

## 1.20. Новая физика

Тело человека – фитиль, на котором загорается Свет, ...ибо Шхина пребывает на голове его.

*Тания, 35:5–6*

Ньютон, несомненно, озарил старый свет Светом знания. После сэра Исаака Ньютона европейская Наука развивалась поразительно быстрыми темпами. Все шло замечательно, пока в 1911 г. Эрнст Резерфорд (1871–1937) и параллельно с ним Гейгер и Марсден не провели ряд экспериментов по рассеянию альфа-частиц на тонких пленках различных веществ, а Ленард – аналогичные опыты с электронами. Результат для того времени оказался потрясающим. Внутренность веществ оказалась практически пустой. Большая часть альфа-частиц пролетала через тонкие пленки вещества, не встречая практически никакого сопротивления, лишь незначительная часть из них изменяла направление движения, а часть из рассеиваемых частиц отражалась после взаимодействия с пленками в обратном направлении. Это могло означать лишь то, что внутри металлических пленок вещество сконцентрировано в очень маленьких плотных остовах (ядрах), а между ними пространство практически пусто.

*Теперь нам известно, что размер ядер атомов около  $10^{-13}$  см, а расстояние между ближайшими атомами твердых веществ  $10^{-8}$  см. При этом объем ядра равен примерно  $10^{-39}$  см<sup>3</sup>, а объем «пустого» пространства вокруг одного ядра в кристаллической решетке – порядка  $10^{-24}$  см<sup>3</sup>, т. е. объем вещества, сконцентрированного в ядрах, на 15 порядков меньше объема «пустоты» между ядрами. Поэтому, в самом деле, даже твердые вещества можно считать практически «пустыми».*

*Для сравнения приведем следующие данные. Радиус планеты Земля порядка 6000 км, а расстояние до Солнца  $1,5 \times 10^8$  км, т. е. размеры планеты также примерно на 5 порядков меньше расстояния до ближайшей звезды. Откуда наглядно видно, что расстояния между планетами Солнечной системы соизмеримы с расстояниями между ядрами ближайших атомов в кристаллических решетках твердых веществ.*

Ко времени экспериментов Резерфорда уже были открыты более мелкие частицы, чем атомы. В 1897 г. Джозеф Джон Томсон (1856–1940, Англия) открыл электрон. А протон был открыт самим Резерфордом в 1909 г.

В начале XX в. сумма накопленных экспериментальных данных позволяла строить различные модели атомов и казалось, что все укладывается в рамки совокупности классических теорий: механики, электродинамики, термодинамики и химии. Казалось, не было причин для беспокойства. Оставалось несколько проблем, связанных с отсутствием эфирного ветра, спектром излучения абсолютно черного тела и отсутствием возможности создания модели стабильного атома на основании представлений классической электродинамики, но эти проблемы казались столь незначительными, что не могли пошатнуть величественное здание классической физики.

Но именно эти проблемы инициировали формирование новых взглядов и потребовали переосмысления всей мировоззренческой картины материального мира. Разрешение проблемы отсутствия эфирного ветра привело к возникновению сначала специальной, а затем общей теории относительности. Гением Альберта Эйнштейна, усилиями Марселя Гроссмана (1878–936) и Давида Гильберта (1862–1943), «стоявших на плечах гигантов» – Карла Фридриха Гаусса (1777–1855), Бернхарда Римана (1826–1866) и Тулео Леви-Чевита (1873–1941) была создана, пожалуй, самая красивая из ныне известных теорий – Общая теория относительности (ОТО). Красота ОТО может соперничать с самыми изысканными произведениями искусств.

*Удивительно, но значительная часть физической реальности весьма точным образом описывается той или иной математической структурой, развитой в лоне математики как бы независимо от каких-либо физических воззрений. Это отмечали многие физики (А. Эйнштейн, П. Дирак, Е. Вигнер, Ф. Дайсон) и математики (Ф. Клейн, Д. Гильберт, Г. Минковский, Г. Вейль и др.), называя эту непостижимую эффективность математики в естественных науках чудом. В XIX в. пути физики и математики значительно разошлись, но когда новые физические теории нашли опору в уже развитых математических аппаратах (Теория тяготения – в римановой геометрии, Специальная теория относительности – в теории инвариантов группы Лоренца, Квантовая механика – в теории линейных самосопряженных операторов в гильбертовом пространстве), это вызвало восхищение и почтительные чувства у истинных ценителей эстетики в Науке.*

