

7. КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ ОПИСАНИЯ ПРИРОДЫ

Что изучает квантовая физика. Основные идеи и принципы квантовой механики: дискретность (квантование), корпускулярно-волновой дуализм, соотношение неопределенности и принцип дополнительности, волновая функция. Квантовая лестница. Элементарные частицы как глубинный уровень организации материи: элементарны ли элементарные частицы; типы фундаментальных взаимодействий и квантовые поля – поля и частицы; кварковая природа материи и единство сил природы.

Величайшим достижением человеческого гения является то, что человек может понять вещи, которые он уже не может вообразить.

Л. Ландау

В определенном смысле вся современная физика есть квантовая физика! Она, по сути дела, является итогом "новейшей революции в естествознании". Именно здесь произошло объединение диалектики и естествознания и родилась новая методология. Квантовая физика произвела переоценку роли динамических и статистических закономерностей в пользу статистических, изменила характер физических моделей, переосмыслила роль исследователя в изучаемом им мире, привела к отказу от многих привычных понятий и представлений, внесла радикальные изменения в стиль научного мышления, по крайней мере, в отношении познания природы. В. Вайскопф писал, что квантовая теория представляет такой плод человеческой мысли, который более всякого другого научного достижения углубил и расширил наше понимание мира.

7.1. Что изучает квантовая физика?

Прежде всего, *квантовая физика – это теория, описывающая свойства материи на уровне микроявлений*. Она исследует законы движения *квантовых объектов*, которые также называют **микрообъектами**.

Понятие микрообъекта является одним из основных в квантовой физике. К ним относятся молекулы, атомы, атомные ядра, элементарные частицы. Их характерная особенность – очень маленькие размеры – 10^{-8} см и меньше. К наиболее важным характеристикам микрообъектов относят *массу покоя* и *электрический заряд*. Масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-28}$ г, протон имеет массу

$1836m_e$, нейтрон – $1839m_e$, мюон – $207m_e$. Фотон и нейтрино не имеют массы покоя – она равна нулю. Величина электрического заряда любого микрообъекта кратна величине заряда электрона, равного $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Наряду с заряженными существуют нейтральные микрообъекты, заряд которых равен нулю. Электрический заряд сложного микрообъекта равен алгебраической сумме зарядов составляющих его частиц. Одной из важнейших специфических характеристик микрообъектов считается **спин** (от английского слова “вращаться”). Хотя спин интерпретируется как момент импульса микрообъекта, не связанный с его движением как целого, неуничтожаемый и не зависящий от внешних условий, но нельзя представлять его как вращающийся волчок. Он имеет чисто квантовую природу – аналогов в классической физике ему нет. Наличие спина вносит существенные особенности в поведение объектов микромира.

Большинство микрообъектов являются **нестабильными** – они *самопроизвольно*, без каких-либо воздействий со стороны *распадаются*, превращаясь в другие, в том числе и элементарные, частицы. Нестабильность – это *специфическое*, но не обязательное свойство микрообъектов. Наряду с нестабильными, существуют и **стабильные** микрообъекты: *фотон, электрон, протон, нейтрино, стабильные атомные ядра, атомы и молекулы в основном состоянии*.

Квантовая физика – это еще *теоретическая основа современного учения о структуре и свойствах вещества и поля*. По сравнению с классической физикой она рассматривает материю на более глубоком и фундаментальном уровне. Она позволяет объяснить многие “почему”, которые в классической физике принципиально невозможно понять. Например, почему атомы являются устойчивыми структурами и достаточно механически прочными; почему атомы одинакового сорта невозможно различить и т.д.

Квантовая теория дает возможность рассчитать *физические характеристики вещества*. Известный физик У. Лэмб называл квантовую физику наукой, которая обеспечивает нас удивительным набором правил расчета определенных физических свойств вещества. По сути дела, *квантовая теория образует язык*, с помощью которого мы описываем наши опыты и результаты при изучении микромира, *более общий*, чем классическая теория. При этом важно понимать, что квантовая физика не отменяет класси-

ческую, а содержит ее как свой *предельный случай*. При переходе от микрообъектов к обычным макроскопическим объектам ее законы становятся классическими, и, таким образом, квантовая физика установила пределы применимости классической физики. Переход от классической физики к квантовой есть переход к более глубокому уровню рассмотрения материи.

Процессы, происходящие в микромире, относятся к явлениям, почти полностью лежащими *за пределами чувственных восприятий*. Поэтому понятия, которыми оперирует квантовая теория, и явления, которые она рассматривает, **лишены наглядности**, присущей классической физике. При становлении квантовой теории были пересмотрены такие, казалось бы, очевидные и привычные представления о частицах и волнах, о дискретном и непрерывном, о статистическом (вероятностном) и динамическом описании. Квантовая физика стала важнейшим шагом в построении современной физической картины мира. Она позволила предсказать и объяснить огромное число различных явлений – от процессов, протекающих в атомах и атомных ядрах, до макроскопических эффектов в твердых телах; без нее невозможно, как представляется теперь, понять происхождение Вселенной. Диапазон квантовой физики широк – от элементарных частиц до космических объектов. Без квантовой физики немыслимо не только естествознание, но и современная техника.

Квантовая физика состоит из многих разделов, которые, вообще говоря, самостоятельны, но грани между ними весьма размыты. Фундамент квантовой физики составляет *квантовая механика*, изучающая законы движения микрообъектов, скорости которых много меньше скорости света (нерелятивистская квантовая механика), строение и свойства атомов и молекул. Другой раздел, развитый наиболее полно – *квантовая электродинамика*, изучает взаимодействие электронов и фотонов (света). Следующий раздел – *квантовая теория поля*, которая соединяет в себе идеи квантовой механики и теории относительности (релятивистская квантовая механика), – один из удивительных и сложных разделов физики. Самым современным разделом является *квантовая хромодинамика*, изучающая кварковую структуру элементарных частиц и т.п.

Квантовая механика также составляет основу многих других разделов физики, таких как квантовая химия, квантовая теория

твёрдого тела, квантовая электроника, теория атомного ядра и др. Она служит теоретической базой материаловедения, электроники, атомной энергетики, лазерной техники – разделов, которые определяют современный научно-технический прогресс.

7.2. Основные идеи и принципы квантовой механики

7.2.1. Дискретность (квантование)

Дискретность в физику введена давно. В частности, она отражает идею атомно-молекулярного строения вещества. Квантовая физика существенно расширила представление о дискретности и ее роли в физике. Сущность **идеи квантования** состоит в следующем: *некоторые физические величины, описывающие микрообъект, в определенных условиях принимают только дискретные значения.* Сначала дискретность была распространена на электромагнитные волны.

1. *Свет излучается прерывистыми порциями (квантами), энергия которых определяется формулой $\Delta E = h\nu$, где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка (квант действия), ν – частота света.* Эту идею выдвинул М. Планк в 1900 г., чтобы объяснить законы теплового излучения. Но при этом он считал, что *излучение прерывисто, а поглощение непрерывно.*

2. В 1905 г. А. Эйнштейн распространил **идею дискретности** и на процессы поглощения, чтобы объяснить загадки *фотоэффекта*: существование красной границы и зависимость энергии фотоэлектрона от частоты, а не от интенсивности. Согласно Эйнштейну электроны вещества поглощают свет также порциями с энергией $h\nu$, как и при излучении. Впоследствии квант света с энергией $h\nu$ назвали *фотоном*. Наряду с энергией фотоны переносят импульс $h\nu/c = hk/2\pi$ ($k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны). Более того, *свет не только поглощается и испускается отдельными порциями, но и состоит из них.* Это было смелое и нетривиальное обобщение. Например, мы всегда воду пьем глотками (можно сказать, порциями), но это не значит, что вода состоит из отдельных глотков. По этому поводу А.Эйнштейн образно говорил, что если пиво продают в бутылках, содержащих пинту, отсюда вовсе не следует, что пиво состоит из неделимых частей, равных пинте.

По теории Эйнштейна *электромагнитная волна* выглядит как

поток квантов (фотонов). Но, говоря о корпускулярных свойствах света, не нужно представлять фотоны как классические частицы-шарики. С точки зрения квантовой физики свет не бывает ни потоком классических частиц, ни классической волной, хотя в различных условиях он проявляет признаки либо того, либо другого. Позднее поняли, что существование наименьшего значения энергии $h\nu$ есть общее свойство любых колебательных процессов.

В 1920-х годах было получено прямое доказательство существования фотонов. Прежде всего это проявилось в *эффекте Комптона* – упругом рассеянии рентгеновского излучения на свободных электронах, в результате чего происходит увеличение длины волны. Это явление объясняется только на языке фотонов. Возник парадокс: что такое свет – частица или волна? В 1951 г. А. Эйнштейн писал, что после 50 лет раздумий он так и не смог приблизиться к ответу на вопрос, что же такое световой квант.

3. *Квантуется энергия любого микрообъекта, помещенного в ограниченное пространство*, например, электрона в атоме. Но энергия свободно движущегося электрона не квантуется. *Квантование означает, что электрон в атоме может иметь лишь некоторый дискретный набор ее значений*. Каждое значение энергии называют *энергетическим уровнем* или *стационарным состоянием*. Находясь в этих *стационарных состояниях*, электроны не излучают фотоны. Переходы между уровнями называют *квантовыми переходами* или *квантовыми скачками*. При каждом таком переходе испускается или поглощается один *квант света (фотон)* с энергией $h\nu = E_n - E_s$ ($n > s$), где $E_{n,s}$ – энергии уровней. Это утверждение называют *правилом частот Бора*.

Идея квантования энергии электрона в атоме была введена Н. Бором для объяснения загадочной устойчивости атомов. Правила квантования, введенные Бором, считаются одними из удивительных явлений в истории науки. А.Эйнштейн по этому поводу как-то сказал, что только гениальным озарением можно объяснить появление этой теории до того, как выяснились волновые свойства частиц. “Это высшая музыкальность в области теоретической физики”.

Дискретность не есть результат некоего механизма взаимодействия света с веществом – это *неотъемлемое свойство самого излучения*. Частота испускаемого излучения не зависит от часто-

ты вращения электрона по орбите, а определяется разностью энергий соответствующих уровней, что и отражает *дискретность процесса излучения и поглощения света атомом*. Вместо непрерывного, требующего какого-то времени процесса испускания или поглощения электромагнитной волны, происходит *мгновенный акт рождения или уничтожения фотона*, при этом *состояние атома скачкообразно меняется*. Этим правилом частот объясняется не только линейчатый характер атомных спектров, но и все наблюдаемые закономерности в структуре этих спектров.

Дискретность есть главная особенность явлений, происходящих на уровне микромира. Здесь бессмысленно как угодно слабо воздействовать на квантовую систему (микрообъект), поскольку до определенного момента она этого не чувствует. Но если система готова его воспринять, она скачком переходит в новое квантовое состояние. Поэтому нет смысла беспредельно уточнять наши сведения о квантовой системе – они разрушаются, как правило, сразу же после первого измерения.

