

Лекция 4.

13. ДВОЙСТВЕННАЯ КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВАЯ ПРИРОДА СВЕТА И МИКРООБЪЕКТОВ

С точки зрения волновых представлений свет представляет собой электромагнитную волну. Такие явления, как интерференция и дифракция света, могут быть объяснены только на основе волновых представлений. С другой стороны, существуют убедительные доказательства справедливости квантовых (корпускулярных) представлений о природе света. Распределение энергии в спектре равновесного теплового излучения объясняется на основе предположения об испускании света в виде квантов с энергией $\hbar\omega$. Для объяснения фотоэффекта достаточно предположить, что поглощение света также квантовано. Эйнштейн выдвинул гипотезу, что свет и распространяется в виде дискретных частиц – фотонов.

В настоящее время считается, что свойства непрерывности, характерные для электромагнитного поля световой волны, не исключают свойств дискретности, характерных для световых квантов – фотонов. Свет одновременно обладает свойствами непрерывных электромагнитных волн, характеризующихся определенной частотой и длиной волны, и свойствами дискретных фотонов, обладающих энергией, массой и импульсом. Однако в проявлении этих противоположных свойств имеется вполне определенная закономерность. С уменьшением длины волны (увеличением частоты) все более отчетливо проявляются квантовые свойства света. У длинноволнового излучения основную роль играют его волновые свойства. Наоборот, волновые свойства коротковолнового излучения проявляются весьма слабо. Взаимосвязь между двойственными корпускулярно-волновыми свойствами света можно объяснить, если использовать статистический подход к рассмотрению закономерностей распространения света: квадрат амплитуды световой волны в данной точке пространства является мерой вероятности попадания фотонов в данную точку.

Фотон обладает энергией, массой и импульсом. Энергия фотона определяется его частотой:

$$E = \hbar\omega = h\nu.$$

Масса фотона находится из закона взаимосвязи массы и энергии:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{\hbar\omega}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}.$$

Однако масса фотона существенно отличается от массы микроскопических тел и масс других элементарных частиц. Его масса покоя m_0 равна нулю. Действительно, релятивистская масса определяется соотношением

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

Для фотона, движущегося в вакууме со скоростью $v = c$, знаменатель обращается в нуль, а масса m при $m_0 \neq 0$ – в бесконечность. Таким образом, для фотона $m_0 = 0$, т.е. покоящихся фотонов не существует. Очевидно, что фотон всегда движется со скоростью $v = c$, так как при $v \neq c$ масса и энергия фотона были бы равны нулю, что противоречит формуле $m = \hbar\omega / c^2$.

Импульс фотона может быть получен из общей формулы теории относительности

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E_K(E_K + 2m_0c^2)}$$

С учетом соотношения $m_0 = 0$, импульс фотона может быть рассчитан, как

$$p = \frac{E}{c} = \frac{\hbar\omega}{c} = \frac{2\pi\hbar}{\lambda} = mc.$$

Если ввести волновой вектор \vec{k} , модуль которого равен $k = 2\pi/\lambda$, а направление совпадает с направлением распространения света, то выражение для импульса может быть переписано в векторной форме:

$$\vec{p} = \hbar\vec{k}.$$

Итак, три корпускулярные характеристики фотона (энергия, масса и импульс) связаны с волновой характеристикой света – его частотой.

Луи де Бройль выдвинул гипотезу об универсальности корпускулярно-волнового дуализма свойств веществ, предположив, что установленная ранее для квантов света – фотонов корпускулярно-волновая (квантовая) природа присуща всем частицам вещества, обладающих импульсом, – электронам, протонам, атомам и т.д., причем количественные соотношения между волновыми и корпускулярными характеристиками свободных частиц остаются такими же, как и для фотонов.

Согласно де Бройлю с каждым микрообъектом связываются, с одной стороны, корпускулярные характеристики – энергия E , масса m и импульс \vec{p} , с другой стороны – волновые характеристики – частота ν и длина волны λ . Связь между ними такая же, как и для фотонов

$$E = h\nu = \hbar\omega, \quad p = \frac{\hbar\omega}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Таким образом, любой частице, обладающей импульсом, сопоставляют волновой процесс с длиной волны

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\nu}.$$

Поскольку скорости микрочастиц в нерелятивистской области обычно рассчитывают через их кинетическую энергию $E_k = m\nu^2/2$, длину волны, сопоставляемую движущимся частицам, иногда рассчитывают, как

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}}.$$

Волны, ассоциированные со свободно движущимися частицами, получили название волн де Бройля. В настоящее время считается, что всем микрообъектам присущи и корпускулярные, и волновые свойства; в то же время любую из микрочастиц нельзя считать ни частицей, ни волной в классическом понимании. Согласно современной трактовке корпускулярно-волнового дуализма у микрообъекта существует потенциальная возможность проявлять себя, в зависимости от внешних условий, либо как волна, либо как частица. У макроскопических тел волновые свойства не проявляются, так как масса их значительна и величина длины волны де Бройля λ пренебрежимо мала.

