подчинённого порядка. Вселенная, следовательно, не только пространственно бесконечна, но и структурно многообразна, поскольку в состав её входят космические системы разных порядков и размеров. Выдвигая это положение, Кант приближался к идее о структурной бесконечности Вселенной, которая получила более полное развитие в космологическом течении современника Канта, немецкого учёного И. Г. Ламберта (1728—1777). [3]

В 1901 г. французский физико-химик Жан Батист Перрен опубликовал в жур-



нале *Review scientifique* статью, где представил атом состоящим из “положительно заряженного ядра, окружённого отрицательными электронами, которые двигаются по определённым “орбитам” со скоростями, соответствующими частотам световых волн” [8] . Другими словами, Ж. Перрен в 1901 г. теоретически построил будущую экспериментальную модель Резерфорда. Однако эта его идея оказалась преждевременной, поскольку вопрос о носителе положительного заряда в атоме был ещё неясен.

На рубеже XIX и XX вв. широко развернулось изучение рассеяния электронов тонкими металлическими пластинками. Опыты показали, что при прохождении через фольгу электроны рассеиваются на малые углы. Для объяснения этого явления английский физик Уильям Томсон предложил рассматривать атом как облако положительного электричества с вкрапленными в него электронами, которые находятся в некоторых устойчивых положениях, но могут смещаться и совершать колебания под действием внешнего электрического поля. Простейший атом — атом водорода с точки зрения модели У. Томсона представлял собой положительно заряженный шар, в центре которого находится электрон.

В отличие от своего соотечественника, Дж. Томсон считал, что электроны внутри положительного шара расположены в одной плоскости и образуют концентрические кольца. Возникновение химической связи он объяснял переходом электронов от одного атома к другому. Дж. Томсон впервые попытался связать периодичность в изменении свойств элементов со строением их атомов. Он также предположил, что общее число электронов в атоме непрерывно возрастает при переходе от элемента к элементу.

Немецкий физик Филипп Ленард отрицал возможность раздельного существования в атоме противоположных электрических зарядов. Согласно его модели, атом состоит из нейтральных частиц, каждая из которых является электрическим дуплетом. Выполненные Ф. Ленардом расчёты показали, что эти частицы обладают очень малым радиусом и, следовательно, большая часть атома пуста.

Для объяснения характера оптических спектров и явления радиоактивности профессор физики Токийского университета Хантаро Нагаока предложил в 1904 г. свой вариант атомной модели, в котором атом уподоблялся планете Сатурн. Роль самой планеты играл положительно заряженный шар — основная часть атома, вокруг которого, как расположенные в виде колец спутники Сатурна, вращаются электроны.

Чтобы окончательно решить вопрос о распределении положительного заряда в атоме, Э. Резерфорд предложил изучить рассеяние альфа-частиц металлической фольгой. К этому времени был уже изобретён спинтарископ — прибор для визуального подсчёта альфа-частиц. Попадая на экран, покрытый сульфидом цинка

ZnS, они вызывали маленькие вспышки света — сцинтилляции, которые можно было наблюдать через увеличительное стекло.

Идея об атомном строении материи так и оставалась чисто философским умопостроением вплоть до начала XIX века, когда сформировались основы химии как науки. Химики первыми и обнаружили, что многие вещества в процессе реакций распадаются на более простые компоненты. Например, вода распадается на водород и кислород. Однако некоторые вещества — те же водород и кислород — разложению на составляющие при помощи химических реакций не поддаются. Такие вещества называли химическими элементами. К началу XIX века было известно около 30 химических элементов (на момент написания этой статьи их открыто более 110, включая искусственно полученные в лабораторных условиях; см. Периодическая система). Кроме того, было установлено, что в процессе химических реакций количественное соотношение веществ, участвующих в данной реакции, не изменяется. Так, для получения воды неизменно берутся восемь массовых долей кислорода и одна доля водорода (см. Закон Авогадро).

В XIX веке стало известно, что химические атомы разлагаются на более мелкие элементарные частицы и таким образом «атомами» в Демокритовском смысле не являются. Тем не менее, термин используется и теперь в современной химии и физике, несмотря на несоответствие его этимологии современным представлениям о строении атома. В современной физике вопрос об атомизме является открытым. Некоторые теоретики придерживаются атомизма, но под атомами подразумевают фундаментальные частицы, которые далее неделимы.

Первым осмысленную интерпретацию этих фактов предложил Джон Дальтон, чьё имя увековечено в открытом им законе Дальтона. В своих химических опытах он исследовал поведение газов (см. Закон Бойля—Мариотта, Закон Шарля и Основной закон термодинамики), но этим круг его интересов не ограничивался. В 1808 году он приступил к публикации своего фундаментального двухтомного труда «Новая система химической философии», радикально повлиявшего на дальнейшее развитие химии. В этой работе Дальтон предположил, что осмыслить и интерпретировать последние достижения экспериментальной химии можно только приняв, что каждому химическому элементу в этих опытах соответствует уникальный для него атом, и что именно смешение и объединение в различных пропорциях этих атомов приводит к образованию наблюдаемых в природе химических веществ. Например, вода, по Дальтону, состоит из сочетания двух атомов водорода и одного атома кислорода (общезвестная формула  $H_2O$ ). Тот факт, что все атомы одного вида неразличимы между собой, удачно объяснял, почему при химических реакциях они всегда обнаруживаются в неизменных пропорциях. Так, в случае с водой, два атома водорода всегда одни и те же, где бы мы ни взяли эту

воду, и всегда находятся в одной и той же связи с единственным атомом кислорода.