7.2.2. Корпускулярно-волновой дуализм

Развитие фотонных представлений о свете привело к признанию в начале 20-х годов XX в. *идеи корпускулярно-волнового дуализма для электромагнитного излучения* (дуализм – двуединость, двойственность, дополнительность). Согласно этой идее волне с частотой ν и волновым вектором \vec{k} ($k = 2\pi/\lambda$) можно сопоставить поток фотонов с энергией $E = h\nu$ и импульсом $p = h\nu/c = E/c$. Другими словами, *свет имеет двойственную природу* – он может проявлять свойства как *волны*, например, в эффектах интерференции и дифракции, так и *частицы* (фотоэффект и др.). *Наглядный образ такой волны-частицы составить не удастся*, хотя отдельно волну или отдельно частицу мы легко себе представляем: частица – это нечто неделимое, локализованное, находится в точке; волна – “размазана” по пространству. В обычном (классическом) понимании волны и частицы друг к другу не сводятся.

В 1924 г. Луи де Бройль распространил идею корпускулярно-волнового дуализма на все микрообъекты. *Любому микрообъекту он сопоставил, с одной стороны, корпускулярные характеристики (энергию E и импульс p), а с другой – волновые (частоту ν или длину волны λ) и волновое число k* . Необычность

этой идеи состоит в том, что теперь, например, *электрону*, который всегда был известен как элементарная частица вещества, приписывают еще и *волновые свойства*, в частности, длину волны $\lambda_B = h/p = h/mv$, которую называют *дебройлевской длиной волны* электрона. В отличие от света, для электронов и других микрообъектов (нерелятивистских) с конечной массой покоя зависимость между энергией и импульсом имеет вид $E = p^2/2m$. Эти волны де Бройль назвал "*волнами материи*", а для их математического описания ввел *волновую функцию*, которая описывает их поведение в пространстве и времени. Сама эта волна не несет энергии, а только отображает некий периодический процесс в пространстве и времени. Волны материи, связанные с частицами, непохожи на обычные волны, например, те, которые распространяются по воде. Это просто некие абстрактные математические функции.

Оценим длину волны электрона с энергией $E = 10$ эВ. Так как $E = m_e v^2/2$, а $p = m_e v$, то $p = \sqrt{2m_e E}$ и $\lambda_B = h/\sqrt{2m_e E} = 6,62 \cdot 10^{-34} / (2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}) = 3,88 \cdot 10^{-11}$ м = 0,388 нм. Обратим внимание, что полученное значение длины волны сравнимо с размером атома.

В 1927 г. была обнаружена дифракция электронов (К. Дэвиссон и Л. Джермер, У. Томпсон): пучок свободных электронов дифрагировал на кристаллической решетке мишени, и на экране наблюдалась характерная картина дифракционных колец, подобных наблюдаемым при дифракции света. Эти опыты доказали существование волн материи и подтвердили формулу де Бройля.

Таким образом, **вещество и свет могут проявлять как волновые свойства, так и свойства частиц**. Длина волны де Бройля обратно пропорциональна массе микрообъекта, поэтому чем больше микрообъект, тем меньше эта длина волны. Для атомов и молекул дебройлевская длина волны существенно меньше, чем для электрона, и поэтому их волновые свойства проявляются заметно слабее. Однако явления дифракции и интерференции наблюдали также и для атомных, и для молекулярных пучков, что доказывает наличие волновых свойств у атомов и молекул. За последние 10–20 лет с помощью лазеров научились управлять движением атомных пучков, например, охлаждать их до температуры, близкой к абсолютному нулю, "заставлять" их дифрагировать и интерферировать.

Итак, идея квантово-волнового дуализма отражает *потенциальную способность микрообъекта* проявлять различные свойства в зависимости от тех или иных внешних условий. В одних условиях он ведет себя как волна, в других – как частица. Но как выглядит микрообъект, никто не знает, потому что, к сожалению, построить *его наглядную модель невозможно*.

Идея квантования вводит дискретность, а для ее описания требуется определенная мера, роль которой и играет *постоянная Планка*. Она определяет *"границу" между микро- и макроявлениями* и представляет шаг квантования. С другой стороны, *постоянная Планка органически связана с идеей дуализма*, так как она осуществляет *"связь" между корпускулярными* (энергия и импульс) и *волновыми* (частота и волновой вектор) характеристиками: $E = \hbar\omega$, $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ ($\hbar = h/2\pi$). Тот факт, что постоянная Планка играет эти две роли, указывает на **единство** этих двух основополагающих идей квантовой механики. Постоянная Планка играет фундаментальную роль в физике. Эта размерная константа позволяет количественно оценить, насколько при описании каждой конкретной физической системы существенны квантовые эффекты. Когда по условиям задачи ее можно считать пренебрежимо малой, достаточно классического (не квантового) описания.

7.2.3. Соотношение неопределенности и принцип дополнительности

Огромную роль в квантовой физике играет *принцип дополнительности* и *соотношение неопределенности*. Последнее является количественным воплощением общей **идеи дополнительности**. В. Гейзенберг, анализируя возможности одновременного измерения координаты и импульса электрона, пришел к заключению, что условия, *благоприятные для измерения его местоположения, т.е. координаты, затрудняют измерение импульса*, и наоборот. Другими словами, *чем точнее мы определяем местоположение микрообъекта, тем менее точными становятся сведения об импульсе (скорости)*. Сама природа как бы накладывает ограничения на понятия координаты и импульса принципиальные ограничения, которых нет в классической физике.

В этом смысле, говорят, что *понятия координаты и импульса дополнительны друг к другу*. Чтобы понять суть этого утверждения, рассмотрим следующий *мысленный эксперимент* по измере-

нию координаты электрона. Чтобы определить положение электрона, нужно осветить его или посмотреть в "микроскоп". Такой способ дает неопределенность измерения координаты порядка длины волны используемого света: $\Delta q = \lambda$. Для уточнения положения электрона надо брать свет все с меньшей длиной волны. Но при взаимодействии с электроном свет передает ему импульс. Минимальный переданный импульс будет, когда используют всего один фотон. Его величина приблизительно равна импульсу фотона $p_\gamma = h/\lambda$, поэтому неопределенность импульса $\Delta p > h/\lambda$. Комбинируя эти две неопределенности, получаем, что $\Delta q \Delta p > h$. Это и есть **соотношение неопределенностей Гейзенберга**.

Существует другой способ измерения координаты электрона. Для этого пропускают пучок электронов через отверстие в экране, за которым устанавливают еще один экран, где электроны регистрируются. На нем появится пятно с размытыми краями. Это обусловлено дифракцией, так как электроны обладают свойствами волны, т.е. электрон отклоняется от прежнего направления после прохождения отверстия, а это означает, что он получил импульс отдачи в поперечном направлении. Анализ этого и других мысленных экспериментов приводит к выводу о **невозможности выполнения некоторых измерений одновременно**, который математически описывается соотношением Гейзенберга. Последнее означает больше, чем простое техническое ограничение, которое в один прекрасный день может быть преодолено с помощью хитроумного оборудования. Дело тут не в приборах, не в неумении ставить эксперименты, дело в самой природе вещей: *сам процесс измерения оказывает влияние на состояние микрообъекта*. И это влияние никаким образом исключить невозможно, так как измерительные приборы являются макросистемами, которые описываются классическими понятиями, а заменить их просто нечем. Измерительные приборы представляют собой как бы продолжение наших органов чувств, они служат посредниками между исследуемым миром и нами. Квантовая механика позволяет найти *связь между микромиром*, который мы пытаемся *наблюдать*, и *макромиром*, к которому принадлежим мы сами вместе с нашими измерительными приборами.

До сих пор мы говорили о неопределенностях, которые возникают в акте измерения. В этом случае система не может считаться изолированной, так как она взаимодействует с другой си-

стемой, играющей роль измерительного прибора. Показано, что *соотношение неопределенности имеет место и в замкнутой изолированной системе*. Например, в основном состоянии атома водорода расчет дает интервал возможных значений координаты электрона, который связан с интервалом возможных значений импульса тем же соотношением $\Delta q \Delta p > h$. Применим это соотношение к электрону в атоме. Скорость электрона при движении вокруг ядра $v \approx 10^6$ м/с, поэтому максимально допустимая неопределенность скорости не должна превышать самой скорости. Пусть $\Delta p = m_e v$. Тогда из соотношения неопределенности находим $\Delta q = h/m_e v = 6,63 \cdot 10^{-34} / 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 10^6 = 7 \cdot 10^{-10}$ м, т.е. неопределенность в координате имеет величину, сравнимую с размером атома. Поэтому мы не можем точно указать, где в атоме находится электрон. Образно можно сказать, что электрон как бы “размазан” по всему объему атома в виде пульсирующего облака. Именно поэтому *мы не можем говорить об орбите электрона в атоме, не можем использовать понятие траектории*, широко используемое в классической физике.

Соотношение неопределенностей для координаты и импульса – частный случай и конкретное выражение **общего принципа дополненности**, сформулированного Н. Бором в 1927 г. Для понимания соотношения между такими парными понятиями классической физики Н. Бор ввел понятие “**дополненность**”. Он рассматривал *картину частицы и картину волны* в качестве *дополняющих описаний одной и той же реальности*, каждая из которых истинна лишь частично и имеет ограниченное применение. *Для полного описания атомной действительности необходимы два образа, но их применение ограничено принципом неопределенности*. Принцип дополненности связан не с формой, а с содержанием квантовой теории, с тем, как устроен мир.

Квантовый объект – это и не частица, и не волна, и даже ни то и ни другое одновременно вместе. Можно сказать, что это нечто третье, не равное простой сумме свойств волны и частицы. Оно не дано нам в ощущениях, но, тем не менее, реально существует. Это есть то, что называют *квантовой реальностью*. Два дополнительных свойства такой реальности нельзя разделить, не разрушив при этом полноту и единство явлений природы. *Соотношение неопределенности является следствием двойственной природы атомных объектов* – природа сама на-

кладывает принципиальные ограничения на понятия координаты и импульса частицы. В классической физике этого ограничения нет из-за малости постоянной Планка.

Понятия “состояние” и “наблюдение” в микромире – дополнительные понятия. Взятые по отдельности, они неполны, их можно определить только совместно. Они не существуют порознь, так как мы наблюдаем не вообще нечто, а обязательно какое-то состояние в каких-то определенных условиях. С другой стороны, всякое состояние является “вещью в себе”, пока мы не найдем способа его измерения. Это означает, что *состояние системы зависит от способа наблюдения*. Так, при исследовании электронов с помощью “дифракционной решетки” он предстает как волна (проявляет свойства волны), а в камере Вильсона – как частица.

Понятия “частица”, “волна”, “состояние”, “наблюдение системы” – это некоторые идеализации, не имеющие отношения непосредственно к тому, что называют микромиром. Но они необходимы для его понимания. Простые физические картины восприятия действительности дополнительные в том смысле, что в случае их использования для описания квантовых явлений необходимо и то и другое, т.е. их гармоничное слияние. В рамках привычной логики они существуют без противоречий, но при описании микромира по отдельности область их применимости ограничена.

Двойственность микрообъектов, их природа требуют разных описаний, *дополняющих, а не исключающих друг друга*, потому что мир богаче, чем можно выразить на любом одном языке. Разъясняя сущность принципа дополнительности, Л. Розенфельд говорил, что возможности музыки не исчерпываются последовательными стилизациями от Баха до Шенберга. Равным счетом *мы не можем на одном языке описать различные аспекты нашего опыта – реальности*.

