

ГЛАВА 2. ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ МИКРОМИРА В ЕСТЕСТВОЗНАНИИ XX ВЕКА

Основное содержание главы

Проблема адекватного описания свойств микромира тесно связана с более общей проблемой отношения человека к окружающему его миру. В познании мира участвуют функционально специализированные части головного мозга человека, ответственные за рациональное и эмоциональное отражение мира в сознании человека. Описание микромира не может быть дано в тех понятиях, которые сформированы практической деятельностью человека на уровне макромира. В области микромира проявляется дуализм свойств материи – единство корпускулярных и волновых свойств микрочастиц.

2.1. Восприятие микромира человеком

Основная трудность восприятия микромира в том, что область микромира недоступна непосредственным ощущениям человека. Мы не можем потрогать или попробовать на вкус отдельный атом, увидеть движение электрона в нем, услышать «плеск» волн Дебройля... Как найти способы описания того, что нельзя увидеть, потрогать, услышать?

В принципе, с аналогичной проблемой человечество сталкивается в религиозной теологии – учении о Боге.

Как описать божество? Египетский мистик Гермес Трисмегист, которого мы уже упоминали выше, более двух с половиной тысяч лет назад писал:

Наша мысль не может себе представить Божество, и наш язык не может его определить. Бестелесное, невидимое, не имеющее формы не может быть воспринято нашими чувствами, и вечное не может быть измерено временем.

В еще более ранние времена в индийском трактате «Упанишада» записано об области божеств:

Туда не проникает ни глаз, ни речь, ни ум. Мы не знаем, мы не понимаем. Так как же можно обучить этому?

Общий вывод, который можно сделать, состоит в следующем: к Божеству нельзя подходить с человеческими мерками, поскольку все понятия нашего обыденного сознания получены в мире, доступном ощущениям человека. Они оказываются бесполезными в ином мире, неподвластном чувственным ощущениям. Принять или не принять это как истину – вопрос веры, которая не проверяется, не доказывается и не опровергается чувственным восприятием.

Точно так же перед физиками встает вопрос: как описывать микромир, с помощью какого понятийного аппарата нашего сознания, и как обучить этому других, гуманитариев например?

Объективная реальность

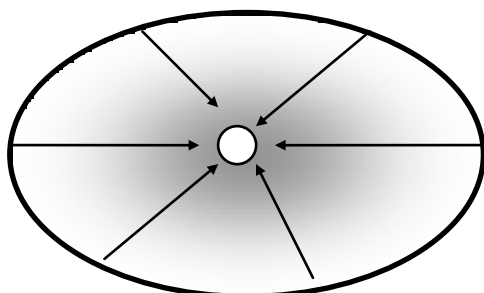


Рис. 18. Схема условного выделения субъекта

Прежде чем дать ответы на поставленные вопросы, рассмотрим, как формируются понятия, доступные ощущениям.

В сознании человека отражается окружающий его мир. Органом сознания является мозг человека. Сам человек является частью мира, он включен в него. Однако, можно условно вычленив, противопоставить его внешнему миру (рис. 18).

Как говорят философы, мир дан человеку в его чувственных ощущениях. Количественные оценки различных ощущений были проведены в 50-е годы двадцатого столетия, когда был разработан метод *прямого субъективного шкалирования*. Суть его достаточно проста: человеку в произвольном порядке предъявляют стимулы различной природы и силы (например звук различной громкости), которые он произвольно в пределах какой-то шкалы оценивает. Несмотря на индивидуальные вариации, зависимость хорошо описывается психофизическим законом С. Стивенса: *сила ощущения пропорциональна величине стимула в степени b , где $b = const$* .

Для звука, света, вкуса и т. д. определены значения константы b . Введены единицы ощущений, названия которых звучат необычно: *брил* – для яркости света, *хрон* – для времени, *густ* – для вкуса, *вез* – для тяжести и т. д. Метод субъективного шкалирования показывает человека в качестве универсального измерителя, даже таких свойств, которые другими приборными средствами не поддаются количественным измерениям (это, например, вкусовые ощущения или запахи).

Обычный путь формирования понятий в сознании человека – от чувственных ощущений к суждениям и моделям. Ощущение всегда первично, на его основе формируется интуитивный образ, затем он выражается вербально (словами) и фиксируется в понятии. Ряд взаимосвязанных понятий образуют модель объекта или процесса.

Как показывает рис. 18, на субъекта воздействуют потоки энергии и вещества, поставляющие ему информацию. Сознание его принимает и преобразует поступающую информацию. Преобразование необходимо объективно, в принципе: Часть не может быть равна Целому. Чтобы отражать Вселенную в сознании без искажений, как слепок или реплику, потребуется такая же Вселенная.

В процессе преобразования информация сжимается, концентрируется или обрезается за счет отбора главного, из-за недостаточного числа каналов восприятия или их малой чувствительности. Это значит, что отражение реальности в сознании человека всегда неполно, в определенной мере искажено, так как любой канал приема-преобразования информации обладает ограниченными возможностями.

Очевидно, что для более полного и точного представления об окружающем мире одного способа локации, ориентации и т. д. недостаточно. Возможно поэтому природа «подстраховалась» и в процессе эволюции снабдила человека мозгом с двумя полушариями (рис. 19). Кроме того, в строении мозга человека выделяются три последовательных

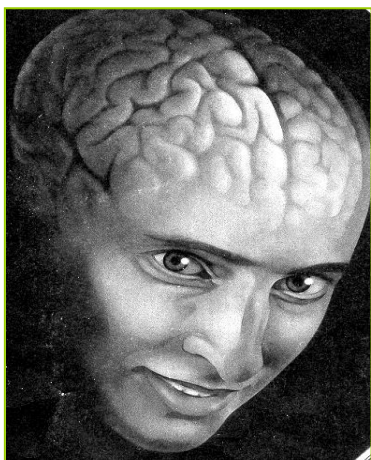


Рис.19. Двухполушарное строение мозга

эволюционных слоя: старый мозг, лимбическая система и неокортекс (новая кора). С названными слоями связаны различные психические функции. Старый мозг определяет биологический, рефлекторный уровень поведения человека. Лимбическая система ответственна за эмоции, а неокортекс – за рассудочную деятельность.