Для Дальтона, как и для Демокрита, атомы оставались неделимыми. В черновиках и книгах Дальтона мы находим рисунки, где атомы представлены в виде шариков. Однако основное положение его работы — что каждому химическому элементу соответствует особый тип атома — легло в основу всей современной химии. Этот факт остается непреложным и теперь, когда мы знаем, что каждый атом сам по себе является сложной структурой (см. Опыт Резерфорда) и состоит из тяжелого, положительно заряженного ядра и легких, отрицательно заряженных электронов, вращающихся по орбитам вокруг ядра. Достаточно обратиться к сложностям квантовой механики (см. также Атом Бора и Уравнение Шрёдингера), чтобы понять, что концепция атома не исчерпала себя и в XXI веке.

В 1852 г. английский химик Эдуард Франкланд разработал учение о валентности. Он определил валентность как способность атомов одного элемента соединяться с определённым числом атомов другого элемента. За единицу её измерения была принята валентность атома водорода.

В 1858 г. А. Кекуле и молодой шотландский химик Арчибальд Скотт Купер независимо друг от друга установили четырёхвалентность углерода и высказали предположение, что в органических соединениях атомы углерода могут соединяться между собой с образованием цепочек.

В 1861 г. русский химик-органик Александр Михайлович Бутлеров высказал принципиально важное положение, что в химическом соединении каждый атом связан непосредственно (с помощью устойчивых и относительно закреплённых связей) или косвенно (через взаимное влияние) со всеми остальными атомами. Он выдвинул представление о “химическом строении” молекул как о порядке межатомных связей в них и сформулировал основное положение теории химического строения: химические свойства молекулы определяются природой составляющих её атомов, их общим количеством и порядком связи друг с другом.

Большой вклад в развитие теории химического строения внёс немецкий химик-органик, близкий друг К. Маркса и Ф. Энгельса — Карл Шорлеммер. В отличие от большинства своих современников этот учёный был сознательным сторонником диалектического материализма 5. Именно знание диалектики и умение применить её в конкретной области естествознания позволили К. Шорлеммеру заложить экспериментальную основу современной органической химии. В 1864 г. он установил, что в предельных углеводородах все четыре связи атома углерода равноценны. Значение этого открытия видно из следующего. До К. Шорлеммера учёные считали, что в природе существуют два различных вещества:  $\text{CH}_3\text{—CH}_3$  и  $\text{C}_2\text{H}_5\text{—H}$ ; он же экспериментально доказал, что оба эти вещества представляют собой одно и то же, а именно — этан с совершенно одинаковыми атомами углерода и одинаковы-

ми атомами водорода. Тем самым была установлена правильность предложенной А. Купером структурной формулы этана

Открытие К. Шорлеммера позволило ввести современные структурные формулы и разработать номенклатуру органических соединений. В последующие годы учёный изучил весь ряд предельных углеводородов и их простейших производных до октана включительно. Оценивая значение этих работ, Ф. Энгельс писал: “Тем, что нам сейчас известно об этих парафинах, мы обязаны главным образом Шорлеммеру. Он исследовал имеющиеся вещества, принадлежащие к ряду парафинов, отделил одни от других и многие из них впервые получил в чистом виде; другие вещества, которые теоретически должны были существовать, но в действительности не были ещё известны, были открыты и получены также им. Таким образом, он стал одним из основоположников современной научной органической химии” [7]

В 1866 г. А. Кекуле распространил теорию химического строения на ароматические соединения. В частности, им была предложена знаменитая формула бензола!

В 70-е годы прошлого века теория химического строения обогатилась представлениями о пространственном расположении атомов в молекулах органических соединений. Голландский химик Якоб Хендрик Вант-Гофф выдвинул гипотезу, смысл которой заключался в следующем: химические связи атома углерода равномерно распределены в пространстве и направлены от центра правильного тетраэдра к его четырём вершинам. Эта гипотеза получила впоследствии теоретическое обоснование и была подтверждена экспериментально.

Начиная с 1888 г. в научном журнале Русского физико-химического общества стали появляться статьи с изложением оригинальных взглядов на структуру атомов. Автор этих статей — известный в то время философ Борис Николаевич Чичерин рассматривал атом как сложную систему, состоящую из положительно заряженной центральной массы и окружающих её отрицательных оболочек. Частицы с отрицательным зарядом (электроны) обладали, по его мнению, наибольшей подвижностью, а общее число оболочек возрастало с увеличением атомной массы элемента.

К идее планетарного строения атома, в основных чертах совпадающей со взглядами Б. Н. Чичерина, пришёл в 90-х годах прошлого века также и другой русский учёный — Николай Александрович Морозов.

## 5.1. Открытие электрона

На протяжении всей второй половины XIX века физики активно изучали феномен катодных лучей. Простейший аппарат, в котором они наблюдались, представлял собой герметичную стеклянную трубку, заполненную разреженным газом, в

которую с двух сторон было впаяно по электроду: с одной стороны катод, подключавшийся к отрицательному полюсу электрической батареи; с другой — анод, подключавшийся к положительному полюсу. При подаче на катодно-анодную пару высокого напряжения разреженный газ в трубке начинал светиться, причем при низких напряжениях свечение наблюдалось лишь в области катода, а при повышении напряжения — внутри всей трубки; однако при откачивании газа из трубки, начиная с какого-то момента, свечение исчезало уже в области катода, сохраняясь около анода. Это свечение ученые и приписали катодным лучам.