Понятие дополнительности прочно заняло свое место в мировоззрении современной физики. Бор часто высказывал предположение относительно того, что это понятие может найти хорошее применение и за ее пределами. В последние десятилетия многие области знания стали заимствовать опыт создания разных картин одного события или объекта, которые дополняли бы друг друга. Доклады о принципе дополнительности делают на конференциях психологов, биологов, историков; появляются работы, в которых обосновывается применение взаимоисключающих “дополнительных” классов понятий в литературоведении. Сама литература

давно демонстрирует нам применение "принципа дополнительности" при описании людей. Сложный мир шекспировских героев, внутренняя противоречивость героев Достоевского – все это демонстрация *многостороннего подхода* к человеку. Люди всегда выглядят по-разному для разных наблюдателей, они по-разному проявляют себя в разных условиях. Это ли не подтверждение принципа дополнительности?

Принцип дополнительности позволяет примирить, казалось бы, непримиримое: ведь электрон проявляет себя в разных экспериментах то волной, то частицей. Квантовая механика осуществляет **синтез** этих понятий и дает возможность предсказать исход любого эксперимента, в котором проявляются или корпускулярные, или волновые свойства частиц. *Физическая картина явления и его математическое описание дополнительны*. Создание физической картины требует пренебрежения деталями и уводит от математической точности. И наоборот, попытка точного описания явления затрудняет ясное понимание. На вопрос "Что дополнительно понятию истины?" Бор отвечал: "Ясность". В. Гейзенберг писал, что если размышлять об опытных данных современной физики, то приходишь к выводу, что всегда должна быть принципиальная дополнительность между размышлением и решением.

Соотношение неопределенности объясняет, почему атом находится в основном состоянии неограниченно долго, не излучает и не "падает" на ядро, как это предсказывает классическая электродинамика. Действительно, падение на ядро означало бы уменьшение неопределенности координаты электрона, так как ядро меньше атома. Если до падения на ядро электрон локализован в пределах атома (в области пространстве диаметром около 10^{-10} м), то после падения он должен был бы локализоваться в области 10^{-14} м (размер ядра). Это должно привести к размытию импульса – при падении на ядро средний импульс должен возрасти, для чего требуется энергия. Можно показать, что для этого необходимо 10^9 эВ, что в 100 раз превышает энергию связи нуклонов в ядре. Значит, нельзя заставить электрон локализоваться внутри атомного ядра. Отсюда также следует, что электроны не могут входить в состав атомного ядра. Этим же объясняется и механическая прочность атомов. При сжатии атомы не разрушаются, потому что электроны реагируют на пространственные ограничения увеличением скорости своего движения, тем самым увеличивая "жесткость" системы

(как и в случае вращающегося пропеллера).

Атомные явления представляют намного более "сложную" реальность, чем та, с которой мы привыкли сталкиваться в классической макроскопической физике. Чувствительность объекта к вмешательству приборов демонстрирует свойства, которые не наблюдают у макроскопических тел. Это означает, что *нельзя описывать микрочастицу обособленно от процесса наблюдения*. Можно говорить о природе атома, лишь правильно описывая то, что происходит с ним при различных способах наблюдения и с учетом тех приборов, которые используются. Это говорит о *принципиальной взаимосвязи всех явлений природы*. В классической физике измерения можно проводить таким образом, что они практически не влияют на исследуемое явление. Поэтому явления протекают точно так же, как и без вмешательства приборов. **В микромире принципиально невозможно исключить влияние процесса наблюдения на состояние квантовой системы.**

Фундаментальное значение *соотношения неопределенности* заключается в том, что оно описывает *ограниченность наших классических представлений*. Каждый физический эксперимент должен быть описан в понятиях классической физики. Эти понятия образуют язык, с помощью которого мы описываем наши опыты и результаты. Их ничем заменить нельзя, а применимость их ограничена соотношением неопределенности. Но *соотношение неопределенности не ставит никакого предела познанию мира, а только указывает, насколько применимы к нему понятия классической физики*. Поэтому мы не можем построить наглядную модель, используя язык классической физики, которая была бы адекватна микромиру.

7.2.4. Волновая функция

В 1926 г. Э.Шредингер обобщил идею де Бройля на случай, когда электрон движется не в свободном пространстве, а находится в кулоновском поле ядра. Он получил уравнение для волновой функции, описывающей волновые свойства микрочастиц. Это уравнение теперь называют *уравнением Шредингера*. В свободном пространстве оно описывает волновой процесс с постоянной длиной волны де Бройля. Во внешнем поле длина волны изменяется от точки к точке, то же происходит с импульсом.

Но самым интересным оказалось то, что решение уравнения

Шредингера для атома водорода получается в согласии с правилами квантования Бора. Стационарное состояние электрона в атоме водорода есть стоячая волна, описываемая волновой функцией, которая возникает, когда в области движения электрона укладывается целое число длин волн де Бройля. Такие волны всегда возникают, когда они находятся в ограниченном пространстве, как, например, упругие колебания гитарной струны. Стоячая волна переходит сама в себя (она как бы замкнута сама на себя) и поэтому не уходит из ограниченной области пространства. В этом и состоит смысл правил квантования Бора.

В квантовой физике *волновая функция* является важнейшим понятием. Поэтому очень важно представлять ее физический смысл. В классической физике волна – распространение колебаний материи в пространстве. Эти колебания можно обнаружить во всех точках, до которых она успела дойти. Волны де Бройля совсем не похожи на такие классические волны. Рассмотрим мысленный опыт: пучок электронов падает на экран с двумя щелями, за которым расположена фотопластинка. Электрон, попав на нее, оставит "пятнышко", и его координата определится положением этого пятна. Пусть электроны по одному пропускаются через щели. От каждого электрона на фотопластинке возникает пятнышко. Сначала кажется, что они появляются беспорядочно (случайным образом) одно за другим. Однако когда их станет много, образуется характерная дифракционная картина, как если бы на щелях дифрагировали световые волны с соответствующей длиной волны.

При прохождении электрона через щели пятно почернения на фотопластинке имеет случайное положение, большая же совокупность таких актов приводит к результатам, для объяснения которых электронам следует приписать волновые свойства. Нерегулярность появления пятен на фотопластинке (при одинаковых физических условиях прохождения через щели для всех электронов) показывает, что их движение определяется *вероятностными законами*. Анализ этого и подобных ему экспериментов привел М. Борна к следующему выводу: *по волновому закону изменяется волновая функция $\Psi(x, y, z, t)$ (ее часто называют амплитудой вероятности), которая является комплексной функцией. Квадрат модуля волновой функции есть вероятность наблюдения события в данной точке.*

Говорят, что волновая функция в квантовой механике выступа-

ет как основной носитель информации о корпускулярных и волновых свойствах системы. Тем самым она играет первостепенную роль – с ее помощью описывают *состояние квантовой системы*. *Волновая функция дает максимально полное описание состояния микроскопической системы*, т.е. если мы знаем волновую функцию квантовой системы, то знаем о ней все. Она заменяет классическое состояние, которое задается координатами и скоростями. А уравнение Шредингера, описывающее эволюцию волновой функции, – основное уравнение квантовой механики, заменяет уравнения Ньютона в классической физике. Оно позволяет определить волновую функцию для любого последующего момента времени, если она известна в некоторый момент t_0 . Знание волновой функции позволяет определить физические величины, которые являются объектами экспериментального исследования.

Волновая функция описывает не волны материи, а волны вероятности. Вероятностная трактовка волновой функции отражает присущие микрообъектам элементы случайного в их поведении. Необходимой оказывается лишь вероятность поведения микрообъекта. Это означает, что *предсказания в квантовой механике имеют вероятностный характер, а физика микрообъектов – принципиально статистическая теория*. Описание системы с помощью волновой функции является вероятностным, но эволюция волновой функции со временем носит строго динамический характер.

Рассмотрим примеры волновых функций. Для свободного электрона волновая функция имеет вид $\Psi = \exp[-i(Et - pz)/\hbar]$, т.е. это плоская волна (E , p , z – энергия, импульс и координата электрона). Но не следует думать, что свободный электрон "размазан" по огромной области: в действительности это означает, что хотя электрон и является частицей, вероятность обнаружить его в любой из точек пространства всюду одинакова. Квантовая теория связывает свойства вероятности со свойствами соответствующих частиц, соотнося амплитуду волны в определенной точке с вероятностью существования в этой точке частицы. Если амплитуда большая, то и вероятность того, что частица находится в данной точке, также велика; если нет – вероятность мала. Если амплитуда одинакова в некоторой области пространства, то частица может с равной вероятностью находиться в любой точке волны. Не надо думать, что частица с большей вероятностью находится в области

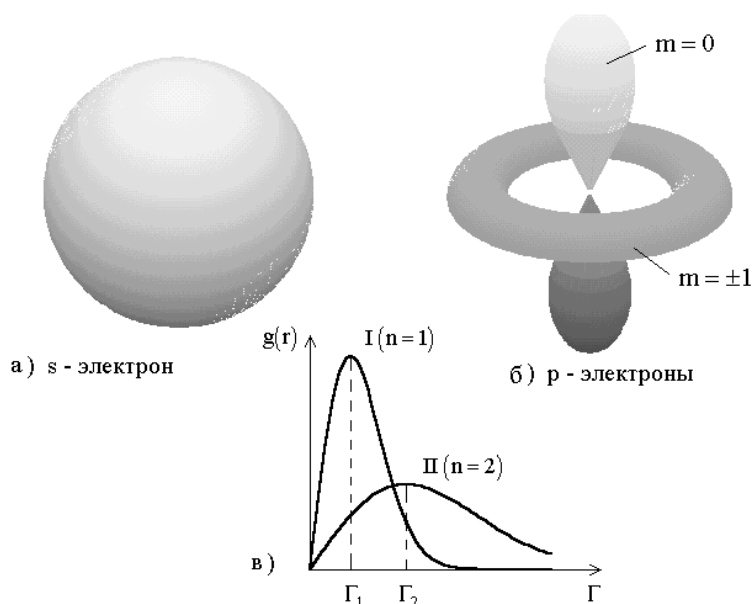


Рис. 7.1. Примеры волновых функций электрона в атоме водорода (а,б) и радиальное распределение вероятностей для двух энергетических состояний электрона в атоме (в)

гребня и с меньшей – в области впадины. Атомная частица может существовать в разных точках с определенной вероятностью и, таким образом, представляет собой странную разновидность физической реальности, нечто среднее между существованием и несуществованием. Частица не находится в определенной точке и не отсутствует там, она не перемещается и не покоится. Изменяется только вероятность, т.е. тенденция частицы находиться в определенных точках.

Другой пример – электрон в атоме водорода. Его состояние описывается волновой функцией, которая находится из решения уравнения Шредингера. Она имеет вид $\psi_{nlm}(r, \theta, \phi)$, где r, θ, ϕ – сферические координаты; m, l, n – квантовые числа, $n=1, 2, 3, \dots$ – главное квантовое число, $l = 0, 1, \dots, n-1$ – орбитальное квантовое число, $m = -l, -l+1, \dots, l-1, l$ – магнитное квантовое число. Числа n и l описывают энергию электрона в атоме, которая принимает дискретный набор значений. При $l = 0$ энергия n -го уровня равна $E_n = -me^4/2\hbar^2 n^2$.