Три слоя и два полушария реализуют разные принципы обработки информации, два преимущественных типа мышления: рационально-логическое и эмоционально-образное. Первый тип мышления преимущественно связан с левым полушарием, второй тип – с правым. Наличие двух полушарий с различной функциональной специализацией позволяет человеку производить параллельную обработку информации. Как правило, все же наблюдается асимметрия мозга – у женщин преобладает правый «сопроцессор», у мужчин – левый.

Ассоциативно-образное, интуитивное, эмоциональное мышление обычно нечетко выражено, расплывчато, субъективно. Примерами могут быть понятия: Счастье, Красота, Любовь... Такое мышление характерно для представителей гуманитарной культуры с доминирующим правым полушарием. Приведем в качестве примера строки из песни Ю. Шевчука:

Что такое осень? Это небо, плачущее небо под ногами...

При недостатке образного мышления человеку будет странным, что небо под ногами, да еще плачущее.

Еще более парадоксальным будет отрывок из стихотворения Н. Оброковой:

Скажи, чем пахнет свет Луны?

На что похожа тени тень?

А доброта какой длины?

Куда ушел вчерашний день?

Можно привести и другие примеры ассоциативно-образного мышления.

Рациональное мышление (левое полушарие) ответственно за область интеллекта, функции которого – четко различать, разделять и сравнивать, измерять и распределять по категориям (раскладывать все по «полочкам»). Точность и логичность рациональных определений достигается за счет отвлечения от конкретных, но не важных деталей. Пример наибольшего абстрагирования дает математика – абстрагирование до символов в алгебре или теории групп, в геометрии Лобачевского и Римана. В табл. 4 приведено сопоставление характеристик мышления двух полушарий.

Таблица 4

Характерные особенности мышления человека

Левое полушарие	Правое полушарие
Последовательное и дискретное	Одновременное и непрерывное
Вербальное и символьное	Невербальное и иконическое
Абстрактное и отвлеченное	Конкретное и образное
Рациональное и формальное	Интуитивное и иррациональное
Логически связанное	Свободная комбинация образов

Рационально-логическое мышление может быть описано на языке символов и знаков, формализовано. Это позволяет использовать компьютеры для решения многих научных и производственных проблем. Однако при решении плохо формализуемых задач компьютеры (точнее, программное обеспечение) нуждаются в интуиции и опыте образного мышления экспертов.

С двумя типами мышления связаны два пути освоения объективной реальности субъектом. Путь веры и путь рассудка (логики).

На первом пути вырабатываются понятия и способы их использования в искусстве, религии, мистицизме, обобщая – в гуманитарной культуре, в широком смысле этого слова.

На втором пути создаются научные гипотезы и теории, проверяемые в воспроизводимых явлениях, допускающих количественные измерения или вероятностные оценки.

Можно ли задать вопрос: *какой путь – путь истины?* Здесь следует отметить, что по содержанию данный вопрос не отличается от такого, например: *«Что лучше: 1 кг или 1 с?»*

Понятийные системы пути Веры и пути Рассудка (иногда подменяют Разума) не тождественны. И «единицы измерения», действующие в одной культурной компоненте, не подходят для «проведения измерений» в другой. Фраза одного из авторитетов христианства *«Верую, ибо абсурдно»* не лишена содержания. Просто на пути Веры не применимы доводы научного мышления.

Рациональные, логичные и упрощенные модели разрабатываются по методологическому принципу редукции – сведения сложного к более простому, составного к элементарному; к упрощенной структуре какого-либо объекта или процесса. Такие модели быстрее запоминаются, их легче понимать. Но при этом существует и их негативная сторона.

- Мы запоминаем простые модели, привыкаем к ним и начинаем подменять сложную многогранную реальность упрощенными представлениями.
- Мы привыкаем к ожиданию простых схем, связей, простых структур в сложной действительности или объектах. Ожидаем простых рецептов изменения экономики или общественного уклада.

Конечно, планетарная модель атома проста, но простота еще не гарантирует учета всех свойств электрона и ядра. Модель верна в той только части, что размеры центральной, положительно заряженной области атома (ядра) малы. Движение же электрона как движение материальной точки по траектории – это слишком упрощенные представления для микрочастицы.

При знакомстве с реальностью микромира, вместо естественных рецепторов человеку приходится полагаться на рецепторы искусственные, т. е. на детекторы излучений и частиц. Приборы становятся продолжением естественных органов чувств. Они помогают реально проникнуть в неведомый мир и его исследовать. Но при этом путь формирования понятий усложняется. Здесь нет привычных ощущений, восприятие необходимо становится логическим, образы во многом абстрактны, слова описания непривычны. Необычны и модели частиц микромира. Поэтому при освоении микромира необходимо использовать резервы интуиции, образного мышления, воображения.

Нельзя не привести здесь фразу Альберта Эйнштейна: *«Воображение более важно, чем знание».*

2.2. Первичная аксиоматика квантовой механики

Классическая механика рассматривает электрон как материальную частицу, траектория которой при движении в атоме представляет собой замкнутую *кривую* второго порядка, например окружность. Условием нахождения электрона на круговой орбите является равенство кулоновской силы притяжения его к ядру центростремительной силе.

Классическая электродинамика утверждает, что при движении с ускорением (в том числе – центростремительным) любая заряженная частица является источником электромагнитных волн. Мощность излучения пропорциональна второй степени ускорения, и при той величине ускорения, которое действует (по классической механике) на электрон в атоме, он должен излучить всю свою энергию в виде электромагнитных волн за время порядка 10 нс.