К концу 1880-х годов дискуссия о природе катодных лучей приняла острый полемический характер. Подавляющее большинство видных ученых немецкой школы придерживалось мнения, что катодные лучи представляют собой, подобно свету, волновые возмущения невидимого эфира. В Англии же придерживались мнения, что катодные лучи состоят из ионизированных молекул или атомов самого газа. У каждой стороны имелись веские доказательства в пользу своей гипотезы. Сторонники молекулярной гипотезы справедливо указывали на тот факт, что катодные лучи отклоняются под воздействием магнитного поля, в то время как на световые лучи магнитное поле никак не воздействует. Следовательно, они состоят из заряженных частиц. С другой стороны, сторонники корпускулярной гипотезы никак не могли объяснить ряда явлений, в частности обнаруженного в 1892 году эффекта практически беспрепятственного прохождения катодных лучей через тонкую алюминиевую фольгу.

Наконец в 1897 году молодой английский физик Дж. Дж. Томсон положил конец этим спорам раз и навсегда, а заодно прославился в веках как первооткрыватель электрона. В своем опыте Томсон использовал усовершенствованную катодно-лучевую трубку, конструкция которой была дополнена электрическими катушками, создававшими (согласно закону Ампера) внутри трубки магнитное поле, и набором параллельных электрических конденсаторных пластин, создававших внутри трубки электрическое поле. Благодаря этому появилась возможность исследовать поведение катодных лучей под воздействием и магнитного, и электрического поля.

Используя трубку новой конструкции, Томсон последовательно показал, что:

- (1) катодные лучи отклоняются в магнитном поле в отсутствие электрического;
- (2) катодные лучи отклоняются в электрическом поле в отсутствие магнитного; и
- (3) при одновременном действии электрического и магнитного полей сбалансированной интенсивности, ориентированных в направлениях, вызывающих по отдельности отклонения в противоположные стороны, катодные лучи распространяются прямолинейно, то есть действие двух полей взаимно уравнивается.

Томсон выяснил, что соотношение между электрическим и магнитным поля-

ми, при котором их действие уравнивается, зависит от скорости, с которой движутся частицы. Проведя ряд измерений, Томсон смог определить скорость движения катодных лучей. Оказалось, что они движутся значительно медленнее скорости света, из чего следовало, что катодные лучи могут быть только частицами, поскольку любое электромагнитное излучение, включая сам свет, распространяется со скоростью света (см. Спектр электромагнитного излучения). Эти неизвестные частицы. Томсон назвал «корпускулами», но вскоре они стали называться «электронами».

Сразу же стало ясно, что электроны обязаны существовать в составе атомов — иначе, откуда бы они взялись? 30 апреля 1897 года — дата доклада Томсоном полученных им результатов на заседании Лондонского королевского общества — считается днем рождения электрона. И в этот день отошло в прошлое представление о «неделимости» атомов (см. Атомная теория строения вещества). Вкупе с последовавшим через десять с небольшим лет открытием атомного ядра (см. Опыт Резерфорда) открытие электрона заложило основу современной модели атома.

Описанные выше «катодные», а точнее, электронно-лучевые трубки стали простейшими предшественницами современных телевизионных кинескопов и компьютерных мониторов, в которых строго контролируемые количества электронов выбиваются с поверхности раскаленного катода, под воздействием переменных магнитных полей отклоняются под строго заданными углами и бомбардируют фосфоресцирующие ячейки экранов, образуя на них четкое изображение, возникающее в результате фотоэлектрического эффекта, открытие которого также было бы невозможным без нашего знания истинной природы катодных лучей.

## 5.2. Опыт Резерфорда

Эрнест Резерфорд — уникальный ученый в том плане, что свои главные открытия он сделал уже после получения Нобелевской премии. В 1911 году ему удалось эксперимент, который не только позволил ученым заглянуть вглубь атома и получить представление о его строении, но и стал образцом изящества и глубины замысла.

Используя естественный источник радиоактивного излучения, Резерфорд построил пушку, дававшую направленный и сфокусированный поток частиц. Пушка представляла собой свинцовый ящик с узкой прорезью, внутрь которого был помещен радиоактивный материал. Благодаря этому частицы (в данном случае альфа-частицы, состоящие из двух протонов и двух нейтронов), испускаемые радиоактивным веществом во всех направлениях, кроме одного, поглощались свинцовым экраном, и лишь через прорезь вылетал направленный пучок альфа-частиц. Далее на пути пучка стояло еще несколько свинцовых экранов с узкими прорезями,

отсекавших частицы, отклоняющиеся от строго заданного направления. В результате к мишени подлетал идеально сфокусированный пучок альфа-частиц, а сама мишень представляла собой тончайший лист золотой фольги. В нее-то и ударял альфа-луч. После столкновения с атомами фольги альфа-частицы продолжали свой путь и попадали на люминесцентный экран, установленный позади мишени, на котором при попадании на него альфа-частиц регистрировались вспышки. По ним экспериментатор мог судить, в каком количестве и насколько альфа-частицы отклоняются от направления прямолинейного движения в результате столкновений с атомами фольги.

Эксперименты подобного рода проводились и раньше. Основная их идея состояла в том, чтобы по углам отклонения частиц накопить достаточно информации, по которой можно было бы сказать что-либо определенное о строении атома. В начале XX века ученые уже знали, что атом содержит отрицательно заряженные электроны. Однако преобладало представление, что атом представляет собой что-то похожее на положительно заряженную тонкую сетку, заполненную отрицательно заряженными электронами-изюминами, — модель так и называлась «модель сетки с изюмом». По результатам подобных опытов ученым удалось узнать некоторые свойства атомов — в частности, оценить порядок их геометрических размеров.