*Почувствительна в этом смысле история создания суперструнных теорий. Независимо друг от друга Дж. Венициано и М. Судзуки, перелистывая старые труды по математике, случайно натолкнулись на бета-функцию, вычисленную в прошлом веке Леонардом Эйлером. К своему удивлению они обнаружили, что эта бета-функция удовлетворяет почти всем жестким требованиям, предъявляемым к матрице амплитуд рассеяния (S-матрицы) для взаимодействия адронов, кроме унитарности.*

*Позже Намбу и Гото заметили, что за этими амплитудами рассеяния скрыта классическая релятивист-*

ская струна [67].

Вместе с тем, обратившись к героическим временам Кеплера, Галилея, Декарта и Ньютона, найдем в их сочинениях схожие мысли о математической сущности природы. Конечно, эта мысль восходит к кабалистической и пифагорейско-платоновской традициям. Средневековые схоласты считали, что Б-Г сотворил мир рационально. Это открывало путь изучения природы посредством поиска математических законов, лежащих в основании замыслов ТВОРЦА.

Стройная система Б-жественной «математичности» природы была развита Рене де Картом. Близких воззрений придерживался Иоганн Кеплер, продемонстрировав «непостижимую эффективность» геометрии конических сечений в астрономии. Галилей полагал, что Книга Природы написана Б-ГОМ на языке геометрии. Ньютон видел в законах физики Б-жественный план устройства мироздания. Лейбницу принадлежит формула «Как Б-Г вычисляет, так мир и делает». Позднее, во второй половине XVIII в. и в начале XIX в. происходит «вытеснение Б-ГА из физико-математических исследований Природы. Сначала в виде деизма (деизм – учение, признающее существование Б-ГА как безличной первопричины мира. С точки зрения деистов, мир, будучи сотворен однажды, предоставлен действию собственных законов. Эти взгляды разделяли Вольтер, Руссо, Лок), затем – агностицизма (учение, отрицающее возможность познания, корни которого уходят в древнегреческий скептицизм Пиррона; это учение получило классическое оформление в работах Юма и Канта и окончательно – в форме атеизма. И только теперь, на заре XXI в., мы отчетливо ощущаем, что отсутствие Б-ГА в корневой основе Науки грозит цивилизации самоуничтожением. Существование мира без Б-ГА становится злоецизм, этим безбожным миром управляют предательство, вероломство, насилие, ненависть и зависть.

14 декабря 1900 г. Макс Карл Эрнест Людвиг Планк (1858–1947, Германия) доложил Берлинскому физическому обществу о формуле, описывающей спектр излучения абсолютно черного тела, и о гипотезе парциального излучения света, приводящей к данной формуле, ознаменовавшей рождение квантовой физики. Ради этого Планку пришлось пожертвовать «здравым смыслом», базировавшимся на классических представлениях того времени. Для решения этой проблемы ему пришлось предположить, что свет поглощается и излучается веществом определенными порциями (квантами). Классическая физика, взращенная на возвышенном математическом аппарате дифференциального и интегрального анализа непрерывных функций, получила первый удар. Спектр излучения абсолютно твердого тела как раз и не укладывался в рамки устоявшейся парадигмы. Напротив, классические рассуждения приводили к абсурдному результату – безграничному росту энергии высокочастотных спектральных составляющих в спектре излучения нагретых тел (так называемая ультрафиолетовая катастрофа).

Введение прерывности в энергетический процесс выглядело настолько грубым и примитивным приемом по сравнению с изысканными методами интегрального и дифференциального анализа, что Планк долго не мог смириться со своими же нововведениями.

При решении проблемы описания спектра излучения абсолютно черного тела Планк положил, что в теле имеется огромное количество источников излучения электромагнитных волн. Каждый из этих источников излучает волну с частотой  $\nu$ . Энергия, переносимая такой волной, как положил Планк, равна

$$\varepsilon = \nu \hbar,$$

где  $\hbar$  – коэффициент пропорциональности (постоянная Планка). Ныне это одна из самых фундаментальных констант современной физики,  $\hbar = 1,05512 \cdot 10^{-34}$  Дж/Гц.