Опыт показывает, что излучение атома происходит не всегда, в обычных условиях атомы не излучают энергии. Возникает противоречие: либо планетарная модель неверна, либо теория Максвелла не применима в области атомных размеров ($\sim 10^{-10}$ м).

Попыткой «спасти» нуклеарно-планетарную модель атома явились постулаты квантовой теории Нильса Бора. Рассмотрим их смысл, не приводя тех определений, которые есть в любом учебнике физики.

Постулаты Бора:

1. Утверждается существование состояний атома, для которых процесс излучения энергии запрещен. Это так называемые стационарные состояния атома.

2. Вводится правило для нахождения стационарных состояний атома. Оно заключается в приравнивании значений механического момента импульса движения электрона по орбите целочисленному ряду значений постоянной Планка, деленной на 2π :

$$m V r = n h / 2\pi , \quad (2)$$

где n – целое число 1,2,3,...

3. Разрешается процесс электромагнитного излучения или поглощения при переходах электрона между двумя стационарными энергетическими состояниями.

Что нового дают постулаты Н. Бора?

Чтобы ответить на этот вопрос, сопоставим выражение для третьего постулата с выражением классической механики для равенства электростатической силы взаимодействия электрона с протоном центростремительной силе, удерживающей электрон на круговой орбите:

$$mVr = \frac{h}{2\pi} n, \quad \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = \frac{mV^2}{r_n}. \quad (3)$$

Отсюда следуют формулы для расчета величин радиусов электронных орбит и соответствующих им энергий. Так, для энергии можно получить выражение:

$$E = -\frac{me^4}{8\epsilon_0 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}. \quad (4)$$

Отметим, что планетарная модель Э. Резерфорда никакой информации на этот счет не давала.

Зная численные значения для уровней энергии, Н. Бор смог рассчитать спектр излучения атома водорода и сравнить теоретические значения с экспериментальными данными, полученными в разное время другими учеными, в частности Ангстрёмом (табл. 5).

Таблица 5

Сопоставление теоретических и экспериментальных значений для линий излучения атома водорода в ультрафиолетовой части спектра

Линия	Теория Бора, нм	Эксперимент Ангстрёма, нм
$H\alpha$	656,208	656,210
$H\beta$	486,074	486,080
$H\gamma$	434,00	434,01
$H\delta$	410,13	410,12

Приведенные в табл. 5 данные показывают очень хорошее, с точностью до сотых долей нанометров, согласие численных значений, что свидетельствует об адекватности теории атома водорода Н. Бора эксперименту. В то же время для многоэлектронных атомов были очевидны различия в экспериментальных наблюдениях и теоретических предсказаниях. Это потребовало модификации теории Бора.

А. Зоммерфельдом был предложен дополнительный постулат, открывающий возможности рассмотрения не только строго круговых орбит (как в теории Бора), но и вытянутых эллиптических орбит. В соответствии с дополнительным постулатом в теорию вошло дополнительное квантовое число (l), которое получило название *орбитального*.

Квантовое число (n), которое входит в третий постулат Бора, стали называть *главным*. Оно определяет основные уровни энергии, тогда как орбитальное квантовое число определяет *подуровни энергии*, которые

можно наблюдать только при помещении атома в однородное магнитное поле. Позднее в теорию Бора были добавлены так называемые *магнитное* (m) и *спиновое* (s) квантовые числа. Дополнение механистической планетарной модели Резерфорда квантовыми постулатами Бора, Зоммерфельда, Паули и др. приводит к согласию экспериментальных данных по спектрам многоэлектронных атомов с теоретическими расчетами. Это было показано в статье Н. Бора с сотрудниками (1924 г.), иллюстрация из которой приведена на рис. 20.

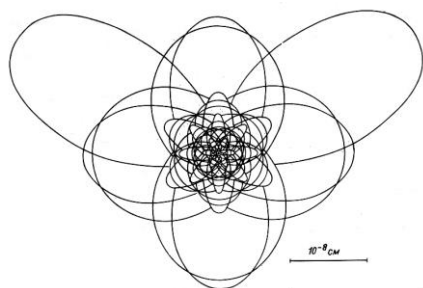


Рис. 20. «Портрет» атома радиуса, полученный в квантовой теории

На рис. 21 показаны две основные модели (образы), используемые в квантовой механике Бора.

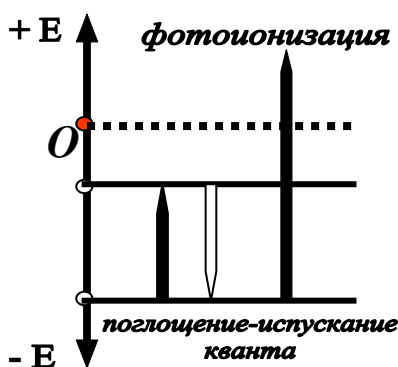
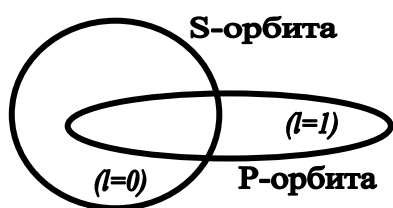


Рис. 21. Две схемы, иллюстрирующие понятия квантовой теории Бора

Во-первых, это образ непрерывных пространственных траекторий различной формы вытянутости, по которым предполагается движение электронов как точечных материальных частиц, несущих электрический заряд. Во-вторых, это модель дискретных скачков между энергетическими уровнями атома, которые совершают электроны.

Вполне понятно, что в единую теорию оказались введены противоположные по смыслу понятия непрерывности и дискретности. Критики квантовой механики говорят, что такая теория внутренне противоречива в своих основаниях, т. е. непоследовательна в выборе способов описания движения электрона.