Волновая функция атома водорода в состоянии с наименьшей энергией $n = 1, l = 0, m = 0$ имеет простой вид: $\psi_{100} \sim \exp(r/a)$, $a = 5,3 \cdot 10^{-10}$ м – боровский радиус, определяющий наиболее вероятное расстояние электрона от ядра. Отсюда видно, что, во-первых, это состояние является сферически симметричным, а во-вторых, если атом находится в состоянии с наименьшей энергией,

то амплитуда вероятности, что электрон будет обнаружен в каком-то месте, экспоненциально падает с ростом расстояния от протона. Вероятнее всего электрон встретить вблизи ядра атома.

Плотность вероятности найти электрон в точке с координатами r, θ, ϕ есть $\rho(r, \theta, \phi) = |\psi_{nlm}(r, \theta, \phi)|^2$. При образном представлении вместо электронной орбиты теперь рассматривается своеобразное "электронное облако", плотность которого в разных точках вокруг атомного ядра пропорциональна функции $\rho(r, \theta, \phi)$. Но не следует это понимать буквально, потому что в действительности электрон не размазан, а с определенной вероятностью находится в определенном месте – там, где вероятность больше, он находится чаще.

На рис. 7.1а и б показано несколько таких "облаков" для $l=0$ и $l=1$, а на рис. 7.1в – радиальное распределение вероятности для двух состояний электрона в атоме. Видно, что никаких скачков в трехмерном пространстве электрон не совершает. Скачком изменяется только энергия. Электрон может с определенной вероятностью перейти из одного состояния в другое, излучая или поглощая при этом энергию.

С точки зрения квантовой механики нельзя говорить, что электрон вращается где-то около ядра, электрон может находиться всюду, но в некоторых областях вероятность найти электрон намного больше, чем в остальных. Интересно отметить удивительное совпадение: максимуму вероятности соответствуют области, которые называют боровскими орбитами, именно здесь электрон находится чаще всего. Тем не менее понятие боровских орбит в квантовой физике является нефизичным, хотя и удобным при образном представлении электрона в атоме.

При нормальных условиях атом всегда находится в *состоянии с наименьшей энергией*, которое называют *основным состоянием атома*; все остальные состояния называют *возбужденными*. Все атомы, имеющие одинаковое число электронов, характеризуются одинаковыми очертаниями замкнутых "электронных" волн и одинаковыми расстояниями между ними. Поэтому *два одинаковых атома абсолютно идентичны* или *тождественны*. Это относится не только к атомам. Тождественные частицы обладают одинаковыми физическими свойствами: массой, зарядом, спином и другими внутренними характеристиками. Например, все электроны Вселенной считаются тождественными. *Тождественные частицы принципиально неразличимы* – это чисто квантовое явление.

Они подчиняются **принципу тождественности** – фундаментальному принципу, согласно которому *состояния системы частиц, получающиеся друг из друга перестановкой тождественных частиц местами, нельзя различить ни в каком эксперименте*. Такие состояния должны рассматриваться как одно физическое состояние. Принцип тождественности – один из основных отличий между классической и квантовой механикой. В классической механике всегда можно проследить за движением отдельных частиц по траекториям и таким образом отличить одну частицу от другой. В квантовой механике тождественные частицы полностью лишены индивидуальности. Из принципа тождественности следует, что для тождественных частиц в природе реализуется два класса волновых функций: *симметричные волновые функции*, которые не изменяются при перестановке пространственных и спиновых координат любой пары тождественных точек, и *антисимметричные волновые функции*, которые изменяют свой знак на противоположный при аналогичных перестановках.

Предсказания квантовой механики дают не *однозначный* ответ, а лишь *вероятность* того или иного результата. Эта неоднозначность противоречит детерминированности классической физики. В квантовой механике задать координаты и скорости всех частиц невозможно. Самое большое, что можно сделать, – задать в начальный момент волновую функцию. *Волновая функция есть максимально полное описание состояния микрообъекта*. Она заменяет классическое состояние, которое задается координатами и скоростями. Квантовая механика позволяет однозначно найти волновую функцию в любой более поздний момент времени. Причинность в лапласовском смысле нарушается, но в более точном квантово-механическом понимании она соблюдается. *Вероятностную причинность* понимают так: *из максимально полного определенного начального состояния следует единственно возможное конечное состояние*.

Главное открытие квантовой механики – *вероятностный характер законов микромира*. Вероятностное описание явлений до квантовой механики возникало в сложных системах, где малое изменение начальных условий приводит за достаточно большое время к сильному изменению состояния, хотя эти системы описываются строго однозначными уравнениями классической механики. Здесь вероятность появляется при усреднении по начальным

состояниям. В квантовой физике вероятностное описание имеет место для простых (одиночных) систем и не требует усреднения начальных условий.

Причина вероятностного описания предсказаний в том, что *свойства микрообъектов нельзя изучать, отвлекаясь от способа наблюдения*. Акт наблюдения в квантовой физике не является побочным обстоятельством, а есть средство получения информации. При этом наблюдатель весьма основательно вмешивается в микромир. *Наблюдение вызывает определенное изменение в физической системе*. Стоит только "взглянуть" на атом, как тот совершает характерный переход, не воспроизводимый обычным физическим воздействием. *В зависимости от способа наблюдения электрон проявляет себя либо как волна, либо как частица, но одновременно эти свойства не проявляются*. По этому поводу де Бройль отмечал, что мы пребываем в ожидании борьбы между волной и частицей, но ничего не происходит, поскольку оба противника никогда не появляются вместе. В результате это позволило Н. Бору сделать вывод, что наука изучает не саму реальность, а лишь наш контакт с нею.

Однако существуют свойства, не зависящие от способа наблюдения: масса, заряд, спин частицы, ее магнитный момент. Но когда измеряют *дополнительные друг к другу величины, результат зависит от способа наблюдения*. Это свойство Фок назвал *"относительностью к средствам наблюдения"*. В квантовой теории результат измерений зависит от того, что и как измеряют в одном и том же эксперименте. Причины этого неустранимы, так как мы вынуждены описывать квантовые объекты на языке классической физики, на котором "говорят" наши средства наблюдения и на котором мы формулируем свои мысли.

В. Вайскопф заметил, что в атомном мире словно не хватает реальности – перед нами призрачные образования, подчиняющиеся законам, которые будто бы не природой заданы, а изданы сумасшедшим королем. Но в некоторых отношениях мир, изучаемый квантовой механикой, куда более определенное и яснее привычного нам макромира. Во всяком случае он построен из гораздо более однородных и стандартных "деталей". Именно суперстандартность микромира обеспечивает макромиру устойчивость и единство, несмотря на все его многообразие. Квантовый мир – фундамент макромира, гораздо более однообразен, чем здание, постро-

енное на нем. Но квантовая картина мира более сложна, потому что *подчиняется другим законам, чем привычная часть физического мира*. Но, с другой стороны, она более проста, поскольку построена, можно сказать, из набора стандартных деталей. Как говорил В. Вайскопф – природа любит стандартные решения.

Итак, квантовая физика показала:

1. В микромире "балом правит" дискретность, тогда как в классической физике можно делить каждый процесс на составные части до бесконечности (непрерывность). Но в квантовой физике дискретность и непрерывность связаны рамками корпускулярно-волнового дуализма.

2. Основными фундаментальными законами являются статистические закономерности, а не динамические; вероятностная форма причинности есть основная форма, тогда как классический детерминизм представляет собой лишь предельный случай. Вероятностные закономерности применимы не только к коллективам, но и к отдельным объектам – поведение уже одного микрообъекта имеет ярко выраженный вероятностный характер.

Подчеркнем, что статистические формулировки законов атомной и субатомной физики не отражают нашего незнания физической ситуации, как в случае с использованием вероятностей страховыми компаниями или игроками в азартные игры. В квантовой теории *вероятность следует воспринимать как основополагающее свойство атомной действительности*, управляющее ходом всех процессов и даже существованием материи. Мы не можем точно сказать, где в данный момент находится электрон данного атома. Его местонахождение зависит от действия силы притяжения ядра и воздействия других электронов того же атома. Можно лишь указать с некоторой вероятностью область его пребывания. Поэтому говорят, что субатомные частицы не столько существуют в определенное время и в определенном месте, сколько могут существовать, атомные явления не столько происходят определенным образом, сколько могут происходить в определенные моменты времени.

В экспериментах мы наблюдаем не реальность как таковую, а лишь явления, включающие результат взаимодействия прибора с микрообъектом. Как образно заметил М. Борн, частицы и волны – это "проекции" физической реальности на экспериментальную ситуацию. В атомной физике мы не можем говорить о свойствах объ-

екта как таковых (ни от чего не зависящих). Они имеют значение только в контексте взаимодействия объекта с наблюдателем. Наблюдатель – лицо, реально выполняющее измерение. В отсутствие наблюдателя квантовая система каким-то образом существует и развивается. Наблюдатель решает, каким образом он будет осуществлять измерения, и в зависимости от своего решения получает характеристику свойства наблюдаемого объекта. После того, как проведено измерение (наблюдение), поведение системы становится иным. Чем именно вызвано это изменение в поведении системы, до конца пока еще не ясно, но многие физики утверждают, что это *изменение обусловлено вмешательством экспериментатора*. Если эксперимент проводится по-другому, свойства наблюдаемого объекта тоже изменяются. Ограничения, которые возникают из-за соотношения неопределенности, не имеют никакого отношения к несовершенству измерительных приборов. Это принципиальное ограничение, обусловленное самой природой атомного мира.

Наблюдатель принципиально не может выделить наблюдаемый объект сам по себе. Нельзя говорить об электроны или фотоне, существующими сами по себе, без связи с другими элементами системы. Свойства электрона, если можно говорить о нем как о самостоятельном объекте, зависят от того, как поведет себя наблюдатель. Если последний использует дифракционную решетку, то он изучает не свойства электрона, а свойства системы *электрон плюс решетка*. Обнаружив дифракционные полосы, наблюдатель имеет право говорить об электроны как о волне. Если используется камера Вильсона, то наблюдатель изучает свойства системы *электрон плюс камера Вильсона* и, обнаруживая в ней следы летящих частиц, может говорить о том, что электрон – частица. В обоих случаях наблюдатель изучал две разные системы, которые не могут быть выделены из всей общей системы, в которой они находятся. Причем здесь один элемент (наблюдатель с прибором) принадлежит к макромиру, а другой (электрон) – к микромиру, и они описываются на разных языках.

Квантовая физика рисует картину мира, в которой отдельные частицы материи не существуют сами по себе как реальные первичные объекты, в отличие от традиционного представления о реальности, которое основано на классической механике Ньютона. Последняя утверждает, что вещество состоит из частиц, которые

рассматриваются как строительные блоки для более крупных конструкций. С этой точки зрения заведомо существует внешний мир, который состоит из частиц, обладающих местоположением, размером и т.д., причем он существует независимо от того, наблюдаем мы его или нет. В этом и состоит одно из основных отличий классической физики от квантовой.