Волны де Бройля отражают корпускулярно-волновую (квантовую) природу микрочастиц и интерпретируются как волны, задающие статистические закономерности и вероятностный характер проявления дуализма свойств веществ. Волны де Бройля имеют специфическую (не электромагнитную) природу, не имеющую аналогии среди волн, изучаемых в классической физике: Квадрат модуля амплитуды волны де Бройля является мерой вероятности того, что частица будет обнаружена в этой точке.

14. ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ ФИЗИКИ

Необходимость вероятностного подхода к описанию микрочастиц является важнейшей отличительной особенностью квантовой теории. Для описания распределения вероятности нахождения микрочастицы в данный момент времени в некоторой области пространства вводят функцию $\Psi(x, y, z, t) = \Psi(\vec{r}, t)$, называемую **волновой функцией** (или Ψ -функцией), определяемую следующим образом. Вероятность dW того, что частица

находится в элементе объема dV , пропорциональна квадрату модуля Ψ -функции и величине элемента объема dV :

$$dW = |\Psi(x, y, z, t)|^2 dV = |\Psi(\vec{r}, t)|^2.$$

Здесь $|\Psi|^2 = \Psi\Psi^*$, причем Ψ^* – функция, комплексно сопряженная с Ψ . Волновая функции может быть как действительной, так и комплексной. Физический смысл имеет не сама Ψ -функция, а квадрат ее модуля, который определяет вероятность пребывания частицы в данной точке пространства в данный момент времени и всегда является действительной величиной. Иными словами, квадрат модуля Ψ -функции определяет интенсивность волн де Бройля.

Вероятностный смысл волновой функции $\Psi(\vec{r}, t)$ требует, чтобы вероятность достоверного события равнялась единице. Поэтому должно выполняться условие нормировки вероятностей:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(\vec{r}, t)|^2 dV = 1,$$

где интеграл вычисляется по всему пространству. Это условие говорит об объективном существовании частицы в пространстве, т.е. пребывание частицы где-либо в пространстве есть достоверное событие и его вероятность должна быть равна единице.

Чтобы волновая функция являлась объективной характеристикой состояния микрочастиц, условие нормировки вероятностей должно быть дополнено рядом ограничительных условий (стандартные условия). Функция Ψ , характеризующая вероятность обнаружения микрочастицы в элементе объема, должна быть конечной (вероятность не может быть больше единицы), однозначной (вероятность не может быть неоднозначной величиной) и непрерывной (вероятность не может изменяться скачком); ее частные производные также должны быть непрерывными.

В классической механике состояние материальной точки (частицы) и ее движение по определенной траектории определяется одновременным заданием для каждой точки значений координат, импульса, энергии и т.д. Поскольку в квантовой механике движение микрочастиц описывается вероятностным образом, естественно ожидать, что некоторые физические величины, характеризующие микрочастицу, не имеют строго определенных значений. При этом оказывается, что неопределенности некоторых физических величин не являются независимыми, а связаны между собой некоторыми соотношениями.

В. Гейзенберг, учитывая волновые свойства микрочастиц и связанные с волновыми свойствами ограничения в их поведении, пришел к выводу, что микрообъект невозможно одновременно с любой точностью характеризовать и координатой, и импульсом. Согласно **соотношению неопределенностей Гейзенберга**, неопределенности этих величин удовлетворяют условиям

$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar;$$

$$\Delta y \Delta p_y \geq \hbar;$$

$$\Delta z \Delta p_z \geq \hbar.$$

т.е. произведение неопределенностей координаты и соответствующей ей проекции импульса не может быть меньше величины порядка \hbar , где $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Физический смысл соотношения неопределенностей заключается в невозможности одновременного точного определения координаты и соответствующей проекции импульса, причем эта невозможность не связана с несовершенством методов измерения или измерительных приборов, а является следствием специфики микрообъектов.

Соотношение неопределенностей является одним из фундаментальных положений квантовой механики. Одного этого соотношения достаточно, чтобы получить ряд важных результатов. В частности, соотношение неопределенностей позволяет понять, почему

нельзя говорить о движении электрона в атоме по определенной траектории с точно заданной в каждой точке скоростью, почему электрон не падает на ядро атома, а также оценить размеры простейшего атома и минимальную возможную энергию электрона в таком атоме.