Чтобы пояснить ситуацию более наглядно, на рис. 22 показан аналогичный художественный прием в гуманитарной культуре – прием совмещения в общем изображении совершенно различных объектов – части женского лица и части головы кошки. Однако то, что может быть

достоинством в гуманитарной культуре, вызывая эмоции зрителей, воспринимается как недостаток в научной теории.



(Feline)

Рис. 22. Соединение различных образов

Кроме того, постулаты Бора введены (не доказываются!) в теорию эвристическим приемом, в надежде, что при дальнейшем развитии естествознания можно будет найти какие-либо доводы в обоснование верности постулатов.

Понимание необходимости поиска причин появления дискретных состояний атома и характеризующих эти состояния целых чисел, а также устранения противоречия между дискретностью в одном и непрерывностью в другом, стимулировало исследования как теоретиков, так и экспериментаторов.

2.3. Квантово-волновая концепция атома

Развитие этой концепции началось в работах Луи Дебройля, предложившего объяснение того факта, что радиусы орбит электронов в атоме водорода и других атомах не могут принимать произвольные размеры. Он использовал аналогию со стоячими волнами на струнах, известными в классической механике (рис. 23).

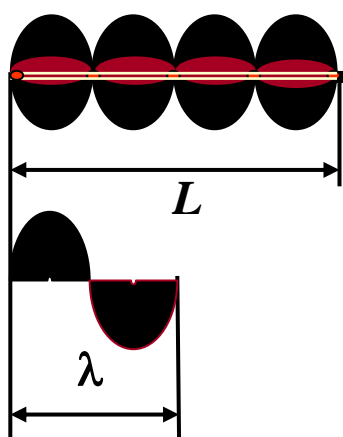


Рис. 23. Стоячие волны на струне

Условие возникновения стоячей волны на закрепленной по концам струне является равенство:

$$L = n\lambda,$$

где L обозначает длину струны, n – целое число, а λ обозначает длину бегущей волны.

В этом явлении две встречные волны в суперпозиции образуют стоячую волну, положения максимумов и минимумов которой не сдвигаются с течением времени. Если струну сомкнуть концами, образуя окружность (обруч), то её длина будет связана с радиусом известным соотношением $L = 2\pi r$. Условие стоячих волн на обруче будет записано в виде

$$2\pi r = n\lambda.$$

Аналогия состояла в возможности представить движение электрона в виде модели стоячих электронных волн, для которых нет необходимости использовать понятие траектории (см. рис. 24).

Чтобы найти выражение для длины электронной волны, решим систему двух уравнений – одно из них будет представлять условие стоячих волн на кольцевой струне, другое будет выражать третий постулат Бора.

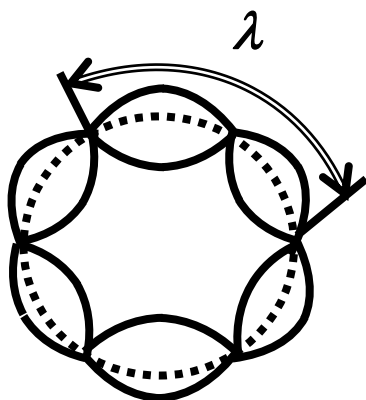


Рис. 24. Схема стоячей электронной волны

$$2\pi r = n\lambda,$$

$$mVr = \frac{mh}{2\pi}.$$

Разделив одно выражение на другое, получим формулу для длины волны Дебройля:

$$\lambda = \frac{h}{mV}, \quad (5)$$

где произведение массы на скорость электрона представляет собой механический импульс частицы, h – постоянная Планка.

Как видно из полученной формулы, параметр волнового процесса (длина волны) выражается через импульс частицы. Поэтому можно сказать, что формула Дебройля переводит описание процесса движения частицы с языка механики на язык волнового движения.

Согласно Дебройлю, причина квантования энергии и размеров орбит Бора заключена в волновых свойствах электрона.



Рис. 25. К. Дэвисон и Л. Джермер

Отметим, что в данном случае работа французского ученого была чисто теоретической, без каких-либо экспериментальных предпосылок. Однако после ее появления были проведены исследования, в которых экспериментально обнаружены проявления волновых свойств электронов вне атомов.

В частности, это были исследования дифракции электронов на кристаллах, выполненные К. Дэвисоном и Л. Джермером в 1923 г. (рис. 25). Уместно процитировать письмо Э. Шредингера, написанное в то время:

Некоторые исследователи – Девисон, Джермер и молодой Томсон приступили к выполнению опытов, за которые еще несколько лет назад их бы поместили в психиатрическую больницу для наблюдения за их душевным состоянием. Но они добились успеха!

Эти опыты показали наличие волновых свойств у электронов. Каждый отдельный свободный электрон в определенных условиях проявляет свойства волны – дифракцию.

Рассчитанная по формуле дифракции электромагнитных волн (рентгеновских лучей) на кристаллах, длина волны для первого максимума дифракции в опытах Дэвисона и Джермера равнялась 16,7 нм. Рассчитанная для условий эксперимента, длина волны Дебройля равнялась 16,5 нм. Сравнение ожидаемых длин волн с найденным в эксперименте значением оказывается показательным, вполне подтверждающим идею существования у электронов волновых свойств.

В экспериментах Д. П. Томсона (сына Дж. Дж. Томсона) электроны, ускоренные до энергии 10 кэВ, пролетали через тонкую (0,1 мкм) пленку золота. На фотопластинке фиксировалась картина дифракции, аналогичная дифракции рентгеновских лучей. Сходство рентгенограмм подтверждало идею Дебройля.

