

ЧАСТЬ 4. ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

КОРПУСКУЛЯРНО – ВОЛНОВОЙ ДУАЛИЗМ

ЧАСТИЦ МАТЕРИИ

Есть две формы существования материи: вещество и поле. Вещество состоит из частиц, «сцементированных» полем. Именно посредством поля осуществляется взаимодействие частиц и тел друг с другом. Само поле распространяется в виде волны.

Частица вещества или тело представляют собой порцию массы. При движении частиц происходит и перенос энергии. Волна также переносит энергию, но в случае волны перенос энергии **не сопровождается переносом массы**. Таким образом, мы имеем два разных потока энергии: энергия, переносимая с потоком частиц, и энергия, переносимая волной, например – луч света. Каждый из этих потоков обладает **отличительным признаком**.

При встрече двух потоков частиц (по латыни – корпускул) происходят соударения и рассеяние частиц по законам удара, в то время как два луча света свободно проходят друг через друга. Следовательно, удар является отличительным признаком потока частиц.

Волны обладают способностью к интерференции и дифракции. Так два луча света, пришедшие в одну точку, могут при определенных условиях погасить друг друга, чего никогда не произойдет с двумя потоками частиц. Следовательно, интерференция и дифракция являются отличительными признаками волнового потока.

Потоки энергии	Отличительные признаки
Поток частиц (перенос массы)	Удар
Волна (без переноса массы)	Интерференция и дифракция

В классической физике эти два потока энергии строго разделяются, и в каждом конкретном случае мы имеем дело или с потоком частиц (корпускул)

или с волной. Однако при определенных условиях, когда действуют законы квантовой механики, потоки частиц вещества проявляют способность к интерференции, что свидетельствует об их волновых свойствах. При других определенных условиях волны обнаруживают некоторые свойства частиц и даже способность к удару, что свидетельствует об их корпускулярных свойствах.

В тех физических явлениях, которые подчиняются законам квантовой механики, мы имеем дело с квантовыми частицами – волнами. **Вещество состоит из частиц, построенных из фундаментальных фермионов, а поле состоит из частиц, называемых векторными бозонами.** И частицы вещества, и частицы поля в различных явлениях ведут себя или как классические частицы, или как волны. В этом заключается так называемый корпускулярно – волновой дуализм частиц материи.

В качестве примера можно рассмотреть поведение пучков света и электронов. В эффекте Комптона пучок света при взаимодействии с электронами ведет себя подобно маленьким бильiardным шарам, а пучок электронов при отражении от поверхности кристалла дает дифракционную картину.

КОРПУСКУЛЯРНЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА. ФОТОНЫ

Электромагнитное поле распространяется в пространстве в виде электромагнитных волн, которые обычно называются светом. Однако процессы излучения и поглощения света веществом свидетельствуют о том, что энергия электромагнитного поля существует в виде порций энергии, называемых квантами, и эта порция энергии ведет себя как частица, названная фотоном. Масса покоя фотона равна нулю. Фотон обладает энергией

$$E_{\gamma} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

и импульсом

$$p = \frac{E_{\gamma}}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

При прохождении света через вещество был обнаружен в буквальном смысле удар фотонов с электронами, сопровождающийся передачей части энергии и импульса от фотона к электрону – уже упомянутый ранее эффект Комптона. Именно удар как отличительный признак потока частиц свидетельствует о наличии у света корпускулярных свойств.