Резерфорд, однако, заметил, что никто из его предшественников даже не пробовал проверить экспериментально, не отклоняются ли некоторые альфа-частицы под очень большими углами. Модель сетки с изюмом просто не допускала существования в атоме столь плотных и тяжелых элементов структуры, что они могли бы отклонять быстрые альфа-частицы на значительные углы, поэтому никто и не озабочивался тем, чтобы проверить такую возможность. Резерфорд попросил одного из своих студентов переоборудовать установку таким образом, чтобы можно было наблюдать рассеяние альфа-частиц под большими углами отклонения, — просто для очистки совести, чтобы окончательно исключить такую возможность. В качестве детектора использовался экран с покрытием из сульфида натрия — материала, дающего флуоресцентную вспышку при попадании в него альфа-частицы. Каково же было удивление не только студента, непосредственно проводившего эксперимент, но и самого Резерфорда, когда выяснилось, что некоторые частицы отклоняются на углы вплоть до  $180^\circ$ !

В рамках устоявшейся модели атома полученный результат не мог быть истолкован: в сетке с изюмом попросту нет ничего такого, что могло бы отразить мощную, быструю и тяжелую альфа-частицу. Резерфорд вынужден был заключить, что в атоме большая часть массы сосредоточена в невероятно плотном веществе, расположенном в центре атома. А вся остальная часть атома оказывалась на

много порядков менее плотной, нежели это представлялось раньше. Из поведения рассеянных альфа-частиц вытекало также, что в этих сверхплотных центрах атома, которые Резерфорд назвал ядрами, сосредоточен также и весь положительный электрический заряд атома, поскольку только силами электрического отталкивания может быть обусловлено рассеяние частиц под углами больше  $90^\circ$ .

Годы спустя Резерфорд любил приводить по поводу своего открытия такую аналогию. В одной южноафриканской стране таможенно предупредили, что в страну собираются провезти крупную партию контрабандного оружия для повстанцев, и оружие будет спрятано в тюках хлопка. И вот перед таможенником после разгрузки оказывается целый склад, забитый тюками с хлопком. Как ему определить, в каких именно тюках спрятаны винтовки? Таможенник решил задачу просто: он стал стрелять по тюкам, и, если пули рикошетили от какого-либо тюка, он по этому признаку и выявлял тюки с контрабандным оружием. Так и Резерфорд, увидев, как альфа-частицы рикошетируют от золотой фольги, понял, что внутри атома скрыта гораздо более плотная структура, чем предполагалось.

Картина атома, нарисованная Резерфордом по результатам опыта, нам сегодня хорошо знакома. Атом состоит из сверхплотного, компактного ядра, несущего на себе положительный заряд, и отрицательно заряженных легких электронов вокруг него. Позже ученые подвели под эту картину надежную теоретическую базу (см. Атом Бора), но началось всё с простого эксперимента с маленьким образцом радиоактивного материала и куском золотой фольги.

### 5.3. Атом Бора

Когда Джон Дальтон впервые в истории современной науки предложил атомную теорию строения вещества, атомы представлялись ему неделимыми, наподобие микроскопических бильярдных шаров. Однако на протяжении всего XIX столетия становилось всё очевиднее, что такая модель неприемлема. Поворотной точкой стало открытие электрона Дж. Дж. Томсоном в 1897 году, из которого следовало, что атом состоит из отдельных частиц — прямое свидетельство против его неделимости. Последним гвоздем в крышку гроба неделимого атома стало открытие в 1911 году атомного ядра (см. Опыт Резерфорда). После этих открытий стало ясно, что атом не просто делим, но что он еще и обладает дискретной структурой: состоит из массивного, положительно заряженного центрального ядра и движущихся по орбитам вокруг него легких, отрицательно заряженных электронов.

Но с этой простой планетарной моделью атома тут же возникли проблемы. Прежде всего, согласно физическим законам того времени, такой атом не мог бы просуществовать дольше доли мгновения — на наше счастье, мы имеем все основания утверждать, что этот факт опытом не подтверждается. Аргументация была



такова: в соответствии с законами механики Ньютона, электрон, находящийся на орбите, движется с ускорением. Следовательно, согласно уравнениям Максвелла, он должен излучать электромагнитные волны и, как следствие, терять энергию (в силу закона сохранения энергии; см. Уравнение состояния идеального газа) и вскоре сойти с орбиты и упасть на ядро. Это стандартная задачка по физике для студентов-первокурсников, и любой из них легко докажет путем таких рассуждений, что планетарный атом не просуществует и секунды. Очевидно, что-то было не так в этой простой модели строения атома, раз реальные атомы, окружающие нас, просуществовали миллиарды лет.

Разрешить эту проблему и направить физиков по верному пути понимания атомной структуры удалось молодому датскому теоретику Нильсу Бору, недавно прибывшему на стажировку в Англию после защиты докторской диссертации у себя на родине. За отправную точку Бор принял новые постулаты квантовой механики, согласно которым на субатомном уровне энергия испускается исключительно порциями, которые получили название «кванты». Немецкий физик Макс Планк воспользовался положением о том, что атомы излучают свет отдельными частями (позже Альберт Эйнштейн назвал их «фотоны»), для разрешения застарелой проблемы излучения черного тела. Используя концепцию фотонов, Альберт Эйнштейн теоретически объяснил фотоэлектрический эффект. За свои работы и Планк, и Эйнштейн получили по Нобелевской премии.

Бор развил квантовую теорию еще на шаг и применил ее к состоянию электронов на атомных орбитах. Говоря научным языком, он предположил, что угловой момент электрона (см. Опыт Штерна—Герлаха) квантуется. Далее он показал, что в этом случае электрон не может находиться на произвольном удалении от атомного ядра, а может быть лишь на ряде фиксированных орбит, получивших название «разрешенные орбиты». Электроны, находящиеся на таких орбитах, не могут излучать электромагнитные волны произвольной интенсивности и частоты, иначе им, скорее всего, пришлось бы перейти на более низкую, неразрешенную орбиту. Поэтому они и удерживаются на своей более высокой орбите, подобно самолету в аэропорту отправления, когда аэропорт назначения закрыт по причине нелетной погоды.