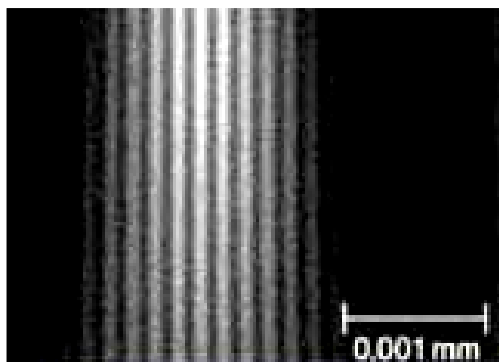


Рис. 26. Картина интерференции электронов в опытах К. Йенсена

В 1961 г. К. Йенсен выполнил эксперимент по наблюдению интерференции электронов по схеме классических для оптики опытов Юнга с двумя щелями. Картина полос интерференции электронов и света (электромагнитных волн) имеет удивительное сходство (рис. 26).

Этот эксперимент К. Йенсена, по мнению многих физиков, является одним из самых красивых экспериментов в естествознании.

В принципе, формула для волны Дебройля не ограничена видом микрочастицы и может быть применена и для протонов, и для нейтронов, даже для атомарных пучков. Проведенные в различных лабораториях мира эксперименты по дифракции протонов и нейтронов на кристаллах подтверждают это положение. Более того, сравнительно недавно, в 1991 г., О. Кэрнел и Дж. Млинек добились успеха в опытах по интерференции на двух щелях атомов гелия. Приведенные примеры показывают, что волновые свойства присущи всем микрочастицам. Формула Дебройля имеет фундаментальное значение в современном естествознании.

2.4. Соотношение неопределенностей Гейзенберга

Замена модели движения электрона как материальной точки на модель распространения электронных волн приводит к определенным проблемам. Дело в том, что описание движения материальной точки, по законам Ньютона, основано на предположении о знании в каждый момент времени точного значения двух параметров – координаты материальной точки и ее импульса (т. е. массы и скорости частицы, принимаемой за материальную точку).

Наличие волновых свойств у частиц микромира «мешает» одновременному определению координаты и импульса. Поясним ситуацию на уровне качественных рассуждений. Для этого сравним два различных волновых пакета (или цуга волн), изображенные на рис. 27.

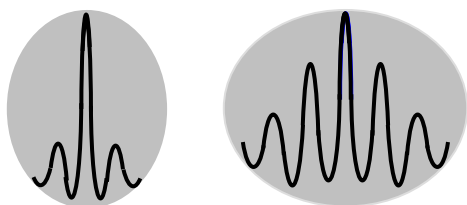


Рис. 27. Сравнение двух волновых пакетов

Для первого пакета неопределенность (здесь можно также сказать – погрешность измерения) координаты будет меньше, т. к. пакет относительно узкий. Для другого, более широкого пакета, с большим числом максимумов и минимумов, неопределенность по координате будет больше.

С другой стороны, достаточно очевидно, что погрешность измерения величины длины волны по расстоянию между ближайшими максимумами в первом пакете будет больше (меньше серия измерений). Для широкого пакета есть возможность выполнения большего числа измерений, поэтому средняя арифметическая величина погрешности по многим измерениям длины волны будет меньше.

Из школьного курса лабораторных работ известна формула определения относительной погрешности результата деления:

$$a = \frac{b}{c} \Rightarrow \frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta c}{c}.$$

Так как длина волны Дебройля и величина импульса связаны между собой делением постоянной Планка на импульс, можно записать (пренебрегая относительной погрешностью измерения постоянной Планка):

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{\Delta P}{P} \Rightarrow \Delta \lambda = \Delta P \left(\frac{\lambda}{P} \right).$$

Для качественной оценки можно заменить $\Delta \lambda$ на пропорциональную ей величину ΔP . Таким путем мы приходим к качественному

выводу: чем меньше погрешность измерения координаты, тем больше погрешность определения импульса.

Более строгое количественное рассмотрение вопроса о соотношении погрешностей для координаты и импульса было дано В. Гейзенбергом. Оно было дано с самых общих позиций квантовой механики и носит название соотношения неопределенностей.

Почему не погрешностей? Потому, что термин *погрешность* относится к процедурам измерений, выполняемым экспериментатором. А *неопределенность* имеет принципиальный характер свойств микрочастиц и не зависит от наблюдателя.

Знаменитая формула соотношения неопределенностей имеет вид:

$$\Delta P_x \Delta X \geq \frac{h}{2\pi}. \quad (6)$$

Аналогичная формула получена для соотношения неопределенностей энергетического состояния и времени его наблюдения:

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}. \quad (7)$$

Какие выводы из приведенных теоретических соотношений следуют для эксперимента? Если мы точно измеряем значение координаты частицы так, что неопределенность её стремится к нулю, $\Delta X \rightarrow 0$, то теряется значение дополнительного свойства – значения импульса, так как ΔP будет стремиться к бесконечности:

$$\Delta P = \frac{h}{2\pi} \Delta X \rightarrow \infty.$$

То же самое относится и к величине энергии квантового состояния. Для Δt , стремящихся к нулю, ΔE имеет бесконечно большую неопределенность. Любые значения, даже самые большие, возможны внутри этого интервала неопределенности.

Таким образом, либо мы получаем информацию о положении микрочастицы, либо о её импульсе. Это свойство квантовых объектов академик В.А. Фок назвал *«относительностью к средствам наблюдения в одной и той же системе координат»*.

В связи с обсуждаемыми здесь вопросами, важно отметить ещё два обстоятельства.

1. В макромире мы можем наблюдать движение объекта, практически не влияя на процесс его движения, – наблюдаемое не зависит от наблюдателя. Другое дело в микромире. Здесь любой акт наблюдения, съёма информации о состоянии процесса, о положении частицы сопровождается изменением состояния, иначе невозможно. Прочитируем

академика А.Б. Мигдала [10]. «Для того чтобы определить положение электрона, нужно осветить его и посмотреть в «микроскоп». Такой способ определения координаты дает неопределенность δX порядка длины волны λ использованного света: $\delta X \cong \lambda$. Для уточнения положения электрона надо брать возможно меньшую длину волны света. Но это палка о двух концах. При взаимодействии с электроном свет передает ему импульс. Чтобы уменьшить передаваемый импульс, можно ослабить интенсивность света так, чтобы с электроном взаимодействовал один фотон. Минимальный передаваемый электрону импульс будет порядка импульса одного кванта.

