1.16. Соотношение неопределенностей Гейзенберга и принцип дополнительности Бора

В связи со всем вышесказанным, естественно, возникает вопрос: как можно теперь трактовать классические понятия координаты, скорости или импульса электрона? Можно ли вообще применять эти классические понятия к сложному, вероятностному поведению систем квантовых микрочастиц? Подчеркнем, что одним из наиболее важных утверждений квантовой механики является то, что законы в области микромира являются вероятностно статистическими. Например, из теории Бора известно, что если мы возбудим атом, перебросив электрон на более высокую по энергии «орбиту», то спустя некоторое время он может потерять избыток энергии и возвратиться на более низшую орбиту, испустив при этом излишек энергии в виде фотона. Однако промежуток времени, в течение которого атом находился в возбужденном состоянии, является совершенно неопределенным и его нельзя точно предсказать заранее. Можно только вычислить *вероятность* испускания фотона, т.е. определить некое среднее время жизни в возбужденном состоянии.

Квантовая механика позволяет это сделать. Уже говорилось, что один опыт по определению времени жизни возбужденного состояния ничего не скажет о такой вероятности. Для получения определенного ответа надо произвести достаточно большое количество опытов и вывести таким образом величину вероятности испускания возбужденным атомом фотона из поведения статистического коллектива. Затем нужно сравнить результат опыта с тем, что предсказывает решение уравнения Шредингера для соответствующей задачи.

Можно привести и другие примеры, например, задачу по определению времени распада какой-нибудь неустойчивой микрочастицы, скажем, полученного в ускорителе пиона. По снимкам траекторий пионов в камере Вильсона или пузырьковой камере было установлено, что они распадаются на две другие микрочастицы – мюон и нейтрино. При этом некоторые пионы успевают до распада пройти очень неболь-

шое расстояние, другие – несколько больший путь, а третьи – еще больший. Повторяя данный опыт многократно, мы увидим, что среднее время жизни пионов всегда одно и то же (конечно, при определенных постоянных условиях, например, определенном значении их кинетической энергии). Это время и служит мерой вероятности распада пиона, которую можно измерить с большой точностью. Тем не менее, каждый пион в отдельности может распасться раньше или позже всех, так что продолжительность жизни отдельного пиона остается неопределенной.

Очень интересен вопрос о так называемом *туннельном эффекте* в микрофизике и определении его вероятности, т.е. вероятности проникновения микрочастицы сквозь энергетический потенциальный барьер, когда ее энергия ниже высоты этого барьера. Такое явление наблюдается, например, при альфа-распаде атомных ядер. Как показал Г. Гамов, альфа-частицы имеют некоторую вероятность вылететь из атомного ядра, несмотря на высокий энергетический барьер на границе атомного ядра. В отличие от микрочастиц, человек может простоять миллион лет у стены своей комнаты, но не выйдет через нее в соседнюю комнату, просочившись через бетонную или кирпичную кладку.

Однако в квантовой механике не для всех случаев характерна неопределенность и вероятностная интерпретация – многие свойства микрочастиц определяются совершенно точно. Так обстоит дело с определением их массы, заряда, спина, энергий стационарных состояний и т.д. Даже там, где господствуют законы вероятности, последняя может быть либо близка к нулю, либо к единице, что говорит о том, что осуществление этих явлений или их неосуществление почти достоверно. Например, вероятность распада протона с его продолжительностью жизни в 10^{30} лет практически равна нулю, т.е. протон практически стабильная частица, как и электрон. В *макромире* вероятности различных явлений из-за большого числа микрочастиц, образующих макротела и участвующих в тех или иных процессах, оказываются всегда близкими к нулю или единице, т.е. являются практически достоверными.

Еще раз вернемся к высказанной впервые де Бройлем идее о волнах материи, а также их связи с борновской вероятностной интерпретацией микроявлений. В микромире волны и частицы – не два *разных* объекта, а два различных

аспекта одной и той же реальности, что по существу и подчеркнул Эйнштейн в своей знаменитой работе по квантовому объяснению законов фотоэффекта. Понятие микрочастицы с чисто классической точки зрения очень просто. Ее можно представить себе как детский мячик, размеры которого уменьшены до величин порядка 10^{-8} см или даже меньше, т.е. микрочастица – это мельчайший сгусток вещества шарообразной формы. Труднее представить себе микрочастицу, двигающуюся со скоростью света и не имеющую массы покоя.

Понятие волны в классической физике более трудное и туманное, нежели понятие частицы. Мы видим, например, волны на поверхности воды, слышим звуковые волны. Еще в детстве мы играли с веревочкой, дергая ее за один конец и таким способом пуская по ней волны. На первый взгляд кажется, что волны совершенно ничего не имеют общего с понятием частица. Частицы находятся во вполне определенной ограниченной области пространства, а волны – какие-то размытые образования, они, казалось бы, лишены массы и определенных размеров. Но несмотря на кажущиеся вполне очевидные различия, квантовая механика соединила с успехом представления о волне и частице.