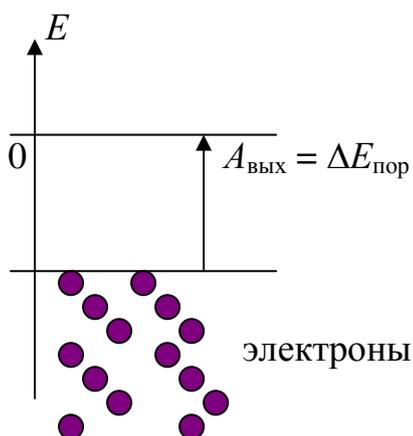
Взаимодействие света с частицами вещества связано с передачей порции энергии, равной некоторой пороговой энергии $\Delta E_{\text{пор}}$ системы частиц вещества. Корпускулярные свойства электромагнитного и других полей проявляются, если энергия фотона превышает эту пороговую энергию:

$$E_{\gamma} \geq \Delta E_{\text{пор}}.$$

ФОТОЭФФЕКТ

При попадании света достаточно большой частоты на поверхность металла из этого металла, как впоследствии выяснилось, вылетают электроны. Это явление получило название внешний фотоэффект и явилось одним из первых в истории физики свидетельств наличия у света корпускулярных свойств. Законы внешнего фотоэффекта были открыты русским физиком А.Г. Столетовым, а его теоретическое объяснение было дано А. Эйнштейном.

Металл представляет собой кристаллическую решетку из положительных ионов и так называемых «свободных» электронов. Эти «свободные» электроны не связаны с конкретными атомами, но они находятся в поле притяжения положительной кристаллической решетки и не могут покинуть металл.



Все эти «свободные» электроны, называемые электронным газом, находятся в потенциальной яме, как это показано на рисунке. Их энергия отрицательна. От нулевого уровня энергии самые «энергичные» электроны отделены пороговой энергией $\Delta E_{\text{пор}}$.

Чтобы вылететь из металла, электронам нужно совершить так называемую работу выхода $A_{\text{вых}}$, равную этой пороговой энергии. У разных металлов разные по величине работы выхода из него электронов.

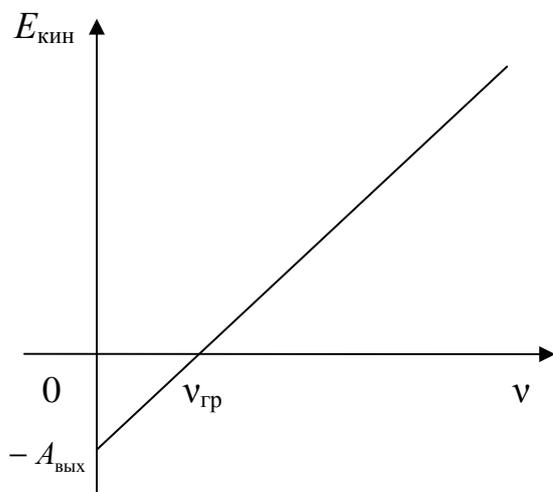
Механизм фотоэффекта состоит в том, что фотон из падающего светового пучка поглощается одним из «свободных» электронов и полностью передает ему свою энергию. Этот электрон, называемый фотоэлектроном, затратив часть полученной энергии на совершение работы выхода, вылетает из металла, обладая некоторой кинетической энергией. Баланс энергии содержится в уравнении фотоэффекта, составленном Эйнштейном:

$$E_{\gamma} = A_{\text{вых}} + E_{\text{кин}}.$$

В этой формуле стоит максимальная кинетическая энергия фотоэлектрона без учета возможных потерь на вылете.

Если энергия фотона меньше работы выхода, фотоэффект не происходит. Существуют минимальная частота и максимальная длина волны фотона, способного вызвать фотоэффект, называемые красной границей фотоэффекта. Условием красной границы является равенство нулю кинетической энергии фотоэлектрона:

$$\lambda_{\text{гр}} = \frac{hc}{A_{\text{вых}}} \quad \text{и} \quad \nu_{\text{гр}} = \frac{A_{\text{вых}}}{h}.$$



На рисунке показан график зависимости максимальной кинетической энергии фотоэлектронов от частоты падающего света. Из графика видно, что при частотах света, меньших граничной $\nu_{\text{гр}}$ фотоэффект не происходит (кинетическая энергия не может быть отрицательной).

ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЦ ВЕЩЕСТВА

Волновые свойства частиц были впервые обнаружены в опытах по дифракции электронов на кристаллах. Различные эксперименты показали, что пучки частиц вещества и даже отдельные частицы проявляют способность к интерференции, что свидетельствует об их волновых свойствах.

Процесс движения частицы с массой m и импульсом p сопровождается волновым процессом с длиной волны

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{h}{p},$$

называемой дебройлевской длиной волны данной частицы.

Волновые свойства частицы проявляются при условии

$$\lambda_{\text{в}} \geq R,$$

где R – размер частицы. Для тел макромира это условие не выполняется, и эти тела ведут себя как классические частицы и не обнаруживают волновые свойства. Для тел микромира это условие, как правило, выполняется, и тела микромира проявляют волновые свойства. Все структурные элементы микромира являются квантовыми объектами, частицами – волнами.

СООТНОШЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ГАЙЗЕНБЕРГА

Напомним, что результат любого измерения величины x является приблизительным и имеет некоторую погрешность Δx . Величина этой погрешности зависит от точности измерительного прибора и многих других факторов. Кроме того, сама установка измерительного прибора, как правило, приводит к изменению измеряемой величины. Так вольтметр, подключенный параллельно к участку электрической цепи для измерения разности потенциалов, изменяет эту разность потенциалов. Эти изменения связаны не с природой исследуемых объектов, а с устройством системы, способом измерения, и могут быть существенно уменьшены.

Поведение квантовых объектов принципиально отличается от поведения классических. **Закономерности поведения квантовых объектов имеют**

вероятностный характер, обусловленный самой природой микрочастиц, их волновыми свойствами. Тот или иной характер поведения квантовых объектов зависит от самого факта наблюдения за ним. Каждое наблюдение за квантовым объектом с необходимостью вызывает возмущение в его состоянии.

При наблюдении за микрочастицей в течение времени не более Δt мы можем определить значение ее энергии с погрешностью не менее ΔE . При определении координаты микрочастицы с погрешностью Δx импульс этой микрочастицы может быть определен с погрешностью Δp_x . Эти погрешности попарно связаны соотношениями неопределенностей Гайзенберга:

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq h -$$

для времени и энергии и

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h -$$

для координаты и импульса, где h – постоянная Планка. Соотношение неопределенностей часто называют принципом неопределенностей.

Соотношение неопределенностей не позволяет в принципе одновременно повысить и точность измерения координаты частицы, и точность измерения проекции вектора импульса на эту ось координат. Чем точнее определена координата частицы, тем больше погрешность определения ее импульса. Следовательно, **соотношение неопределенностей лишает смысла понятие траектории**. Ведь само понятие траектории предполагает вполне точно определенные координаты и в то же время вполне точно определенные касательные (то есть векторы импульса) в каждой точке траектории.

Отметим, что именно соотношения неопределенностей лежат в основе связи законов сохранения со свойствами пространства – времени. Так закон сохранения энергии связан с однородностью времени, а закон сохранения импульса связан с однородностью пространства, потому соотношения неопределенностей именно так попарно сопрягают эти величины.

ВИРТУАЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Частицы – переносчики взаимодействий (векторные бозоны) являются виртуальными. Время жизни виртуальных бозонов от их рождения до поглощения крайне мало. В процессах испускания и поглощения виртуальных частиц происходит «кажущееся» нарушение закона сохранения энергии. Однако это нарушение вполне согласуется с соотношением неопределенностей. Чем меньше промежуток времени рождения частицы, тем больше неопределенность ее энергии.

В отличие от реальных частиц виртуальные бозоны нельзя непосредственно зарегистрировать, однако, сообщив им достаточную энергию, можно перевести их из состояния «призраков» в реальные частицы. Так виртуальные фотоны являются переносчиками электромагнитного взаимодействия, а реальные фотоны представляют собой свет.