Этот импульс связан с длиной волны соотношением $p = h/\lambda$, поэтому неопределенность импульса электрона будет равна или больше величины самого импульса:

$$\delta p > h / \lambda.$$

Умножив на λ , и подставляя δX вместо λ , получаем $\delta X \delta p > h$, т. е. соотношение неопределенностей Гейзенберга».

Но передача электрону импульса означает вмешательство наблюдателя в процесс движения свободного электрона, и следовательно зависимость наблюдаемого от самого наблюдателя. Таким образом, в микромире невозможны невозмущающие измерения!

Вывод из проведенного нами мысленного эксперимента с определением положения свободного электрона: *в микромире наблюдатель становится соучастником процесса измерения, от действий которого зависит и последующая история микрообъекта наблюдения.*

2. Другое важное отличие квантовой механики от классической механики в том, что из соотношения Гейзенберга следует принципиальная невозможность предсказать исчерпывающе точную траекторию движения микрочастицы. В самом деле, определив точную координату для данного времени наблюдения, мы потеряем информацию об импульсе частицы, т. е. направление скорости её движения будет неопределенным в широком диапазоне величин и направлений.

Как же тогда рассчитать новое положение частицы для следующего момента времени?

Поскольку одновременно и точно узнать связанные соотношением Гейзенберга параметры нельзя в принципе, это значит, что уравнения классической механики Ньютона для микромира будут неадекватными, они теряют силу для микрочастиц с волновыми свойствами.

Теоретическое решение проблемы описания состояний электрона в атоме водорода и в свободном состоянии, учитывающее волновые свойства микрообъектов, было найдено Э. Шредингером.

2.5. Уравнение Шредингера

Эрвин Шредингер дал описание состояний связанных микрочастиц, в том числе и электрона в атоме водорода, на языке волновых функций. Каждому энергетическому состоянию соответствует своя волновая функция. Если для данного значения энергии имеются несколько волновых функций, то такое состояние называют вырожденным по энергии.

Для нахождения конкретного вида функций необходимо решить волновое уравнение, которое может быть записано с включением в него длины волны Дебройля. Фактически подход Э. Шредингера был развитием идеи Дебройля о применимости волнового описания для движения микрочастиц.

В общем виде математическая запись уравнения Шредингера представляет собою дифференциальное уравнение в частных производных второго порядка (имеются вторые производные по трем координатам).

Для основного состояния атома водорода оно упрощается, особенно если записать его в сферической системе координат:

$$\frac{d^2\Psi}{dr^2} + \frac{8\pi^2m}{h^2}[E - U(r)]\Psi = 0. \quad (8)$$

Здесь греческая буква Ψ (*пси*) обозначает волновую функцию,

E – полную энергию данного состояния,

$U(r)$ – потенциальную энергию взаимодействия электрона с ядром атома,

h – постоянную Планка,

m – массу электрона.

В более общем виде в уравнение (8) необходимо добавить производные по угловым координатам.

Для основного состояния атома водорода при $n = 1$ решение уравнения Шредингера для радиальной волновой функции имеет вид:

$$\Psi_{1s} = \frac{1}{\sqrt{\pi r_1^3}} \exp\left(-\frac{r}{r_1}\right).$$

В этой записи r_1 обозначает радиус первой орбиты Бора,

r – радиальную координату.

Эта функция имеет максимальное значение при $r = r_1$ и убывает по величине на 99% от максимального значения на расстоянии $r = 5r_1$ от центра атома водорода (см. рис. 28). Иными словами, волновая функция заметно выходит за пределы первой боровской орбиты. Однако более важным является то, что величина энергии основного состояния в

подходе Шредингера точно совпадает с величиной энергии, рассчитываемой по теории Бора.

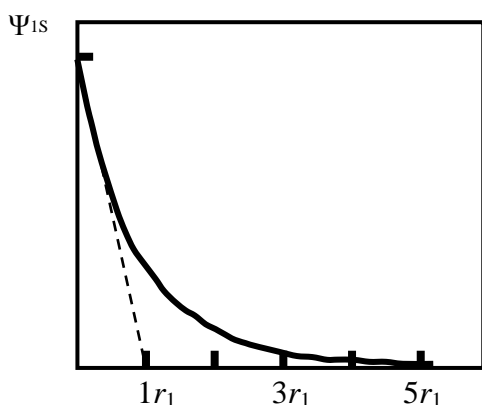


Рис. 28. График волновой функции основного состояния атома водорода

Для других состояний, чем больше главное квантовое число n , тем более сложной становится математическая запись решения, появляются зависимости от квантовых чисел l , m и s .

С точки зрения теоретического предсказания спектра энергетических уровней электрона в атоме водорода, теория Шредингера и теория Бора равноценны, приводят к одинаковым результатам. Принципиально новое появляется в подходе к описанию движения электрона в атоме водорода.

Мы уже отмечали, что в теории Бора используется модель движения материальной точки по вполне определенной замкнутой траектории с центростремительным ускорением. Именно ускорение приводит к противоречию планетарной модели с электродинамикой Максвелла.

В теории Шредингера нет места понятию траектории и центростремительному ускорению, а значит устраняется и противоречие классической электродинамики. Это существенное преимущество волнового описания. Но как волновые функции определяют пространственное положение электрона в атоме?

Это был достаточно сложный, проблемный вопрос в физике микромира. Ответ на него был дан в трудах Макса Борна и его последователей. М. Борн показал теоретически, что **физический смысл имеет не сама по себе волновая функция Ψ , а квадрат модуля ее $|\Psi|^2$** . Отметим, что модуль устраняет возможные отрицательные значения волновой функции, а операция возведения в квадрат устраняет из решения мнимые величины. В результате всегда получаются положительные и реальные величины.