Квантовая теория свидетельствует о принципиальном единстве Вселенной. Она показывает, что *нельзя разложить мир на независимые друг от друга составляющие*. Поэтому говорят, что здесь *мир выступает как совокупность отношений*. Квантовый подход решительно отвергает лапласовский детерминизм, отрицая, что мир можно объяснить как сумму его составных частей. В квантовой физике макромир и микромир оказываются тесно связанными, она подходит к системе как к единому целому, устанавливает связи между частями системы; именно это и дает возможность познания свойств микромира. Большое и малое сосуществуют, но одно не исчерпывает другого, как, равным образом, второе не объясняет первого. Поэтому и говорят, что *квантовая физика – это мировоззрение целостности, или холизм*.

Рассмотренная трактовка квантовой теории, которую часто называют *копенгагенской*, не является единственной. Было выдвинуто еще несколько вариантов интерпретации, но они имеют меньшее распространение, хотя в последние годы к ним усилился интерес у некоторых физиков.

3. В квантовой физике глубоко проявляется присущая природе диалектика. Метафизический подход к исследованию природы в классической физике соответствует лишь первому этапу познания, и для более глубокого познания законов природы необходимо использование диалектического метода. Несомненно, одним из главных достижений квантовой физики следует считать формирование нового способа мышления, которое теперь называют *неклассическим* или *квантово-физическим*. Именно это и привело к дальнейшему развитию рационализма и кардинальному изменению картины мира.

7.3. Квантовая лестница

Индивидуальность и стабильность квантовых состояний имеют определенные *ограничения*. Атом обладает единообразной и специфической конфигурацией лишь до тех пор, пока не возмущен

извне эффектами достаточно сильными, чтобы возбудить его в более высокие квантовые состояния. При очень энергичном внешнем воздействии индивидуальность квантовых эффектов исчезает, и система приобретает характер классический, непрерывный, как это и требует принцип соответствия.

Квантовый характер механической системы имеет ограничения; он проявляется лишь до тех пор, пока возмущающие факторы слабее, чем энергия возбуждения высоколежащих квантовых состояний. Этот порог возбуждения зависит от характера системы. Например, очень малая энергия требуется, чтобы изменить квантовое состояние большой молекулы; значительно большая энергия нужна для изменения состояния атома, и в тысячу раз большая энергия требуется, чтобы произвести изменения внутри атомного ядра. Это и есть характерная последовательность условий, которую В. Вайскопф назвал квантовой лестницей.

При низкой температуре молекулы вещества связаны в кристалл, в котором одна часть идентична другой. При его нагревании до более высокой температуры происходит плавление или испарение, а кристалл превращается в жидкость или газ. В газе при определенных температурах каждая молекула движется независимо от других по своей траектории. Движения молекул уже не сходны между собой, но сами они остаются одинаковыми, взаимодействуя между собой подобно столкновениям бильiardных шаров. При более высоких температурах, когда энергия соударений превосходит энергию возбуждения частицы, в энергетический обмен начинает также вносить вклад внутреннее движение атомов и электронов. При достижении определенной температуры газ начинает светиться – излучать свет.

При дальнейшем увеличении энергии молекулы расщепляются на атомы, а далее от атомов отрываются электроны – атомы теряют свою индивидуальность и специфичность. Электроны и атомные ядра движутся свободно, случайным образом. Эта ситуация встречается в звездах, но может быть создана и в лабораторных условиях, например, в плазме. При таких энергиях атомные ядра еще находятся в своих основных состояниях, они идентичны и имеют вполне определенные свойства, тогда как атомы уже потеряли свои специфические качества. Когда в систему вводят энергию в миллион и более эВ, например в больших ускорителях, начинают возбуждаться более высокие квантовые состояния ядер

или даже они расщепляются на протоны и нейтроны, теряя при этом свою индивидуальность и характерные свойства, становясь классическим газом протонов и нейтронов. В современных ускорителях имеется возможность передавать протонам и нейтронам такую огромную энергию, что начинает раскрываться их внутренняя структура. Развитие техники в этом направлении приводит к открытию новых структур.

Понятие квантовой лестницы позволяет раскрыть структуру Вселенной. При исследовании на уровне энергии атомов нас не должна интересовать внутренняя структура ядер. Когда изучают механику газов, внутреннее строение атома также не имеет значения. В первом случае ядра можно рассматривать как элементарные частицы (идентичные неизменные объекты); во втором – аналогично можно рассматривать каждый атом.

Проследим, что происходит, когда энергия или температура изменяются в обратном направлении, т.е. при спуске по квантовой лестнице с наивысшей известной ступени. Таковым может быть газ протонов, нейтронов и электронов при исключительно огромной температуре, соответствующей энергии нескольких десятков миллионов эВ и больше. Здесь, по сути дела, существуют только три различные элементарные частицы, движение которых носит совершенно случайный характер. При более низкой энергии, например меньше миллиона эВ, протоны и нейтроны уже образуют атомные ядра. Теперь картина приобретает больше специфических черт. Существует много различных типов ядер, каждое из которых представляет вполне определенное индивидуальное состояние. Но и здесь движение электронов и протонов случайно, неупорядоченно и непрерывно меняется. При еще более низкой энергии, например как на поверхности Солнца, электроны попадают в упорядоченные квантовые состояния, локализованные около ядер. На этой ступени квантовой лестницы появляются атомы с их специфическими индивидуальностями и химическими свойствами. Опускаясь далее до энергий десятых долей эВ, атомы могут образовывать молекулы, набор которых более разнообразен, чем атомов. Но они являются менее стабильными, чем атомы.

Дальнейший спуск до 0,01 эВ, соответствующей комнатной температуре, приводит к образованию жидкости и кристаллов, увеличивая разнообразие возможных состояний вещества. Далее среди специфических состояний материи возникают живые организ-

мы, которые отличаются способностью к *самовоспроизведению* путем сборки из более простых молекул. Для существования *живой материи* требуется *определенный интервал температур*, вне которого жизнь существовать не может. С этой точки зрения человеческая жизнь, мысли и чувства – не более чем проявление одной из стадий развития мира.

Из изложенного можно сделать вывод, что материи присуща склонность к образованию качественно выделенных специфических форм, склонность, имеющая в своей основе *стабильность и индивидуальность квантовых состояний*, или, другими словами, *материи присуще саморазвитие*.

7.4. Элементарные частицы как глубинный уровень организации материи

Часто говорят, что цель физики состоит в объяснении законов природы или, по крайней мере, неодушевленной природы. Но что значит объяснить? Это значит установить несколько простых принципов, которые позволяют описать свойства того, что должно быть объяснено.

Е. Вигнер

7.4.1. Элементарны ли элементарные частицы

Элементарные частицы в точном значении этого слова – *первичные, далее неразложимые частицы*, из которых, по предположению, состоит вся материя. В этом понятии в современной физике находит выражение идея о *первообразных сущностях*, определяющих все известные свойства материального мира. Эта идея зародилась на ранних этапах становления естествознания и всегда играла важную роль в его развитии.

Понятие элементарных частиц сформировалось в тесной связи с установлением дискретного характера строения вещества на микроуровне. Использование этого термина имеет исторические причины и связано с тем периодом, когда единственными известными их представителями были *фотон, протон, электрон, нейтрон, мезон и нейтрино*, которые считались действительно элементарными, так как служили основой для построения вещества и взаимодействующего с ним электромагнитного поля, а слож-

ная структура протона и нейтрона еще не была известна. Все эти частицы были при деле. Из протонов и нейтронов построены ядра атомов. Протоны имеют положительный заряд, нейтроны не имеют электрического заряда, но по массе они примерно равны массе протона и вместе с ним определяют атомный вес. В ядре между протонами и нейтронами действуют силы притяжения, к которым определенное отношение имеет мезон. Нейтрино – нейтральная частица, не имеющая массы покоя, как и фотон, ни с чем не взаимодействующая. Она нужна только для того, чтобы при ядерных реакциях не нарушался закон сохранения энергии. Открытие новых частиц разрушило эту простую картину. Мир, оказалось, устроен гораздо сложнее и непонятнее: например, протоны и нейтроны имеют сложную структуру. Поэтому уже нельзя утверждать, что элементарные частицы в смысле приведенного выше определения в действительности существуют, и от такого определения элементарности пришлось отказаться.

В настоящее время термин *”элементарные частицы”* в современной физике употребляется для наименования большой группы частиц материи, которые не являются атомами или ядрами. Эта группа частиц достаточно обширна. Помимо упомянутых протонов (p), нейтронов (n) и электронов (e^-), к ней относятся: фотоны (γ), пи-мезоны (π), мюоны (μ), тяжелые лептоны (τ), нейтрино трех типов – (электронное ν_e , мюонное ν_μ и τ -нейтрино), так называемые *странные частицы* (K -мезоны и гипероны), разнообразные резонансы, мезоны со скрытым *”очарованием”* (J/Ψ , Ψ' и другие), *”очарованные”* частицы и ипсилон частицы (Υ) – всего более 350 частиц, абсолютное большинство из которых являются нестабильными.

Все элементарные частицы являются объектами исключительно малых масс и размеров. У большинства из них массы приблизительно равны массе протона ($1,67 \cdot 10^{-24}$ г). Только электрон имеет значительно меньшую массу ($9,1 \cdot 10^{-28}$ г). Размеры частиц имеют величину 10^{-13} см и меньше. Такие исключительно микроскопические массы и размеры обуславливают квантовую специфику их поведения. Характерные длины их дебройлевских волн по порядку величины близки к типичным размерам, на которых осуществляется их взаимодействие. Поэтому квантовые закономерности в их поведении оказываются определяющими.

Одной из важнейших специфических характеристик элементар-

ных частиц является *спин*. Он квантуется, т.е. имеет дискретный набор значений, которые выражаются целыми или полуцелыми положительными числами (в единицах \hbar). Например, для фотона спин $s = 1$, для электрона – $s = 1/2$, у пионов и каонов спина нет ($s = 0$). Спин – эта специфическая характеристика квантовых объектов, он не имеет классического аналога, и его наличие указывает на ”внутреннюю сложность” микрообъекта. Иногда пытаются сопоставить модель микрообъекта, вращающегося вокруг своей оси. Такая модель наглядна, но в принципе неверна, поэтому ее не следует понимать буквально.

Число наблюдаемых в физических экспериментах элементарных частиц продолжает расти, при этом большинство из них не удовлетворяет строгому определению элементарности, так как они сами составные системы. Объединяющее их свойство заключается в том, что все они являются *специфическими формами существования материи, не ассоциированной в ядра и атомы* (иногда их также называют *субъядерными* частицами).

Элементарных частиц оказалось так много, а свойства их настолько разнообразны, что их пришлось распределить по *семействам*, используя основные характеристики – *массу, электрический заряд и спин*.

Первую группу составила одна частица – *фотон*. Его масса и заряд равны нулю, спин равен 1.