Однако электроны могут переходить на другую разрешенную орбиту. Как и большинство явлений в мире квантовой механики, этот процесс не так просто представить наглядно. Электрон просто исчезает с одной орбиты и материализуется на другой, не пересекая пространства между ними. Этот эффект называли «квантовым прыжком», или «квантовым скачком». Позже этот термин обрел широкую популярность и вошел в наш лексикон со значением «внезапное, стремительное улучшение» («Настоящий квантовый скачок в технологии производства

наручных часов!»). Если электрон перескакивает на более низкую орбиту, он теряет энергию и, соответственно, испускает квант света — фотон фиксированной энергии с фиксированной длиной волны. На глаз мы различаем фотоны разных энергий по цвету — раскаленная на огне медная проволока светится синим, а натриевая лампа уличного освещения — желтым. Для перехода на более высокую орбиту электрон должен, соответственно, поглотить фотон.

В картине атома по Бору, таким образом, электроны переходят вниз и вверх по орбитам дискретными скачками — с одной разрешенной орбиты на другую, подобно тому, как мы поднимаемся и спускаемся по ступеням лестницы. Каждый скачок обязательно сопровождается испусканием или поглощением кванта энергии электромагнитного излучения, который мы называем фотоном.

Со временем интуитивная гипотеза Бора уступила место строгой систематической формулировке в рамках законов квантовой механики и, в частности, концепции двойственной природы элементарных частиц — корпускулярно-волновой (см. Принцип дополнительности). Сегодня электроны представляются нам не микроскопическими планетами, обращающимися вокруг атомного ядра, а волнами вероятности, плещущимися внутри своих орбит — подобно приливам и отливам в тороидальном бассейне — и подчиняющимися уравнению Шрёдингера. Современные физики, как само собой разумеющееся, рассчитывают характеристики этих волн для самых сложных по структуре атомов и используют их для объяснения свойств и поведения этих атомов. Однако основополагающую картину всей современной квантовой механики нарисовал в своем великом прозрении Нильс Бор — в далеком теперь 1913 году.

## 5.4. Античастицы

В 1920-е годы — после введения принципов квантовой механики — субатомный мир представлялся крайне простым. Всего два вида элементарных частиц — протоны и нейтроны — составляли ядро атома (хотя экспериментально существование нейтронов и было подтверждено лишь в 1930-е годы), и один вид частиц — электроны — существовали за пределами ядра, вращаясь вокруг него на орбитах. Казалось, всё многообразие Вселенной выстроено из этих трех частиц.

Увы, столь простой картине мира суждено было просуществовать недолго. Ученые, оборудовав высокогорные лаборатории по всему миру, принялись за изучение состава космических лучей, бомбардирующих нашу планету (см. Элементарные частицы), и вскоре начали открывать всевозможные частицы, не имеющие ни малейшего отношения к вышеописанной идиллической триаде. В частности, были обнаружены совершенно немыслимые по своей природе античастицы.

Мир античастиц — своего рода зеркальное отражение знакомого нам мира.

Масса античастицы в точности равняется массе частицы, которой она вроде бы соответствует, но все ее остальные характеристики противоположны прообразу. Например, электрон несет отрицательный электрический заряд, а парная ему античастица — «позитрон» (производное от «позитивный электрон») — положительный. У протона заряд положительный, а у антипротона — отрицательный. И так далее. При взаимодействии частицы и парной ей античастицы происходит их взаимная аннигиляция — обе частицы прекращают свое существование, а их масса преобразуется в энергию, которая рассеивается в пространстве в виде вспышки фотонов и прочих сверхлегких частиц.

Существование античастиц впервые предсказал Поль Дирак в статье, опубликованной им в 1930 году. Чтобы понять, как ведут себя частицы и античастицы при взаимодействии по Дираку, представьте себе ровное поле. Если взять лопату и вырыть в нем ямку, в поле появятся два объекта — собственно ямка и кучка грунта рядом с ней. Теперь представим, что кучка грунта — это обычная частица, а ямка, или «отсутствие кучки грунта», — античастица. Засыпьте ямку ранее извлеченным из нее грунтом — и не останется ни ямки, ни кучки (аналог процесса аннигиляции). И снова перед вами ровное поле.

Пока шло теоретизирование вокруг античастиц, молодой физик-экспериментатор из Калифорнийского технологического института Карл Дейвид Андерсон (Carl David Anderson, 1905–91) монтировал оборудование астрофизической лаборатории на вершине Пайк в штате Колорадо, намереваясь заняться изучением космических лучей. Работая под руководством Роберта Милликена (см. Опыт Милликена), он придумал установку для регистрации космических лучей, состоящую из мишени, помещенной в мощное магнитное поле. Бомбардируя мишень, частицы оставляли в камере вокруг мишени треки из капелек конденсата, которые можно было сфотографировать и по полученным фотографиям изучать траектории движения частиц.