Согласно выводам М. Борна, квадрат модуля волновой функции определяет *плотность вероятности* нахождения электрона (или иной микрочастицы, для которой найдена волновая функция), т. е. вероятности, отнесенной к бесконечно малому объему вокруг данной точки пространства. Умножая значение плотности вероятности на величину малого, но конечного объема dV вокруг выбранного положения (x, y, z)

в определенной системе координат, можно рассчитать значение самой вероятности $W(x, y, z)$ нахождения в этом объеме электрона:

$$W(x, y, z) = |\Psi(x, y, z)|^2 dV. \quad (9)$$

По определению, вероятность получения какого-либо результата выражают положительным числом в интервале от нуля до единицы.

Таким образом, квантово-волновое описание вместо электронных траекторий вокруг ядра предлагает *вероятностные распределения* заряда и массы электрона в пространстве вокруг ядра атома. В стационарных состояниях эти распределения не изменяются. Если мы будем искать вероятность нахождения электрона в шаровом слое дифференциально малого объема $dV = 4\pi r^2 dr$, то получим следующее выражение для плотности вероятности:

$$\frac{d\Psi}{dr} = \frac{1}{\pi r_1^3} \exp\left(-\frac{2r}{r_1}\right) 4\pi r^2. \quad (10)$$

Взяв первую производную для выражения в правой части равенства и приравняв ее нулю, можно найти, что максимум распределения плотности вероятности нахождения электрона на заданном расстоянии от центра атома водорода имеет максимум на расстоянии, совпадающем с радиусом первой орбиты в теории Бора. В этом проявляется определенная связь двух теорий. Отметим, что в основном состоянии атома водорода распределение плотности вероятности имеет сферическую симметрию.

Для более высоких энергетических уровней объемные картины распределений электронной плотности (можно и так интерпретировать вероятностную картину) имеют преимущественные направления вдоль осей координат или по диагональным направлениям, иногда образуют кольцевые фигуры. Но чем дальше от ядра находится энергетический уровень, тем более выравнивается картина распределения и становится в общих чертах похожей на картину стоячих механических волн на кольцевой струне.

Можно сказать, что модель стоячих электронных волн Дебройля описывает в первом приближении электронную оболочку с большими номерами энергетических уровней. По мере перехода к ядру атома модель становится неадекватной.

В заключении главы 2 коснемся вопроса о соотношении динамических и статистических законов природы. Как было отмечено в п. 2.1, познавая мир, человек описывает его в понятиях и моделях своего сознания (разума). Обобщение знаний в определенной области выражается в виде законов – в символьных кратких обозначениях связей (взаимодей-

ствий) между свойствами объектов или процессов. Это могут быть математические, химические, логические и другие символы в естественных и технических науках, словесные формулировки – в гуманитарных.

В зависимости от природы и механизма проявления связей различают законы динамические и статистические.

Динамические законы описывают поведение отдельного объекта в различных условиях, позволяют установить однозначную связь его состояний во времени. Эти законы причинно детерминированы, т. е. в явном виде указывают причины изменения состояния объекта или процесса (что от чего однозначно зависит). Случайные или неоднозначные связи исключаются из рассмотрения, ими пренебрегают.

Ценность таких законов – в установлении неизменного характера проявления связей в меняющихся условиях взаимодействия. Сами изучаемые объекты в познании заменяются их более простыми моделями, что ведет к упрощению математической записи основных законов.

Хорошими примерами подобного рода законов являются законы динамики Ньютона в классической механике. Детерминированный характер (знание однозначных причин изменения состояний объектов) позволяет дать долговременный прогноз развития событий в рамках механистической картины мира, например предсказать время наступления очередного затмения Солнца Луной. При этом реальные планеты подменяются их моделями в виде материальных точек.

Статистические законы описывают поведение больших совокупностей взаимодействующих объектов, для которых в любой из моментов времени невозможно предсказать точные значения состояний для индивидуально выбранного объекта (например молекулы в газе). Для отдельного объекта здесь можно дать только вероятностную оценку его состояния в данный момент времени.

Приведем пример из молекулярной физики, считая каждую из молекул небольшим твердым, абсолютно упругим шариком. Результат столкновения двух молекул будет неоднозначным, так как отклонение налетающей частицы от начального направления движения будет зависеть от случайного положения рассеивающей молекулы на пути первой (рис. 29).

При столкновении по варианту *a* частица отклонится вниз, по варианту *c* – вверх, а по варианту *b* она будет отражена назад. Поэтому после нескольких столкновений предсказать траекторию движения молекулы будет невозможно. Именно случайный

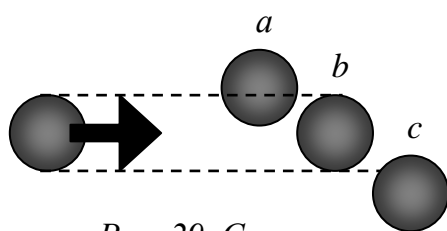


Рис. 29. Схема столкновения частиц

характер столкновений «стирает» информацию о состоянии отдельной частицы. В таких ситуациях используют общие для всего ансамбля частиц характеристики, которые остаются устойчивыми, неизменными, несмотря на хаотическое, случайное движение отдельных частиц в системе. Таково понятие температуры газа в термодинамике. Для отдельно взятой частицы понятие температуры не применимо.

Несмотря на различие приведенных описаний двух видов законов, между ними нет четкой границы. Динамические законы переходят в статистические при увеличении числа взаимодействующих объектов и при наличии флуктуаций состояний образующейся системы. Можно сказать, что динамические законы есть частные случаи статистических законов.

При подходе с другой стороны можно ожидать перехода статистического закона в динамический, если всю совокупность частиц можно описать (хотя бы приближенно) поведением и свойствами одного из элементов системы.