Вторую группу образовали **лептоны** (от греческого “лептос” – мелкий, легкий), среди которых наиболее известными являются *электрон, мюон, электронное и мюонное нейтрино*. Они могут иметь электрический заряд, а могут и не иметь. Их спин равен $1/2$. Обычно они принимают участие в слабых взаимодействиях, но могут участвовать и в сильных. Среди лептонов, по-видимому, наиболее удивительной частицей является нейтрино, которая не участвует ни в сильном, ни в электромагнитном взаимодействиях. Считается, что нейтрино наиболее распространены во Вселенной, но, тем не менее, изучать их очень сложно, так как они практически неуловимы.

Все остальные частицы принадлежат к третьему семейству, которое называют **адроны** (от греческого “хадрос” – массивные). Все адроны участвуют в сильном (в том числе ядерном) взаимодействии. Они, в свою очередь, делятся на две подгруппы: *мезоны* (от греческого “mesos” – средний, промежуточный) и *барионы* (от

греческого "bagys" – тяжелый). *Мезоны* со спином 0 образуют семейство, в состав которого входят: *положительный и нейтральный пионы* (π^+ , π^0), *положительный и нейтральный каоны* (K^+ , K^0) и другие. К *барионам* относятся *нуклоны* (протон, нейтрон), *гипероны* с полуцелым спином и еще множество других частиц.

Иногда в особую группу выделяют частицы, которые переносят взаимодействия, но не являются строительным материалом вещества. Это, прежде всего, *фотоны* – переносчики электромагнитных взаимодействий. Переносчики сильного взаимодействия – *глюоны*, обеспечивающие взаимодействие между *кварками* – частицами, из которых состоят нуклоны. Переносчики слабого взаимодействия – W_{\pm} , Z_0 -*бозоны*, открытые в 1983 г. Гипотетические частицы, ответственные за гравитационное взаимодействие, называются *гравитонами*.

Каждая элементарная частица описывается набором дискретных значений определенных физических величин, которые служат ее характеристиками. Общими характеристиками всех элементарных частиц являются *масса* (m), *время жизни* (τ), *спин* (J) и *электрический заряд* (Q). Помимо этих величин, они характеризуются еще рядом так называемых, "*внутренних*" *квантовых чисел*: *барионный заряд*, *лептонный заряд*, *странность* (L), *четность* (P), "*очарование*" (S), "*красота*" (C) и др., которые относятся не ко всем частицам, а лишь к определенным.

Почти все частицы имеют *античастицы*, кроме фотона, нейтрального π -мезона и η^0 -частицы, которые считаются истинно нейтральными частицами. Античастицы отличаются от частиц знаком электрического заряда, а также знаками всех специфических зарядов, например, знаком странности.

Все лептоны и барионы имеют *полуцелый спин*, их еще называют *фермионами*. Все эти частицы обладают свойством, имеющим характер закона: частицы с полуцелым спином могут находиться вместе только при условии, если их физические состояния не одинаковы – *принцип запрета Паули*. Фотоны и мезоны имеют *целый спин* – их называют *бозонами*. В отличие от фермионов на них запрет Паули не распространяется, и они могут находиться вместе в любом количестве. Причина этого различия до сих пор не ясна. Предполагается, что имеется определенный тип симметрии, присущий именно микромиру, который и определяет это различие.

У барионов есть свой барионный заряд B , который определя-

ет взаимодействие барионов. В отличие от электрического заряда, который создает электрическое поле, специального барионного поля нет. Барионный заряд – это квантовое число, характеризующее определенную степень свободы частицы. Для всех барионов $B = 1$, для антибарионов – $B = -1$. Для остальных частиц $B = 0$.

Два главных бариона – протон и нейтрон – очень похожи друг на друга, хотя первый имеет положительный заряд, а второй – заряда не имеет. Однако оказалось, что они являются разными состояниями одной и той же частицы – нуклона. Состояния нуклона характеризуют квантовым числом, которое называют *изоспином* I . Для протона $I = 1/2$, а для нейтрона – $I = -1/2$. Это свойство нуклона называют *зарядовой независимостью*, и обусловлено оно симметрией – *изотопической инвариантностью*. Здесь слово изотопический означает примерное равенство масс нуклонов, а сама величина называется спином, потому что зарядовая независимость математически описывается так же, как и спин. Симметрия природы объединяет протон и нейтрон в единую частицу – нуклон, обладающий изотопической симметрией. Электромагнитное поле нарушает эту симметрию. Когда поля нет, разница между ними полностью исчезает.

Все адроны характеризуются квантовым числом, которое называют *странностью* S . Оно может быть нулевым, положительным или отрицательным, но $S \leq 3$. Античастицы имеют противоположный знак странности по сравнению с частицами. Квантовое число, называемое *четностью* P , характеризует свойство волновой функции частицы изменять или сохранять свой знак при изменении знака всех пространственных координат. С точки зрения симметрии это соответствует отражению в центре симметрии или в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Такое преобразование переводит левую систему координат в правую (т.е. левое меняется на правое).

Существует еще целый ряд квантовых чисел, с которыми связаны определенные законы сохранения и которые связаны с симметрией не так наглядно, как рассмотренные выше. Например, силы, действующие между нуклонами в ядре, не зависят от электрического заряда. Поэтому ядра, в которых все протоны заменены на нейтроны и наоборот, имеют почти одинаковые свойства. Такие ядра называют зеркальными. В частности, свойства ядра лития-7, в котором три протона и четыре нейтрона, почти одинаковы со

свойствами ядра бериллия-7, у которого, наоборот, четыре протона и три нейтрона. Такой тип симметрии называют *первой динамической симметрией*. Она приближенная, поскольку речь идет только о почти одинаковых свойствах. Небольшое различие объяснено электрическому заряду протона.

Вторая динамическая симметрия связана с возможностью существования антимира. Мы говорили, что практически каждой частице соответствует своя античастица. Они отличаются только знаками зарядов. У незаряженных частиц меняются на противоположные другие свойства, например, нейтрино и антинейтрино различаются направлением спина. Симметрия мира абсолютно точная, но наш реальный мир состоит только из частиц. Пока окончательного объяснения этому факту нет. Объяснение связывают с наличием *скрытой симметрии*, суть которой состоит в следующем. Представим две одинаковые долины, разделенные холмом, на котором находится шар. Первоначально ситуация совершенно симметрична, и шар с равной вероятностью может упасть в любую из двух долин. Но вследствие случайных причин он все же скатывается в одну из них, и ситуация становится несимметричной. Идея скрытой симметрии в некотором смысле аналогична рассмотренной, в том смысле, что Вселенная когда-то находилась в подобной ситуации. Законы, описывающие поведение Вселенной, симметричны, но соответствующие этим законам решения неустойчивы. Именно в этом и состоит причина перехода Вселенной в асимметричное состояние. Скрытая симметрия вещества и антивещества состоит в равной возможности возникновения частиц и античастиц. Считается, что так, по-видимому, и было на ранней стадии развития Вселенной. При этом особую роль, возможно, сыграли граничные условия, при которых происходил физический процесс. В существующих теориях они не могут быть учтены, так как неизвестны. Именно это и привело Вселенную к тому, что она “скатилась в долину вещества”. Это явление называют *спонтанным нарушением симметрии*.

Все элементарные частицы, за исключением фотона, протона, электрона и двух нейтрино, *нестабильны*. Это означает, что они *самопроизвольно*, без каких-либо воздействий извне, распадаются, превращаясь в другие частицы. Например, нейтрон распадается на протон, электрон и электронное нейтрино. Невозможно предсказать, когда именно произойдет этот распад; каждый акт

распада происходит совершенно **случайно**. Но если проследить за множеством распадов, можно обнаружить закономерность распада, которая состоит в том, что если в момент времени $t = 0$ было $N_0 \gg 1$ нейтронов, то к моменту времени t останется $N(t) = N_0 \exp(-t/\tau)$, где τ – характерная постоянная, которую называют *временем жизни* (нейтрона). Для нейтрона $\tau = 10^3$ с. Физический смысл величины $\exp(-t/\tau)$ – вероятность для отдельной частицы не распасться по истечении времени t . Каждая элементарная частица характеризуется своим временем жизни. Чем меньше время жизни, тем больше вероятность распада частицы. Для мюонов $\tau = 2,2 \cdot 10^{-6}$ с, для π^+ -мезонов – $\tau = 2,6 \cdot 10^{-8}$ с, гиперонов – $\tau = 10^{-10}$ с, нейтральных π -мезонов – $\tau = 10^{-16}$ с, для резонансов $\tau = 10^{-22} - 10^{-23}$ с. В течение времени жизни каждая частица сохраняет свою индивидуальность. Некоторые частицы могут распадаться различными способами, при этом также невозможно точно предсказать не только время, но и способ распада. Нестабильность большинства элементарных частиц, как и спин, сугубо специфическое свойство микрообъектов, которое также можно рассматривать как их ”внутреннюю сложность”.

Другое наиболее важное квантовое свойство всех элементарных частиц – их *взаимопревращаемость*, т.е. способность *рождаться и уничтожаться* при взаимодействии с другими частицами. В этом отношении они аналогичны фотонам. *Все процессы с элементарными частицами протекают через последовательность актов их поглощения и испускания* (рождения и уничтожения). Ни одну из частиц нельзя разбить на части, при столкновениях они просто исчезают, а вместо них рождаются другие частицы.

Элементарные частицы представляют собой вид материи, *качественно отличный от более сложных частиц*. Различие между ними так велико, что к элементарным частицам неприменимы категории простого и сложного, составной части и структурного целого, т.е. понятие ”внутренней структуры”, как, например, для атома или молекулы. Такие понятия относительны. Действительно, атом сложен и имеет внутреннюю структуру по отношению к ядру и электронной оболочке. Но он является простой частицей по отношению к молекуле. Для элементарных частиц такой подход не верен. Продукты ”распада” элементарной частицы не более просты, чем распавшаяся. Вновь возникшие частицы также эле-

ментарны, поскольку они находятся на том же уровне структурной иерархии, что и породившая их структура. На элементарном уровне структурное целое не обязательно больше, чем каждая из его составляющих.

Специфика элементарных частиц проявляется и в энергетических взаимодействиях. Полная энергия материального тела складывается из собственной энергии, соответствующей его массе покоя $E = mc^2$, и суммы энергий связей составных элементов. В большинстве случаев собственная энергия намного превосходит энергию связи. Поэтому при разложении, например, молекулы на атомы в самих атомах заметных изменений не происходит. В элементарных частицах все происходит не так. Здесь невозможно всю энергию разделить на собственную энергию и энергию связей. Поэтому они и не могут разлагаться на составные части, хотя и имеют внутреннюю структуру. Элементарные частицы не содержат в себе других частиц. Новые частицы возникают в процессе распада.

7.4.2. Типы фундаментальных взаимодействий и квантовые поля – поля и частицы

Все силы, существующие в природе, сводятся сегодня к *четырем взаимодействиям*, которые называют **фундаментальными**: *гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое*. Эти фундаментальные взаимодействия лежат в основе всех других известных форм движения материи.