По мнению физиков, волны обладают *корпускулярными свойствами,* а частицы *волновыми.* Сближение этих понятий требует уступок с обеих сторон. Так, квантовая механика внесла некоторые необходимые изменения в наши представления о частицах: она лишила их (как мы увидим сейчас) определенной локализации, частица оказывается тоже размытой в пространстве, как и волна. Чем больше частица, тем эта нелокальность относительно меньше, но в микромире она всегда очень важна. То, что размеры атома (10^{-8}см) и размеры атомного ядра почти в сто тысяч раз меньше этой величины (10^{-13}см), почти целиком определяет нелокальность маленького электрона, которая не позволяет ему находиться внутри атомного ядра.

Гейзенберг высказал утверждение, что частицы не локализуются именно потому, что они обладают волновыми свойствами. В формуле де Бройля $\lambda_B = h/p$ корпускулярная характеристика микрообъекта – импульс – однозначно определяет его волновую характеристику – длину волны. Если применить эту формулу к такому макрообъекту, как человек, двигающийся со скоростью 5 км/час, то его дебройлевская

длина волны при массе в 70 кг будет исключительно малой и составит всего лишь 10^{-33} см, и квантовые эффекты нелокальности для человека оказываются совершенно несущественными. Отметим, что малость дебройлевской длины волны даже для малых масс микрочастиц определяется исключительной малостью постоянной Планка *h*.

Формула де Бройля была подтверждена в опытах по дифракции электронных пучков на кристаллах. Но окончательным ключом к пониманию дуализма волна-частица явилась вероятностная интерпретация шредингеровской волновой функции, которая связана с вероятностью найти электрон в данном месте пространства. Там, где квадрат модуля волновой функции велик, велика и вероятность обнаружить электрон при эксперименте, а если он равен нулю, нет и электрона.

Гейзенберг, обсуждая подобные вопросы, рассмотрел различные мысленные опыты, где была поставлена задача об *одновременном* измерении координаты и импульса (или скорости) электрона, и пришел к фундаментальному выводу, что *невозможно одновременно точно определить измерением координату и импульс электрона.* Оказалось, что чем точнее измеряется координата, тем менее точно мы можем одновременно говорить об импульсе того же электрона в результате этого измерения.

В частности, он предположил, что для измерения координаты электрона нужно посмотреть на него, например, в оптический микроскоп, осветив его светом. Но тогда электрон взаимодействует со светом и увеличивает свой импульс. Точность измерения координаты электрона определяется величиной длины волны используемого света в микроскопе λ. Взаимодействуя со светом, электрон получит, таким образом, отдачу от соответствующего фотона света, и его импульс изменится на величину импульса фотона, равного $p = h/\lambda$. Чем меньше длина волны используемого света λ, тем точнее мы знаем координату электрона, но тем неопределеннее известен его импульс, который будет расти. В данном случае неопределенность координаты Δx будет равна длине волны света, т.е. $\Delta x = \lambda$, а неопределенность импульса определяется величиной импульса фотона, т.е. $\Delta p = 2\pi\$/\lambda$. Мы видим, что произведение этих неопределенностей будет не меньше, чем $2\pi\$$:

$$\Delta x \Delta p \geq 2\pi\$,$$

что представляет собой знаменитое *соотношение неопределенностей Гейзенберга*.

Можно придумать и поставить множество опытов, которые всегда приводят к полученному соотношению. Здесь наблюдается аналогия с невозможностью построить вечный двигатель первого рода из-за нарушения в нем закона сохранения энергии. Сами по себе координата или импульс вполне определенны, но если пытаться измерить их точно и *одновременно,* то они становятся взаимно неопределенными. И происходит так не потому, что мы что-то не можем познать в микромире, а это есть одно из основных его свойств, которое ограничивает применения классических понятий координаты и импульса к микрочастице, уже не являющейся классической частицей. Соотношение Гейзенберга, таким образом, утверждает, что к микроскопическим квантовым объектам нельзя применять классический способ измерения из-за их корпускулярно-волновой природы.

Нильс Бор, анализируя принцип неопределенности Гейзенберга, пришел к выводу еще более общего принципа квантовой механики-*принципа дополнительности*, который он сформулировал тоже в 1927 году. По принципу Гейзенберга в квантовой теории точно измеряется либо пространственно-временная, либо энергетическая сторона явления, но не обе одновременно. Человек изучает микромир с помощью приборов – макроскопических аппаратов. Одни из них дают возможность узнавать пространственно-временные характеристики микрочастиц, а другие пригодны для определения энергетических свойств микрочастиц, и эти два класса приборов в известном смысле «враждебны» друг другу. Взаимодействие их с объектом микромира таково, что применение одного типа приборов исключает применение одновременно другого, что, согласно положениям квантовой механики, заложено в самой *природе* микрочастиц и не зависит от конструкции прибора, а только от его класса.