В квантовой теории рассматривается также соотношение неопределенностей для энергии E и времени t , поскольку неопределенности этих величин удовлетворяют условию

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar.$$

Здесь ΔE – неопределенность энергии некоторого квантового состояния системы; Δt – время пребывания системы в данном состоянии. Следовательно, система, имеющая среднее время жизни Δt , не может быть охарактеризована определенным значением энергии; разброс энергии $\Delta E = \hbar / \Delta t$ возрастает с уменьшением среднего времени жизни. Отсюда также следует, что частота излучения фотона из-за конечности времени жизни атома в возбужденном состоянии должна иметь неопределенность, т.е. спектральные линии должны иметь некоторую ширину.

В классической механике законы Ньютона позволяют описать движение тел в пространстве и во времени, т.е. по силам, действующим на тело, и начальным условиям найти для любого момента времени координаты тела и его импульс. В квантовой механике состояние микрочастицы характеризуется не координатами и импульсом, а волновой функцией $\Psi(\vec{r}, t)$, в которой заложена двойственная природа микрообъектов. Поэтому уравнением движения микрочастицы должно быть уравнение, позволяющее рассчитать волновую функцию $\Psi(\vec{r}, t)$ и квадрат ее модуля, определяющий вероятность нахождения частицы в данной точке пространства в определенный момент времени. Такое уравнение было записано Э. Шредингером в 1926 г. **Уравнение Шредингера** для нерелятивистской ($v \ll c$) микрочастицы с массой m имеет вид

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\vec{r}, t) + U(\vec{r}, t) \Psi(\vec{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t}.$$

Здесь $U(x, y, z, t) = U(\vec{r}, t)$ – определяющая конкретный вид волновой функции потенциальная энергия частицы в силовом поле, зависящая от характера сил, действующих на микрочастицу, $i = \sqrt{-1}$, $\nabla^2 = \Delta$ – оператор Лапласа, причем

$$\nabla^2 \Psi = \Delta \Psi = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2}.$$

Используя линейный оператор называемый оператором Гамильтона или просто гамильтонианом, определяемый, как

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + U(\vec{r}, t),$$

общее уравнение Шредингера может быть также записано в виде

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = \hat{H} \Psi(\vec{r}, t)$$

Справедливость постулируемого уравнения Шредингера доказывается хорошим согласием с опытом выводов, полученных с его помощью.

Если силовое поле, в котором движется микрочастица стационарно, т.е. функция $U(x, y, z, t) = U(\vec{r}, t) = U(x, y, z) = U(\vec{r})$ не зависит явно от времени, уравнение Шредингера упрощается, поскольку Ψ – функция распадается на два множителя

$$\Psi(\vec{r}, t) = \psi(\vec{r}) \exp(-i \frac{E}{\hbar} t) = \psi(\vec{r}) \exp(-i\omega t),$$

один из которых, $\psi(\vec{r})$, зависит только от координат, а другой – от времени. Здесь E – полная энергия микрочастицы, $\omega = E / \hbar$ – частота ее волны де Бройля. В стационарных силовых полях уравнение Шредингера упрощается до уравнения:

$$\Delta\psi(\vec{r}) + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U(\vec{r}))\psi(\vec{r}) = 0, \quad \hat{H}\psi(\vec{r}) = E\psi(\vec{r}).$$

Именно это уравнение играет основную роль в атомной физике.

Явный вид функции $U(x, y, z) = U(\vec{r})$ зависит от решаемой задачи. В частности, в случае свободной частицы, частицы, находящейся в потенциальной яме или проходящей через энергетический барьер, $U = U_0 = \text{const}$; для электрона в водородоподобном атоме $U = U(r)$ и для частицы, осциллирующей вдоль оси x в поле квазиупругой силы $U = U(x)$, где

$$U(r) = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}, \quad U(x) = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}m\omega_0^2 x^2.$$

Функции ψ , удовлетворяющие уравнению Шредингера при данном U , называются **собственными функциями**. Значения $E = E_n$, при которых существуют решения данного уравнения, называются **собственными значениями**. Совокупность собственных значений E_n называется **энергетическим спектром**. Основная задача квантовой механики – нахождение спектра собственных значений энергии E_n и соответствующих им волновых функций ψ_n , удовлетворяющих стандартным условиям.

Волновая функция ψ , являясь основной характеристикой состояния микрообъектов, позволяет вычислять средние значения физических величин, характеризующих данный микрообъект, с помощью соотношения

$$\langle L \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} L|\psi(\vec{r})|^2 dV.$$

15. Элементы физики водородоподобного атома

В основе **полуклассической модели атома Бора** лежит планетарная модель атома Резерфорда, согласно которой вокруг положительно заряженного ядра по круговым орбитам движутся отрицательно заряженные электроны, притягивающиеся к ядру за счет кулоновской силы притяжения. Тем не менее, анализ опытных фактов заставил Бора отказаться от многих представлений классической физики и сформулировать постулаты, на которых базируется модель атома:

1. **Постулат стационарных состояний:** атом может находиться в особых стационарных (квантовых) состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия. В стационарном состоянии атом не излучает.