ОПИСАНИЕ КВАНТОВОГО СОСТОЯНИЯ

Описание состояния квантовых объектов принципиально отличается от описания классических объектов, не обладающих волновыми свойствами. Классическая материальная точка в каждый момент времени занимает некоторое положение в пространстве с вполне точно определенными координатами. Перемещаясь в пространстве с течением времени, материальная точка описывает некоторую траекторию, к которой в каждой ее точке можно провести единственную вполне определенную касательную, а следовательно вполне точно определить векторы скорости, импульса и ускорения материальной точки в зависимости от времени. Вектор ускорения вполне определяется векторной суммой всех сил, действующих на данную материальную точку.

Квантовые объекты починаются соотношению неопределенностей, из-за действия которого теряет физический смысл понятие траектории. Следовательно, **для квантового объекта не применима модель материальной точки и классическая механика Ньютона.** Можно лишь говорить о веро-

ятности нахождения микрочастицы в данном конечном объеме пространства. Для изучения состояния квантовых объектов используется квантовая механика.

Квантовая механика изучает состояние электронов в атоме, в металлическом кристалле, в полупроводниках, состояние нуклонов в ядре и другие задачи.

Квантовое состояние описывается с помощью так называемой волновой функции координат и времени $\Psi(x, y, z, t)$, связанной с вероятностью данного квантового состояния. $\psi(x, y, z)$ – координатная (пространственная) часть волновой функции. Волновые функции, как правило, комплексные.

Квадрат модуля координатной части волновой функции равен объемной плотности вероятности обнаружения частицы в данной точке пространства:

$$|\psi(x, y, z)|^2 = \frac{dP}{dV}, \frac{1}{\text{м}^3},$$

откуда

$$P = \iiint_V |\psi(x, y, z)|^2 dV -$$

вероятность обнаружения микрочастицы в объеме V .

Вид волновой функции в каждом конкретном случае находится с помощью решения дифференциального уравнения Шредингера, играющего в квантовой механике роль уравнения второго закона Ньютона. **Уравнение Шредингера содержит производные от волновой функции по координатам и времени, и волновая функция находится с помощью интегрирования этого уравнения.** Структура уравнения Шредингера и свойства волновой функции таковы, что интегрирование возможно лишь при определенных математических условиях, из которых появляются так называемые квантовые числа, характеризующие каждое квантовое состояние. **При решении уравнения Шредингера вместе с волновой функцией и соответствующим набором квантовых чисел появляются и значения энергии частицы в данном квантовом состоянии.**

Для любознательного читателя покажем, как с помощью уравнения Шредингера решается задача о состоянии электрона в атоме водорода.

В этом случае волновая функция в сферических координатах r, ϑ, φ выглядит следующим образом:

$$\psi_{n,l,m}(r, \vartheta, \varphi) = R_{n,l}(r) \cdot \Theta_{l,m}(\vartheta) \cdot e^{im\varphi},$$

где n – главное квантовое число, l – квантовое число модуля вектора орбитального момента импульса электрона (орбитальное квантовое число) и m – квантовое число проекции вектора орбитального момента импульса электрона (магнитное квантовое число). Три этих квантовых числа соответствуют трем координатам пространства и характеризуют каждое квантовое состояние электрона во внешнем поле.

Помимо этих трех квантовых чисел у электрона есть еще спиновое квантовое число, характеризующее внутреннее квантовое состояние и принимающее два значения: $+1/2$ и $-1/2$. Поэтому согласно принципу запрета в атоме водорода имеются по два электрона с заданным набором квантовых чисел n, l и m .

При решении уравнения Шредингера получены также возможные значения энергии электрона, зависящей только от главного квантового числа:

$$E_n = -13,6 \text{ эВ} \cdot \frac{1}{n^2}.$$

Заметим, что энергия электрона принимает лишь отрицательные значения, потому что электрон находится в связанном состоянии (в потенциальной яме).