«Субъективный момент» при этом связан только со свободой выбора класса прибора экспериментатором. В классической теории прибор определяет только состояние измеряемого объекта, а в квантовой теории прибор часто *активно участвует в создании самого состояния микрочастицы,* придавая ему либо пространственно-временной, либо энергетический смысл. Прибор как бы *приготовляет* сос-

тояние измеряемой системы (данный «поварской» термин вошел прочно в обиходное выражение квантовой механики).

В классической физике основные фундаментальные понятия – координата и импульс, энергия и время. С нашими макроприборами мы идем в микромир с такими макроскопическими представлениями и видим, что микромир не дает замены этих понятий новыми фундаментальными понятиями. Новое в микромире состоит только во взаимоисключающих способах применения классических понятий к объектам микромира. Самое удивительное, что многое в квантовой механике достигается ограничением применения старых понятий.

Здесь полезно будет сказать, как с помощью волновых функций Шредингера можно до некоторой степени определенно локализовать в небольшой области пространства квантовую микрочастицу. Для этого надо создать из волновых функций так называемый *волновой пакет*. Поскольку в квантовой механике каждому состоянию свободной микрочастицы с определенным значением ипульса (Δp=0) соответствует монохроматическая плоская волна де Бройля, (формулы (14.1) и (14.1а)), занимающая все пространство (Δx=∞), это согласуется с соотношениями неопределенностей Гейзенберга. Если микрочастица локализована в некой конечной области пространства (может быть, и очень малой), то ее импульс уже не будет являться точно определенным ($\Delta p \neq 0$) – имеется некоторый разброс его возможных значений. Квантово-механическое состояние локализованной частицы представляется суммой (или лучше сказать, интегралом, поскольку значения импульса свободной частицы изменяются непрерывно) монохроматических плоских волн (14.1) с частотами, соответствующими интервалу возможных значений импульса. Наложение (суперпозиция) группы таких волн, обладающих почти одинаковым направлением распространения (из-за близких значений векторов импульса в указанном интервале), но слегка отличающихся по частотам (энергиям), и образует волновой пакет. В квантовой механике это означает, что вероятность местонахождения микрочастицы в области пространства, занятой волновым пакетом, отлична от нуля, а вне области практически равна нулю. Скорость движения центра волнового пакета равна скорости движения микрочастицы.

С течением времени волновой пакет свободной частицы становится шире, он как бы «расплывается» вследствие того, что составляющие волновой пакет монохроматические волны с разными частотами распространяются даже в вакууме с различными скоростями. «Расплывание» волнового пакета соответствует постепенной потере локализации частицы. Если микрочастица не свободна, а находится в каком-то внешнем силовом поле, например, электрон в электрическом поле атомного ядра, то такому связанному электрону в стационарном состоянии будет соответствовать не расплывающийся со временем волновой пакет.

Сказанное выше не означает, конечно, что в микромире нет ничего нового и своеобразного, но оно не отображается всегда новыми понятиями, а часто строится на «обломках» старых понятий классической механики. При изучении микромира мы связаны тесно с макроусловиями, так как человек, познающий объекты микромира, сам является макроприбором, и его чувства подвластны только макронаблюдениям. Человек через свои совершенные макроприборы познает микромир, получая своеобразную *проекцию* микромира на макропоказания своих макроприборов.

Знакомство с особенностями квантовой механики, которые излагались в предыдущих разделах, может привести к мысли, не приведет ли вероятностная интерпретация и соотношение неопределенностей к *неприятностям* при попытке согласовать их с *принципом причинности*? Это очень важный вопрос и с физической, и с философской точки зрения. Огромные успехи классической небесной механики в XVII–XVIII веках внушили людям глубокую веру, в первую очередь у физиков и астрономов, в механистический детерминизм, т.е. в возможность однозначных предсказаний событий в природе. Гордясь могуществом своей науки, французский физик, математик и астроном Пьер Лаплас восклицал: «Дайте мне значения координат и скоростей всех частиц природы в начальный момент, и я предскажу вам всю будущность Вселенной!»

Но в микротеории бессмысленно одновременно точно определять координаты и скорости микрочастиц. Однако механические законы в классике были строго однозначными, а главное открытие квантовой механики – это истинно вероятностный характер законов микромира. Если же на некоторые вопросы нельзя однозначно ответить, то, по представле-

ниям классической физики, нарушен закон причинности, и мы не можем предсказывать эволюцию всех изменений в природе.

Хотя нельзя из-за соотношений неопределенностей одновременно точно задать значения координат и импульсов микрочастиц, но все же мы имеем уравнение Шредингера, с помощью которого можно, задав начальное значение его решения, однозначно найти волновую функцию в любой более поздний момент времени и, так же как и Лаплас, с гордостью воскликнуть: «Дайте нам значение волновой функции всех частиц в начальный момент времени, и мы сможем предсказать все будущее в вероятностном смысле!»

Таким образом, принцип причинности в более сложном варианте *сохранен* и в квантовой механике: из полностью определенного (в вероятностном смысле) начального состояния однозначно по уравнению Шредингера следует единственно возможное конечное состояние.