Следует отметить, что рассмотренный переход между двумя видами законов природы дает нам пример проявления принципа соответствия в научной методологии. Он требует, чтобы более общая теория, в аппроксимации на область применения менее общей, переходила в нее «автоматически», в частности, ее формулы в этой области должны совпадать с формулами менее общей теории. В дальнейшем изложении нашего курса мы приведем и другие примеры выполнения принципа соответствия.

Движение электронов в атомах, как следует из квантово-волновой теории, описывается вероятностными (статистическими) законами. Аппарат теории вероятности разработан для случаев многократных (массовых) испытаний. Здесь вероятность реализации какого-либо результата есть отношение числа «выпадения» данного результата к общему числу испытаний. Это относится, например, к вероятности выигрыша в лотерею.

Но интерпретировать картину распределения электронной плотности вокруг ядра в таком описании, что в отдельный момент времени точечная частица-электрон находится в одном месте, а в следующий момент он «случайно» может оказаться совсем в другом, будет неправильным. Картину следует представлять себе именно по типу стоячей волны, когда волна едина, сохраняет свою целостность, несмотря на изменение ее формы в разных местах пространства (в одних местах – пучности, в других – узлы). Так и электрон сохраняет свою целостность, присутствуя *одновременно* во всей области вокруг ядра. Все точки на

рис. 27 образуют единую общую картину одновременно. Это необычно, но адекватно современному пониманию процессов в микромире.

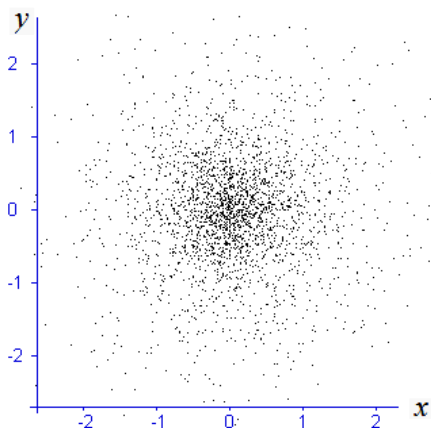


Рис. 27. Распределение вероятности нахождения электрона для основного состояния атома водорода

странственным координатам.

Таким образом, электрон и другие частицы микромира оказываются необычными объектами естествознания, у них проявляются свойства и частиц, и волн. Можно говорить о дуализме свойств материи, поскольку, со своей стороны, электромагнитные волны, особенно рентгеновского и гамма-диапазона, проявляют свойства *частиц*, например в эффекте Комптона. Этот эффект мы опишем позднее.

Чем короче длина волны электромагнитных волн, тем более они «ведут себя» подобно частицам (корпускулам). С другой стороны, чем больше масса частиц, тем менее проявлены их волновые свойства. Для частиц с величинами масс, которые встречаются на уровне макромира (мира привычных человеку масштабов), уже нет возможности зафиксировать проявления их волновых свойств.

Для рационального мышления дуализм свойств одного и того же физического объекта представляется невозможным. Срабатывает бинарная логика Аристотеля: или частица, или волна. Третьего не дано! Подобного «не может быть!»

Поэтому при изучении микромира необходима смена стереотипов мышления. Здесь для выработки нового понятийного аппарата, адекватного квантовой объективной реальности, приходится использовать обе половины человеческого мозга, подключая ассоциативно-образное, интуитивное мышление к рационально-логическому.

Учет целостности состояния электрона при его нахождении в связанном состоянии в атоме водорода производится так называемым условием нормирования волновой функции. Поскольку максимальное значение вероятности равно единице, условие нормирования выражается красивой математической записью:

$$\iiint |\Psi(x, y, z)|^2 dx dy dz \equiv 1. \quad (11)$$

Здесь интегрирование квадрата модуля волновой функции производится в пределах от минус бесконечности до плюс бесконечности по всем трем про-

Используя метод аналогии, можно поискать в макромире объекты, имеющие неразрывно связанные свойства (или качества). Например, возьмем в руку юбилейную монету. Она имеет аверс (переднюю сторону) с указанием стоимости и реверс с символическим изображением. Одновременно увидеть аверс и реверс (орел и решку) обычно не удается. Да и падает монета на землю по принципу «либо орел, либо решка». Тем не менее, вполне очевидно, что у монеты есть *неразрывное единство* двух противоположных свойств, двух информационно значимых и различных сторон.

Отмечая необходимость учета разных сторон действительности микромира, Нильс Бор сформулировал принцип дополнительности. В одной из своих публикаций он писал:

Какими бы противоречивыми ни казались получаемые в различных условиях опытные данные, их надо рассматривать как дополнительные в том смысле, что они представляют одинаково существенные сведения об атомных системах, и, взятые вместе, они исчерпывают эти сведения.

Позднее принцип дополнительности стал использоваться в широком смысле – как общефилософский – и в гуманитарной культуре. Здесь он понимается как необходимость порой несовместимых, но взаимодополняющих точек зрения для полного понимания предмета обсуждения.

Задания для самостоятельной работы

1. Запишите в рабочей тетради, к какому типу (по преимуществу) отнесете Вы свое мышление. Приведите аргументы, на основании которых Вы пришли к этому выводу.
2. Приведите пример из гуманитарной культуры, для которого необходимо (желательно) использовать общее понимание принципа дополнительности Бора (или он был использован).
3. Рассчитайте величину волны Дебройля для массы, равной 10 кг и скорости 10 м/с (близкой к рекорду на стометровке). Есть ли в макромире или в микромире объекты с такими размерами?
4. Найдите пример неразрывного единства каких-либо свойств в едином физическом (или гуманитарном) объекте (или процессе).
5. Используя математические выражения (3), получите формулу для радиуса орбит Бора. *Указание:* Выразите скорость V через радиус r в первом выражении и подставьте V во второе.