При помощи этого аппарата, получившего название конденсационная камера, Андерсон смог зарегистрировать частицы, возникающие в результате столкновения космических лучей с мишенью. По интенсивности трека, оставленного частицей, он мог судить о ее массе, а по характеру отклонения ее траектории в магнитном поле — определить электрический заряд частицы. К 1932 году ему удалось зарегистрировать ряд столкновений, в результате которых образовывались частицы с массой, равной массе электрона, однако отклонялись они под воздействием магнитного поля в противоположную сторону по сравнению с электроном и, следовательно, имели положительный электрический заряд. Так была впервые экспериментально выявлена античастица — позитрон. В 1932 году Андерсон опубликовал полученные результаты, а в 1936 году был отмечен за них полови-

ной Нобелевской премии по физике. (Вторую половину премии получил австрийский физик-экспериментатор Виктор Франц Гесс (Victor Franz Hess, 1883–1964), впервые экспериментально подтвердивший существование космических лучей. — Прим. переводчика.) Это был первый (и, пока что, последний) случай присуждения Нобелевской премии ученому, официально даже не числившемуся на тот момент в штате научных сотрудников своего университета!

Хотя вышеописанный пример, казалось бы, служит идеальной иллюстрацией сценария «предсказание - проверка» в рамках научного метода, описанного во Введении, историческая реальность представляется не столь простой, как кажется. Дело в том, что Андерсон, судя по всему, не знал о публикации Дирака абсолютно ничего до своего экспериментального открытия. Так что в данном случае речь идет, скорее, об одновременном теоретическом и экспериментальном открытии позитрона.

Все следующие за позитроном античастицы были экспериментально обнаружены уже в лабораторных условиях — на ускорителях. Сегодня физики-экспериментаторы имеют возможность буквально штамповать их в нужных количествах для текущих экспериментов, и чем-то из ряда вон выходящим античастицы давно не считаются.

## 5.5. Стандартная модель

Стандартной моделью сегодня принято называть теорию, наилучшим образом отражающую наши представления об исходном материале, из которого изначально построена Вселенная. Она же описывает, как именно материя образуется из этих базовых компонентов, и силы и механизмы взаимодействия между ними (см. также Кварки и восьмеричный путь, Универсальные теории и Элементарные частицы).

Со структурной точки зрения элементарные частицы, из которых состоят атомные ядра (нуклоны), и вообще все тяжелые частицы — адроны (барионы и мезоны) — состоят из еще более простых частиц, которые принято называть фундаментальными. В этой роли по-настоящему фундаментальных первичных элементов материи выступают кварки, электрический заряд которых равен  $2/3$  или  $-1/3$  единичного положительного заряда протона. Самые распространенные и легкие кварки называют верхним и нижним и обозначают, соответственно,  $u$  (от английского *up*) и  $d$  (*down*). Иногда их же называют протонным и нейтронным кварком по причине того, что протон состоит из комбинации  $uud$ , а нейтрон —  $udd$ . Верхний кварк имеет заряд  $2/3$ ; нижний — отрицательный заряд  $-1/3$ . Поскольку протон состоит из двух верхних и одного нижнего, а нейтрон — из одного верхнего и двух нижних кварков, вы можете самостоятельно убедиться, что суммарный заряд протона и нейтрона получается строго равным 1 и 0, и удостовериться, что в этом

Стандартная модель адекватно описывает реальность. Две другие пары кварков входят в состав более экзотических частиц. Кварки из второй пары называют очарованным —  $c$  (от charmed) и странным —  $s$  (от strange). Третью пару составляют истинный —  $t$  (от truth, или в англ. традиции top) и красивый —  $b$  (от beauty, или в англ. традиции bottom) кварки. Практически все частицы, предсказываемые Стандартной моделью и состоящие из различных комбинаций кварков, уже открыты экспериментально.

Другой строительный набор состоит из кирпичиков, называемых лептонами. Самый распространенный из лептонов — давно нам знакомый электрон, входящий в структуру атомов, но не участвующий в ядерных взаимодействиях, ограничиваясь межатомными. Помимо него (и парной ему античастицы под названием позитрон) к лептонам относятся более тяжелые частицы — мюон и тау-лептон с их античастицами. Кроме того, каждому лептону сопоставлена своя незаряженная частица с нулевой (или практически нулевой) массой покоя; такие частицы называются, соответственно, электронное, мюонное или таонное нейтрино.

Итак, лептоны, подобно кваркам, также образуют три «семейных пары». Такая симметрия не ускользнула от наблюдательных глаз теоретиков, однако убедительного объяснения ей до сих пор не предложено. Как бы то ни было, кварки и лептоны представляют собой основной строительный материал Вселенной.

Чтобы понять обратную сторону медали — характер сил взаимодействия между кварками и лептонами, — нужно понять, как современные физики-теоретики интерпретируют само понятие силы. В этом нам поможет аналогия. Представьте себе двух лодочников, гребущих на встречных курсах по реке Кэм в Кэмбридже. Один гребец от щедрости душевной решил угостить коллегу шампанским и, когда они проплывали друг мимо друга, кинул ему полную бутылку шампанского. В результате действия закона сохранения импульса, когда первый гребец кинул бутылку, курс его лодки отклонился от прямолинейного в противоположную сторону, а когда второй гребец поймал бутылку, ее импульс передался ему, и вторая лодка также отклонилась от прямолинейного курса, но уже в противоположную сторону. Таким образом, в результате обмена шампанским обе лодки изменили направление. Согласно законам механики Ньютона это означает, что между лодками произошло силовое взаимодействие. Но ведь лодки не вступали между собой в прямое соприкосновение? Здесь мы и видим наглядно, и понимаем интуитивно, что сила взаимодействия между лодками была передана носителем импульса — бутылкой шампанского. Физики назвали бы ее переносчиком взаимодействия.