Однако, как предположил Планк, вероятность того, что в теле имеются источники электромагнитных волн с высокой частотой излучения, значительно меньше вероятности низкочастотных излучений. Поэтому в спектре излучения теплых тел высокочастотные составляющие представлены значительно слабее. Это и объясняет реальные спектры излучений нагретых тел, в которых высокочастотные составляющие значительно слабее низко- и средечастотных участков спектра.

Позже, в 1905 г., Эйнштейн, объясняя фотоэлектрический эффект, опираясь на идею Планка, предложил рассматривать свет не как суперпозицию волн, а как поток корпускул, или «квантов» – порций света.

Планк вполне оправдал свое имя, послужив планкой, переступив через которую Наука оказалась перед совершенно новой реальностью. Планк задал тон новой физике XX в. еще и тем, что в период 1901 – 1906 гг. он, опираясь на экспериментальные данные, помимо постоянной Планка получил постоянную Больцмана, число Авогадро, уточнил электрический заряд электрона.

Высокие моральные качества Макса Планка проявились в том, что именно он, глава европейской теоретиче-



Макс Планк

ской физики, заметил А. Эйнштейна. Планк способствовал его первым публикациям. По инициативе Планка и Эрнста Эйнштейну было предложено место члена Прусской Академии наук и директора Физического института в Берлине. Именно Планк назвал Эйнштейна «величайшим физиком нашего времени».

Воистину и сам Планк достоин не мене восторженных эпитетов.

Дискомфорт по отношению к квантовым воззрениям испытывали практически все создатели квантовой механики – принц Луи де Бройль, Эрвин Шредингер, Альберт Эйнштейн, Вернер Гейзенберг и др.

*Э. Шредингеру, автору основного уравнения квантовой механики, принадлежит следующее высказывание: «Если не удастся избавиться от этих скачков (квантов), то я вообще буду сожалеть, что занялся квантовой механикой».*

*Вернер Гейзенберг писал: «Математические формулы отображают теперь уже не Природу, а наше знание о Ней».*

Так или иначе, но все вышеперечисленные мыслители рассматривали квантовые методы как временные меры, свидетельствующие лишь о недостатке знаний о явлениях микромира и несовершенстве математического аппарата квантовых теорий. Действительно, слишком много необъяснимых экспериментальных фактов досталось на долю этому поколению ученых. Кроме проблем с эфиром и спектром излучения абсолютно черного тела оказалось, что на основании классических представлений невозможно построить теорию стабильного атома.

Согласно классическим представлениям электрон, движущийся вокруг ядра с центростремительным ускорением, неминуемо должен излучать электромагнитные волны, следовательно, терять энергию, что должно приводить к быстрому падению электрона на ядро, чего на самом деле не происходит – атомы, как известно, стабильны. Но еще более странно элементарные частицы вели себя при их рассеянии на кристаллических решетках твердых тел. Выяснилось, что в этих экспериментах элементарные частицы проявили некие волновые свойства.

Сначала, в 1927 г., К. Девиссон и Л. Джермер, а затем Джордж Пайджет Томсон и П. С. Татарковский открыли очень странное поведение элементарных частиц. При рассеянии электронов на монокристаллах четко фиксировалась интерференционная картина. Результаты этих экспериментов чудесным образом удалось описать на основании идеи Луи Виктора де Бройля (1892 – 1987).

Де Бройль, сопоставляя методы описания движения точечной материальной частицы и луча световой волны (эйконала), пришел к выводу, что оба явления описываются практически одними и теми же математическими формулами. По сути, эти формулы описывали линию в трехмерном пространстве, только в первом случае этой линией являлась траектория движения частицы, а во втором – луч световой волны. Формулы описания траектории движения свободной частицы и луча света в вакууме вытекали из одного более фундаментального принципа «Наименьшего действия», т. е. траектории движения частицы и луча света являются экстремалами практически одного и того же функционала действия. Данное обстоятельство натолкнуло де Бройля на мысль, что если волне присущи некие свойства частицы (т. е. корпускулярные свойства), то вполне возможно существование симметрии, т. е. движущейся частице должна соответствовать некая плоская волна (волна материи). Частота колебаний и длина этой волны прямо пропорциональны соответственно кинетической энергии и импульсу пробной элементарной частицы.