Гравитационное взаимодействие *самое универсальное* – оно характерно для всех материальных объектов, не зависит от их природы и простирается на огромные расстояния. Любое материальное тело создает гравитационное поле. Гравитация проявляется в виде *притяжения* между телами. Но важную роль оно играет только при взаимодействии больших массивных объектов и не учитывается при взаимодействии микрообъектов. В этом смысле гравитационное самое слабое из всех известных взаимодействий. Однако на расстояниях 10^{-33} см (*фундаментальная длина*) и при очень больших энергиях гравитация вновь приобретает существенное значение, так как становится сравнимой с остальными взаимодействиями. В рамках общей теории относительности гравитация рассматривается как искривление пространства-времени. Такой подход наиболее адекватен в случае сильных гравитацион-

ных полей.

Электромагнитное взаимодействие действует между электрически заряженными телами, как покоящимися, так и движущимися. Оно присутствует в электрических, магнитных и электромагнитных явлениях и процессах, с которыми мы встречаемся наиболее часто в жизни. Электромагнитное взаимодействие определяет строение и свойства атомов и молекул, включает в себя кулоновские силы, силы взаимодействия между проводниками с током, силы трения, сопротивления, упругости, химические силы и другие, т.е. проявляется на макроскопическом уровне. Оно считается основным в химии и биологии. В электромагнитных взаимодействиях не участвуют только нейтрино и антинейтрино.

Сильное взаимодействие "скрепляет" кварки внутри нуклонов. В сильных взаимодействиях участвуют все адроны. Оно действует на расстояниях 10^{-13} см и меньше и представляет собой притяжение или отталкивание между составными частями микрообъекта.

Ядерные силы, действующие внутри ядра и отвечающие за *связь протонов и нейтронов (нуклонов)* в атомных ядрах, а также за многообразие ядерных реакций, перестали считаться фундаментальными. Пока до конца не все еще ясно, но предполагается, что они должны как-то выражаться через сильные взаимодействия.

Слабое взаимодействие ответственно за большинство распадов и многие превращения элементарных частиц. В этом процессе принимают участие все частицы. Оно простирается на расстояния $10^{-15} - 10^{-22}$ см. Это взаимодействие ответственно, например, за превращение в ядре нейтрона в протон, электрон и антинейтрино; оно же вызывает переходы между лептонами. Большинство частиц нестабильны именно из-за слабого взаимодействия.

Законы действия фундаментальных сил и их зависимости от расстояний различны – можно сказать, что у каждой своя "сфера влияния". Гравитационная сила, хотя и простирается на большие расстояния, существенна лишь для очень больших тел. Если бы атом водорода удерживался только за счет гравитационного взаимодействия между электроном и протоном, его размер был бы сравним с размерами видимой Вселенной. Электромагнитное взаимодействие, за счет которого удерживается электрон возле протона, в 10^{36} раз больше гравитационного взаимодействия. Элек-

тромагнитное взаимодействие не столь универсально, как гравитационное, но именно ему мы обязаны практически всем, что нас окружает. Сильное взаимодействие примерно в 100 раз превосходит электромагнитное и в 10 000 раз – слабое.

До середины 1950-х годов физики были убеждены, что в мире элементарных частиц все известные законы сохранения соблюдаются строго. Представлялось, что мир симметричен относительно таких симметрий, как *зарядовое сопряжение* (C -симметрия), согласно которому замена всех частиц на античастицы не меняет характера процессов в природе; симметрия относительно *обращения времени* (T -симметрия); *четность* или P -инвариантность (зеркальная симметрия), описывающая закон сохранения четности. Однако это оказалось не так.

В микромире симметрия контролируется взаимодействием, причем точность проявления симметрии, а значит, и законов сохранения, различна для разных взаимодействий – чем сильнее взаимодействие, тем точнее выполняется симметрия. В процессах, контролируемых сильным или электромагнитным взаимодействиями, строго сохраняются C -, P - и T -симметрии, причем каждая по отдельности. В слабых же взаимодействиях каждая из динамических симметрий нарушается, и только совместное действие удерживает мир в симметричном состоянии. Оказалось, что *наш мир симметричен только относительно всех трех преобразований – CPT -симметрия*, а каждое преобразование в отдельности может приводить к асимметрии. Таким образом, и в микромире (как и в макромире) имеются абсолютные различия между частицами и античастицами, между “левым” и “правым”, между “прошлым” и “будущим”.

Свойства и взаимодействия элементарных частиц наиболее полно и последовательно описываются в рамках понятия *физического поля*, которое ставится в соответствие каждой частице. *Поле есть специфическая форма материи*. С математической точки зрения оно описывается *функцией, задаваемой во всех точках пространства-времени, которая обладает определенными трансформационными свойствами к преобразованиям Лоренца и подчиняется определенным правилам симметрии*. Поле позволяет описывать взаимодействие между различными объектами. Например, электрическое поле описывает взаимодействие между электрическими зарядами и токами (смотри предыдущий раздел).

Теория относительности сделала построение электродинамики более изящным, объединив понятия зарядов и токов, а следовательно, электрических и магнитных полей. Поскольку движение относительно, то любой заряд может восприниматься как ток, если рассматривается в системе координат, в которой он движется относительно наблюдателя, а значит, его электрическое поле может проявляться как магнитное и наоборот.

Поля, сопоставляемые с элементарными частицами, имеют *квантовую природу*, поэтому их называют **квантовыми полями**: они объединяют в себе и частицы, и взаимодействие, представляя *единый объект*. Энергия E_k и импульс \vec{p}_k кванта соответствующего поля связаны соотношением $E_k^2 = \vec{p}_k^2 c^2 + m^2 c^4$, а полная энергия и импульс поля слагаются из отдельных порций-квантов. *Каждый квант поля есть элементарная частица* с заданной энергией и импульсом и общей для всех квантов массой m . Квантами электромагнитного поля являются фотоны, кванты других полей соответствуют всем остальным элементарным частицам. Математический аппарат, описывающий такие поля, называется *квантовой теорией поля*. Она позволяет описывать процессы *рождения* и *уничтожения* частиц-квантов в каждой пространственно-временной точке. Квантовая теория поля соединяет в себе квантовую механику и теорию относительности. В теории разработана так называемая процедура квантования, в результате которой возникают *частицы-кванты как характеристики возбуждения этого поля*.

С точки зрения квантовой теории поля всякое *взаимодействие сводится к обмену квантами соответствующего поля*, т.е. все взаимодействия носят чисто квантовый характер. Например, *электромагнитное взаимодействие между двумя электронами* есть не что иное, как *обмен фотонами* – каждый из электронов испускает фотоны, которые затем поглощаются другими электронами. Раздел физики, изучающий взаимодействие фотонов с электронами, называется *квантовой электродинамикой*.

С квантовой точки зрения гравитационное поле состоит из квантов – *гравитонов*, которые пока еще не наблюдались. Силы тяготения выступают как результат обмена между телами гравитонами, которые переносят энергию и импульс. Ядерные силы, удерживающие нуклоны в ядре, обусловлены обменом мезонами – квантами мезонного поля. Мезоны бывают разного типа. Чем бли-

же друг к другу расположены нуклоны, тем больше количество и масса мезонов, которыми они обмениваются. Взаимодействие нуклонов и свойства мезонов связаны друг с другом. Поэтому фундаментальное понимание природы невозможно без понимания всего спектра элементарных частиц.

Идея воспринимать *частицу как квантовые состояния некоторого поля* пронизывает всю современную физику. В этом смысле поле можно считать первичным понятием, а элементарные частицы возникают в результате его квантования. Квантовое поле принимает форму квантов-частиц. Оно преодолевает унаследованное от классической физики противопоставление между твердыми материальными частицами и окружающим их пространством. Квантовому полю приписывается самостоятельная физическая природа – оно заполняет все пространство. Частицы представляют собой точки сгущения этой среды – возникающие и исчезающие энергетические узлы. При таком подходе частицы утрачивают свою независимость и как бы "растворяются" в окружающем пространстве. Говорят, что квантовое поле – это фундаментальная сущность, которая может существовать в протяженной (континуальной) форме (в виде поля) и в непротяженной (дискретной) форме – в виде частиц.

Классическая механика исходила из представлений о твердых и неделимых частицах, движущихся в пустоте. Вещество и "пустое" пространство – наполненное и пустота – представляют собой два фундаментально различающихся понятия, на которых построен атомизм Демокрита и Ньютона. В общей теории относительности эти два понятия превращаются в одно. Массивное тело не может существовать, не создавая гравитационного поля, которое проявляет себя в искривлении окружающего это тело пространства. Но сказанное не означает, что поле наполняет пространство и тем самым искривляет его. Здесь одно не существует без другого: поле само по себе есть искривление пространства. В общей теории относительности гравитационное поле и структура или геометрия пространства воспринимается как одно и то же понятие. Поэтому вещество и пространство – связанные понятия, как взаимосвязанные части единого целого.

Квантовая физика кардинально пересмотрела эту картину и существенно изменила наши взгляды не только на частицы, но и на пустоту. Квантовая теория поля по-новому взглянула на свойства

пустоты, или *вакуума*, показав, что это не пустота как таковая. В квантовом поле противопоставление между частицами и окружающим пространством теряет свою очевидность, а пустота превращается в *динамическую сущность*, имеющую огромное значение для всей физики. *Близкодействие с этой точки зрения рассматривается как особое, напряженное состояние вакуума*; здесь происходят непрерывные колебания электромагнитного и других полей, рождаются и исчезают элементарные частицы. Все частицы квантовая механика рассматривает как кванты того или иного поля и не признает возможности существования какого угодно участка пространства, где бы не было поля. В вакууме поля тоже присутствуют, только без реальных частиц. *Вакуум – это система полей, ни в одном из которых нет квантов* (реальных частиц). Поэтому вакуум не может быть пустым, он содержит бесчисленное множество беспорядочно возникающих и исчезающих частиц. При столкновениях нуклонов из пустоты может возникать целый сноп различных частиц или, как говорят, вакуум полон частиц.

Согласно законам квантовой механики для всякого поля характерны колебания. Раз поле есть, то оно должно колебаться. Такие колебания называют *нулевыми*, потому что нет частиц. Для электромагнитного поля колебания испытывают его электрическая и магнитная компоненты, причем одновременно в нуль они превратиться не могут (из-за соотношения неопределенности). Но при этом средний квадрат напряженности равен нулю. Эти колебания приводят, в частности, к "дрожанию" электрона в атоме и ослаблению его связи с ядром. Таким образом, в пустоте существуют нулевые колебания электромагнитного, электрон-позитронного, пионного и других полей. Эти нулевые колебания проявляют себя в том, что в вакууме образуются и исчезают пары частица-античастица – электрон-позитрон, нуклон-антинуклон и др. Вакуум наполнен такими появляющимися и исчезающими частицами; срок их жизни 10^{-24} с и меньше, поэтому их и заметить нельзя (у них нет обычного соотношения между энергией, импульсом и массой). Поэтому, в отличие от обычных частиц, их назвали *виртуальными* (от латинского "vires" – возможность). *При нулевых колебаниях виртуальные частицы рождаются и тут же исчезают*, но при столкновениях они могут превратиться в реальные частицы – именно так и происходит рождение новых частиц.