В точности так же и силовые взаимодействия между частицами происходят посредством обмена частицами-переносчиками этих взаимодействий. Фактически, различие между фундаментальными силами взаимодействия между частицами

мы и проводим лишь постольку, поскольку в роли переносчиков этих взаимодействий выступают разные частицы. Таких взаимодействий четыре: сильное (именно оно удерживает кварки внутри частиц), электромагнитное, слабое (именно оно приводит к некоторым формам радиоактивного распада) и гравитационное. Переносчиками сильного цветового взаимодействия являются глюоны, не обладающие ни массой, ни электрическим зарядом. Этот тип взаимодействия описывается квантовой хромодинамикой. Электромагнитное взаимодействие происходит посредством обмена квантами электромагнитного излучения, которые называются фотонами и также лишены массы. Слабое взаимодействие, напротив, передается массивными векторными или калибровочными бозонами, которые «весят» в 80-90 раз больше протона, — в лабораторных условиях их впервые удалось обнаружить лишь в начале 1980-х годов. Наконец, гравитационное взаимодействие передается посредством обмена не обладающими собственной массой гравитонами — этих посредников пока что экспериментально обнаружить не удалось.

В рамках Стандартной модели первые три типа фундаментальных взаимодействий удалось объединить, и они более не рассматриваются по отдельности, а считаются тремя различными проявлениями силы единой природы. Возвращаясь к аналогии, предположим, что другая пара гребцов, проплывая друг мимо друга по реке Кэм, обменивалась не бутылкой шампанского, а всего лишь стаканчиком мороженого. От этого лодки также отклонятся от курса в противоположные стороны, но значительно слабее. Стороннему наблюдателю может показаться, что в этих двух случаях между лодками действовали разные силы: в первом случае произошел обмен жидкостью (бутылку я предлагаю во внимание не принимать, поскольку большинству из нас интересно ее содержимое), а во втором — твердым телом (мороженым). А теперь представьте, что в Кембридже в тот день стояла редкостная для северных мест летняя жара, и мороженое в полете растаяло. То есть, достаточно некоторого повышения температуры, чтобы понять, что, фактически, взаимодействие не зависит от того, жидкое или твердое тело выступает в роли его переносчика. Единственная причина, по которой нам представлялось, что между лодками действуют различные силы, состояла во внешнем отличии переносчика-мороженого, вызванном недостаточной для его плавления температурой. Поднимите температуру — и силы взаимодействия предстанут наглядно едиными.

Силы, действующие во Вселенной, также сплавляются воедино при высоких энергиях (температурах) взаимодействия, после чего различить их невозможно. Первыми объединяются (именно так это принято называть) слабое ядерное и электромагнитное взаимодействия. В результате мы получаем так называемое электрослабое взаимодействие, наблюдаемое даже лабораторно при энергиях, разви-

ваемых современными ускорителями элементарных частиц. В ранней Вселенной энергии были столь высоки, что в первые 10–10 секунды после Большого взрыва не было грани между слабыми ядерными и электромагнитными силами. Лишь после того, как средняя температура Вселенной понизилась до 1014 К, все четыре наблюдаемые сегодня силовые взаимодействия разделились и приняли современный вид. Пока температура была выше этой отметки, действовали лишь три фундаментальные силы: сильного, объединенного электрослабого и гравитационного взаимодействий.

Объединение электрослабого и сильного ядерного взаимодействия происходит при температурах порядка  $10^{27}$  К. В лабораторных условиях такие энергии сегодня недостижимы. Самый мощный современный ускоритель — строящийся в настоящее время на границе Франции и Швейцарии Большой адронный коллайдер (Large Hadron Collider) — сможет разгонять частицы до энергий, которые составляют всего 0,000000001% от необходимой для объединения электрослабого и сильного ядерного взаимодействий. Так что, вероятно, экспериментального подтверждения этого объединения ждать нам придется долго. Таких энергий нет и в современной Вселенной, однако в первые 10–35 с ее существования температура Вселенной была выше 1027 К, и во Вселенной действовало всего две силы — электросильного и гравитационного взаимодействия. Теории, описывающие эти процессы, называют «теориями Великого объединения» (ТВО). Напрямую проверить ТВО нельзя, но они дают определенные прогнозы и относительно процессов, протекающих при более низких энергиях. На сегодняшний день все предсказания ТВО для относительно низких температур и энергий подтверждаются экспериментально.

Итак, Стандартная модель, в обобщенном виде, представляет собой теорию строения Вселенной, в которой материя состоит из кварков и лептонов, а сильные, электромагнитные и слабые взаимодействия между ними описываются теориями великого объединения. Такая модель, очевидно, не полна, поскольку не включает гравитацию. Предположительно, более полная теория со временем все-таки будет разработана (см. Универсальные теории), а на сегодня Стандартная модель — это лучшее из того, что мы имеем.

## 5.6. Универсальная модель

В природе действуют четыре фундаментальные силы, и все физические явления происходят в результате взаимодействий между физическими объектами, которые обусловлены одной или несколькими из этих сил. Четыре вида взаимодействий в порядке убывания их силы это:

сильное взаимодействие, удерживающее кварки в составе адронов и нуклоны в

составе атомного ядра; электромагнитное взаимодействие между электрическими зарядами и магнитами; слабое взаимодействие, которым обусловлены некоторые типы реакций радиоактивного распада; и гравитационное взаимодействие. В классической механике Ньютона любая сила — это всего лишь сила притяжения или отталкивания, вызывающая изменение характера движения физического тела. В современных квантовых теориях, однако, понятие силы (трактуемое теперь как взаимодействие между элементарными частицами) интерпретируется несколько иначе. Силовое взаимодействие теперь считается результатом обмена частицей-носителем взаимодействия между двумя взаимодействующими частицами. При таком подходе электромагнитное взаимодействие между, например, двумя электронами, обусловлено обменом фотоном между ними, и аналогичным образом обмен другими частицами-посредниками приводит к возникновению трех прочих видов взаимодействий. (Подробнее см. Стандартная модель.)