Если эйконал электромагнитной волны описывается выражением

$$\varphi = \exp\{i(\nu t + k r)\}, \quad (1.1)$$

где  $\nu$  и  $k$  – частота и волновой вектор электромагнитной волны,  $t$  – время,  $r$  – вектор, задающий направление ее распространения, то волна материи, по де Бройлю, описывается волновой функцией:

$$\psi = \exp\{i(Et + p r)/\hbar\}, \quad (1.2)$$

где  $E$  – кинетическая энергия частицы,  $p$  – ее импульс.

То, что результаты экспериментов по рассеянию элементарных частиц удалось объяснить с помощью волн материи де Бройля – это действительно чудо, т. к. это не результат детального исследования микроскопических процессов рассеяния частиц на кристаллических решетках, а просто феноменальное совпадение экспериментального факта и красивой идеи. Как бы там ни было, но именно это совпадение вдохновило Эрвина Шредингера к созданию волновой механики, а впоследствии – квантовой механики.

Следующее поколение физиков не испытывало ностальгии по «классическому прошлому», отбросив какие-либо «предубеждения», вооружившись лозунгом: «цель оправдывает средства», они принялись за создание квантовой механики. В 20-х гг. XX в., в Копенгагенском институте теоретической физики под руководством Нильса Бора собралось созвездие блестящих исследователей (Гейзенберг, Вейцеккер, Иордан и др.), исповедующих

идеи неопозитивизма. Суть этих идей сводится к следующему:

1. Критерием истинности является практика, потому любые методы хороши, если они позволяют обобщить и обосновать как можно большее число экспериментальных фактов. Даже если эти методы противоречат повседневному опыту.

2. Законы микромира вовсе не должны соответствовать нашему здравому смыслу, основанному на наблюдениях за макромиром.

*Развитию новых представлений способствовало еще одно обстоятельство. Усилиями Вольдемара Фогта, Хенрика Лоренца, Анри Пуанкаре, Френсиса Фицджеральда было установлено, что уравнения максвелловской электродинамики ковариантны относительно преобразований Лоренца (преобразованиями Лоренца они были названы Пуанкаре):*

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (1.3)$$

где  $v$  – скорость движения системы отсчета  $x', y', z', t'$  относительно оси  $x$  системы отсчета  $x, y, z, t$ .

Если бы максвелловская электродинамика и ньютоновская механика не были связаны между собой, то преобразования Лоренца лишь дополняли бы сведения о природе электромагнитных полей. Но поскольку частицы вещества обладают не только электрическим зарядом, но и инертной массой, вышеуказанные научные дисциплины оказались взаимосвязанными. Динамика заряженной частицы в электромагнитном поле описывается уравнением

$$ma = qE + [vH] \frac{q}{c}, \quad (1.4)$$

где  $m$  – масса,  $a$  – ускорение,  $q$  – заряд и  $v$  – скорость частицы,  $E$  – напряженность электрического поля,  $H$  – напряженность магнитного поля.

Таким образом, оказалось, что левая часть уравнения (1.4) ковариантна относительно преобразований Галилея, а правая часть – относительно преобразований Лоренца, что логически недопустимо. Поэтому возникла проблема преобразовать уравнение (1.4) таким образом, чтобы оно было полностью ковариантно по отношению к преобразованиям Лоренца.

С этой задачей блестяще справился Альберт Эйнштейн (Лоренц и Пуанкаре также были очень близки к ее решению). В специальной теории относительности Эйнштейн развил релятивистскую механику, уравнения которой ковариантны относительно преобразований типа (1.3). Причем при малых скоростях движения частиц релятивистская механика естественным образом переходила в ньютоновскую. В рамках релятивистской механики уравнение (1.4) принимает вид

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{mv_i}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right) = qv^i \left\{ \frac{dA_i}{dx^j} - \frac{dA_j}{dx^i} \right\}, \quad (1.5)$$

где  $A_i$  – компоненты 4-векторного потенциала;  $i, j = 0, 1, 2, 3$ .

Уравнение (1.5) полностью ковариантно относительно преобразований Лоренца и хорошо согласуется с экспериментальными данными. Столь удачное решение вышеформулированной задачи, по сути, явилось началом революционного переворота в представлениях о физической реальности.