7.4.3. Кварковая природа материи и единство сил природы

Большое количество элементарных частиц постоянно подталкивает к поиску праматерии или прачастиц, из комбинации которых можно было бы объяснить все известные. Такие элементы, как теперь считают, найдены. Их называют **кварками** (с английского “quark” означает бредовый, немыслимый). Одна из характерных особенностей кварков состоит в том, что они имеют *дробный электрический заряд* по отношению к заряду электрона. Впервые эта идея была предложена М. Гелл-Маном и Дж. Цвейгом. Идея с дробным зарядом, несмотря на то, что сначала представлялась дикой, оказалась удобной и позволила провести классификацию известных частиц и объяснить их свойства! Эта ситуация напоминает успешное объяснение всех свойств различных элементов таблицы Менделеева. В настоящее время *кварки считаются фундаментальными частицами*.

Многочисленные эксперименты привели физиков к заключению, что существует *шесть типов кварков*, или *шесть ароматов*. Их условные названия таковы: *верхний (up) – $u(2/3)$* , *нижний (down) – $d(-1/3)$* , *странный (strange) – $s(-1/3)$* , *очарованный (charm) – $c(2/3)$* , *истинный (top) – $t(2/3)$* , *красивый (beauty) – $b(-1/3)$* . В скобках (рядом с обозначением кварков) указана величина заряда по отношению к заряду электрона. Кварки также имеют полуцелый спин. Кроме того, они еще обладают “цветовым” зарядом, который описывается понятием “цвет”. Цвет может принимать три значения: *красный, желтый и синий*. Например, нейтрон состоит из одного *u*-кварка и двух *d*-кварков (и обозначается как *udd*), протон – как *dii*, а пи-мезон и другие мезоны – из кварка и антикварка.

Но из адронов кварки не вылетают даже при самых сильных столкновениях. Оказалось, что *кварки не могут существовать в свободном состоянии* – одни сами по себе; они не могут жить друг без друга. Внутри адронов кварки удерживает поле, которое назвали *глюонным* (от английского “glue” – клей). Оно подобно электромагнитному полю, удерживающему электрон в атоме. У кварка помимо электрического заряда есть еще и *глюонный заряд*, создающий *глюонное поле*. Энергия глюонного поля изменяется порциями-квантами, *глюонами*. Но в отличие от фотонов *глюоны – сильно взаимодействующие объекты*, поэтому они никогда не бывают реальными, их, так же как и кварки, невозможно

наблюдать поодиночке.

Цвета комбинируются таким образом, чтобы частицы были "бесцветными". Для этого нужно иметь *восемь глюонов* в соответствии с возможными переходами кварка из одного цветового состояния в другое. Электрическое поле кварка распределено вокруг него сферически симметрично. Глюонное поле, создаваемое кварком, сосредоточено в "узкой трубке". Между кварком и антикварком протягивается, как говорят, *струна глюонного поля*, при этом энергия взаимодействия между кварками растет пропорционально расстоянию между ними. Для того, чтобы раздвинуть кварки достаточно далеко, нужна огромная энергия. Невозможность раздвинуть кварки и удалить глюонное поле за пределы струны называют *конфайнментом* (от английского "confinement" – тюремное заключение, ограничение свободы). Ясного физического объяснения этого явления пока еще нет. Теория, описывающая динамику и взаимодействие кварков и глюонов, называется *квантовой хромодинамикой*.

Дробность зарядов и трехцветность кварков подтвердились многочисленными экспериментами, только сами кварки наблюдать не удалось. Если кварки разлетаются, они тут же превращаются в адроны. Взаимодействие кварков не похоже на взаимодействие электронов. Рождаясь, кварк и антикварк разлетаются, но сила, с которой они взаимодействуют, не убывает с расстоянием, как в электродинамике, а увеличивается – в этом причина, как говорят, их вечной виртуальности: их кинетическая энергия превращается в потенциальную энергию притяжения, как у двух шаров, скрепленных пружиной. С ростом потенциальной энергии "пружина" рвется, и система превращается в два летящих в разные стороны снопа "белых" частиц.

На протяжении всей своей истории физика ищет единые причины для самых различных явлений, пытается объединить свои области (уравнения Максвелла, таблица элементов Менделеева, кварки и глюоны, объясняющие строение адронов, и т.п.). До недавнего времени казалось, что между четырьмя фундаментальными взаимодействиями нет никакой связи. Усилия физиков, направленные на их объединение, привели к первому успеху – *электромагнитное и слабое взаимодействия* удалось объединить в единое **электрослабое взаимодействие**, т.е. они оказались проявлением более общего единого взаимодействия. Эта идея сводится к

тому, что электромагнитное поле представляет собой часть более общего электрослабого поля, состоящего из нескольких компонент. В результате список прачастиц, с помощью которых можно объяснить известные элементарные частицы, значительно сократился. Сегодня список таких "первоначал" состоит из *13 фундаментальных бозонов* и *12 фундаментальных фермионов*.

Фундаментальные бозоны – это "*переносчики*" *основных взаимодействий* – кванты силовых полей, отвечающих основным фундаментальным взаимодействиям. К ним относят: *фотон*, обеспечивающий электромагнитное взаимодействие, *восемь глюонов* – сильные взаимодействия, *три промежуточных бозона* W^+ , W^- , Z_0 , описывающие слабое взаимодействие (первые два имеют электрические заряды, третий – электрически нейтрален), и гипотетический *гравитон* – квант гравитационного поля. Существование промежуточных бозонов предсказано теорией *Салама-Вайнберга-Глэшоу*. Они экспериментально обнаружены в 1983 г. Отличительной особенностью промежуточных бозонов является наличие у них большой массы: у W – $160\,000\,m_e$, а у Z_0 – $180\,000\,m_e$.

Фундаментальные фермионы – это *лептоны* и *кварки*. Все процессы с участием лептонов и адронов представляют теперь как *кварк-лептонные процессы*.

Но на этом физики не остановились. Следующее объединение, еще не завершенное, назвали **великим объединением**. Оно должно дать *единое объяснение электромагнитным, слабым и сильным взаимодействиям*. Такая теория должна описать единым образом кварки, глюоны, электроны, нейтрино, фотоны и их взаимодействия, переводящие любую из этих частиц в другое возможное состояние.

Все рассмотренные особенности элементарных частиц обусловлены определенными симметриями, среди которых особое значение имеет **унитарная симметрия**. Исходная идея унитарной симметрии состоит в независимости уравнения для энергии сильного взаимодействия относительно некоторых преобразований, эквивалентных поворотам или вращениям в некотором абстрактном векторном пространстве – *SU_3 -симметрия*. Она позволяет объединить большое число похожих частиц, т.е. считать их как одну, но находящуюся в разных состояниях. Как, например, нуклон, объединивший протон и нейтрон. При этом подходе удастся объеди-

нить, казалось бы совершенно различные элементарные частицы. Например, выяснилось, что все различные мезоны можно считать разными состояниями всего одной частицы. Также показано, что все адроны связаны между собой законами симметрии.

Отметим, что унитарная симметрия – все же приближенная симметрия, поэтому она не может претендовать на роль всеобъемлющей теории. Тем не менее она позволяет объяснить многие свойства элементарных частиц с единых позиций. Как указывает А. Сонин, “...симметрия сейчас настолько прочно и органично вошла в физику элементарных частиц, что любые ее новые успехи практически не мыслимы без этой плодотворной идеи”. (Сонин, 1987.)

Теорию, которая призвана объединить электрослабое взаимодействие и великое объединение, называют **суперобъединением** (или иногда – теорией всего сущего). Она должна охватить все четыре взаимодействия одновременно. Хотя пока еще рано говорить о ее результатах, но сегодня физики считают, что эту теорию можно создать на основе *теории струн*. Эта новая теория основана на введении протяженных микрообъектов, которые назвали *струнами*, они представляют собой пространственно одномерные отрезки с размером планковской длины 10^{-33} см. Она возникла в результате объединения квантовой теории с общей теорией относительности. Здесь струна заменяет частицу или, в общем случае, любой локализованный в пространстве микрообъект. В этой теории предполагается, что все элементарные частицы, которые известны сегодня или будут открыты в будущем, являются определенными возбужденными состояниями струны. Понятие струны исключает точечные представления микрообъектов из структуры микромира и сводит физику к геометрии сложных пространств. Тем самым пространство становится самым фундаментальным понятием в физике.

Теория суперструн связана с концепцией суперсимметрии, открытой в 1960-1970-х гг., которая связала между собой фермионы и бозоны. Преобразования суперсимметрии переводят их друг в друга, а также связывают физику с геометрией. Согласно этой теории фундаментальным объектом современной физики является квантованное суперструнное поле, возбуждением которого выступают суперструны, взаимодействующие между собой и с вакуумом. Струны, в свою очередь, порождают известные нам элемен-

тарные частицы. Кроме того, эта теория приводит к целому ряду очень даже нетривиальных следствий. Например, предсказывает существование частиц, движущихся со сверхсветовыми скоростями, которые называют тахионами. Более того, как следствие теории возникает представление о так называемом “теновом” мире, которое, вероятно, может стать объяснением открытого астрономами факта, что скопления галактик и галактики содержат большую массу невидимого “скрытого” вещества, в десятки раз превосходящую массу самих галактик. Но пока это все гипотетично и об этом серьезно говорить еще рано.

Итак, в познании строения вещества физика прошла *три этапа*. На *первом этапе* рассматривалось строение атомов и молекул, была исследована их электронная оболочка и т.д. На *втором этапе* исследовалось строение атомного ядра как объекта, состоящего из протонов и нейтронов. На *третьем этапе* изучается структура самих нуклонов или кварковая структура адронов. Если объект обладает внутренней структурой, он будет характеризоваться и внутренней динамикой, и внутренними движениями. Согласно квантовой механике энергия таких движений квантуется, образуя дискретный спектр. На разных уровнях познания эти спектры отличаются в основном масштабом энергии.

Основные понятия и термины, которые необходимо знать:

адроны, барионы, бозоны, великое объединение, глюоны, изотопическая инвариантность, квантовый переход, кварк, микрообъект, лептоны, спин, стационарное состояние, суперобъединение, четность, фермионы.

Контрольные вопросы

1. Что изучает квантовая физика?
2. В чем сущность идеи дискретности?
3. Что означает понятие “квант”?
4. Раскройте сущность корпускулярно-волнового дуализма.
5. Что такое принцип дополнительности и какова его сущность? Какое значение он имеет в описании физической реальности микромира? Где он применяется?
6. Что такое волновая функция? Ее физический смысл.
7. В чем сущность принципа тождественности?
8. Что такое соотношение неопределенности и в чем его физический смысл? Ставит ли он предел нашему познанию?

9. Можно ли говорить о движении микрообъекта по определенным траекториям?
10. В чем состоит сущность понятия квантовой лестницы?
11. Какое содержание вкладывается в понятие “элементарная частица” в современной физике?
12. Приведите классификацию элементарных частиц.
13. Перечислите истинно элементарные частицы.
14. Дайте характеристику фундаментальным взаимодействиям.
15. В соответствии с квантовой теорией поля поле дискретно или непрерывно?
16. Какие частицы называют кварками, и существуют ли они в свободном состоянии?
17. Перечислите частицы, являющиеся переносчиками взаимодействий.
18. Какие этапы прошла физика в изучении строения материи?
19. В чем проявляется единство сил природы?

Литература: [21, 22, 24, 32, 33, 34, 39].

Дополнительная литература: [1, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 36, 46, 61, 62].