Более того, характер взаимодействия обусловлен физическими свойствами частиц-носителей. В частности, закон всемирного тяготения Ньютона и закон Кулона имеют одинаковую математическую формулировку именно потому, что в обоих случаях переносчиками взаимодействия являются частицы, лишенные массы покоя. Слабые взаимодействия проявляются лишь на исключительно малых расстояниях (по сути, лишь внутри атомного ядра), поскольку их носители — калибровочные бозоны — являются очень тяжелыми частицами. Сильные взаимодействия также проявляются лишь на микроскопических расстояниях, но по иной причине: здесь всё дело в «пленении кварков» внутри адронов и фермионов (см. Стандартная модель).

Оптимистичные ярлыки «универсальная теория», «теория всего сущего», «теория великого объединения», «окончательная теория» сегодня используются в отношении любой теории, пытающейся объединить все четыре взаимодействия, рассматривая их в качестве различных проявлений некоей единой и великой силы. Если бы это удалось, картина устройства мира упростилась бы до предела. Вся материя состояла бы лишь из кварков и лептонов (см. Стандартная модель), и между всеми этими частицами действовали бы силы единой природы. Уравнения, описывающие базовые взаимодействия между ними, были бы столь короткими и ясными, что уместились бы на почтовой открытке, описывая при этом, по сути, основу всех без исключения процессов, наблюдаемых во Вселенной. По словам нобелевского лауреата, американского физика-теоретика Стивена Вайнберга (Steven Weinberg, 1933–1996) «это была бы глубинная теория, от которой во все стороны стрелами расходилась интерференционная картина устройства мироздания, и более глубоких теоретических основ в дальнейшем не потребовалось бы». Как видно из сплошных сослагательных наклонений в цитате, такой теории до сих пор не су-



пеществует. Нам остается лишь очертить примерные контуры процесса, который может привести к разработке столь всеобъемлющей теории.

Путь от четырех взаимодействий к одному весьма справедливо называют объединением. Чтобы понять, как оно происходит, представьте себе две пары фигуристов на открытом катке при температуре воздуха несколько ниже  $0^{\circ}\text{C}$  (точка замерзания воды). Одна пара обменивается ведром этилового спирта, который при такой температуре не замерзает и находится в жидком состоянии, а вторая — ведром превратившейся в лед воды. Может показаться, что между ними действуют две силы разной природы — одна передается путем обмена жидкостью, другая — путем обмена твердым телом. Но стоит температуре поднять выше нуля, как вода во втором ведре растает — и мы увидим, что на самом деле между фигуристами действовала одна и та же сила, ставшая следствием обмена жидкостью. Нам только казалось, что это были две разные силы.

Аналогичным образом все теории объединения исходят из того, что при достаточно высоких энергиях взаимодействия между частицами (когда они имеют скорость, близкую к предельной скорости света), «лед тает», грань между различными видами взаимодействий стирается, и все силы начинают действовать одинаково. При этом теории предсказывают, что происходит это не одновременно для всех четырех сил, а поэтапно, по мере увеличения энергий взаимодействия.

Самый нижний энергетический порог, при котором может произойти первое слияние сил разных типов, крайне высок, однако находится уже в пределах досягаемости самых современных ускорителей. Энергии частиц на ранней стадии Большого взрыва были крайне высоки (см. также Ранняя Вселенная). В первые  $10^{-10}$  с они обеспечивали объединение слабых ядерных и электромагнитных сил в электрослабое взаимодействие. Лишь начиная с этого момента окончательно разделились все четыре известных нам силы. До этого момента существовали всего три фундаментальные силы: сильного, электрослабого и гравитационного взаимодействий.

Следующее объединение происходит при энергиях далеко за пределами достижимых в условиях земных лабораторий — они существовали во Вселенной в первые  $10^{-35}$  с ее существования. Начиная с этих энергий электрослабое взаимодействие объединяется с сильным. Теории, описывающие процесс такого объединения, называются теориями большого объединения (ТБО). Проверить их на экспериментальных установках невозможно, но они хорошо прогнозируют течение целого ряда процессов, протекающих при более низких энергиях, и это служит косвенным подтверждением их истинности. Однако на уровне ТБО наши возможности в плане проверки универсальных теорий исчерпываются. Далее начинается область теорий суперобъединения (ТСО) или всеобщих теорий — и при одном упо-

минании о них в глазах у физиков-теоретиков загорается блеск. Непротиворечивая ТСО позволила бы объединить гравитацию с единым сильно-электрослабым взаимодействием, и строение Вселенной получило бы простейшее из возможных объяснений.

## Список литературы

- [1] <http://elementy.ru/>
- [2] Астафуров В. И., Бусев А. И. Строение вещества. - М.: Просвещение, 1983.
- [3] [https://ru.wikipedia.org/wiki/Бесконечная вложенность материи](https://ru.wikipedia.org/wiki/Бесконечная_вложенность_материи)
- [4] <https://ru.wikipedia.org/wiki/Атомизм>
- [5] Лукреций. О природе вещей (De rerum natura). М., 1945, с. 15, 79, 81
- [6] Ломоносов М. В. Полн. собр. соч. М.—Л., 1957, т. X, с. 140.
- [7] Маркс К. и Энгельс Ф. Соч., т. 22, с. 323.
- [8] Perrin J. Les hypotheses moléculaires. — Rev. sci., 1901, ser. 4, v. 15, p. 449-461.