2. **Правило частот:** атом может переходить из одного стационарного состояния в другое. При этом переходе может испускаться или поглощаться квант электромагнитной энергии, частота которого определяется разностью энергий атома в данных состояниях:

$$h\nu_{mn} = E_m - E_n.$$

3. **Правило квантования орбит:** в стационарном состоянии атома электрон, двигаясь по круговой орбите, должен иметь квантованные значения орбитального момента импульса:

$$m_e v_n r_n = n\hbar.$$

Здесь v_n – скорость движения электрона массой m_e по круговой орбите радиусом r_n .

Последнее соотношение наряду со вторым законом Ньютона

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n},$$

описывающим движение электрона по n -ной круговой орбите под действием кулоновской силы, позволяют рассчитать радиус каждой орбиты r_n и скорость движения электрона v_n по этой орбите.

Для расчета полной энергии электрона используется классическое выражение, согласно которому в атоме водорода энергия складывается из кинетической энергии движущегося электрона и его потенциальной энергии в центральном симметричном силовом поле ядра.

$$E_n = \frac{m_e v_n^2}{2} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n},$$

которое после подстановки рассчитанных из предыдущих соотношений значений v_n и r_n приобретает вид:

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -\frac{R}{n^2}, \quad E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ (эВ)}.$$

Полученное соотношение говорит о том, что энергия атома водорода дискретна (квантована). Знак « $-$ » в выражении ($E < 0$) означает, что электрон находится в атоме в связанном состоянии. Чем меньше **главное квантовое число n** , тем состояние устойчивее. Состояние с $n = 1$, имеющее наименьшую энергию $E_1 = -13,6$ эВ, является основным энергетическим состоянием атома, все остальные состояния ($n > 1$) – возбужденные. Возможные значения энергии атома приведены на энергетической диаграмме стационарных состояний атома водорода (рис. 15-1). По мере роста главного квантового числа n энергетические уровни располагаются теснее и при $n = \infty$ энергия $E_\infty = 0$. При $E > 0$ движение электрона является свободным; область непрерывного спектра $E > 0$ соответствует ионизованному атому. Энергия ионизации атома водорода равна $E = -E_1 = 13,6$ эВ.

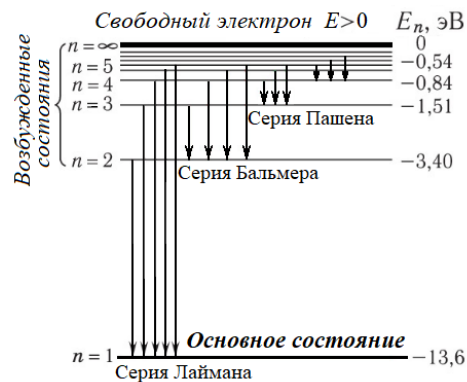


Рис. 15.1. Энергетическая диаграмма стационарных состояний атома водорода

Согласно правилу частот, при переходе атома из состояния m в состояние n (что соответствует переходу электрона с орбиты m на орбиту n) излучается квант энергии с частотой (длиной волны), рассчитываемой по формуле:

$$\nu_{mn} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad \frac{1}{\lambda_{mn}} = R' \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

где $R = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ или $R' = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ – постоянная Ридберга для частоты (длины волны). Переходы на определенный уровень n с различных уровней $m > n$ образуют серии спектральных линий излучения атома водорода. Излучение, испускаемое при переходах на уровень $n = 1$ (серия Лаймана) соответствует ультрафиолетовой области, на уровень $n = 2$ (серия Бальмера) находится в видимом диапазоне, на уровень $n = 3$ (серия Пашена), а также на другие уровни с более высоким n соответствуют инфракрасному диапазону.

Энергетический спектр водородоподобного атома (с зарядом $+Ze$ и одним электроном) в квантовой механике рассчитывается путем решения уравнения Шредингера,

в котором в качестве потенциальной энергии берется энергия $U(r)$ взаимодействия электрона с ядром водородоподобного атома

$$U(r) = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Расчет собственных значений энергии E_n электрона в водородоподобном атоме дает выражение, которое для $Z = 1$ совпадает с полученным в теории Бора

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{Z^2 m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Энергетические уровни электрона в атоме и размеры электронного облака определяются **главным квантовым числом n** , которое может принимать любые целочисленные значения, начиная с единицы.

При решении уравнения Шредингера выяснилось, что обусловленные орбитальным движением электрона механический момент импульса электрона L_l и его магнитный момент μ_l квантуются в соответствии с выражениями:

$$L_l = \sqrt{l(l+1)}\hbar, \quad \mu_l = -\sqrt{l(l+1)}\mu_B$$

Здесь l – **орбитальное квантовое число** ($l = 0, 1, 2, 3, \dots (n-1)$), определяющее как механический момент импульса электрона в атоме, так и магнитный момент, $\mu_B = e\hbar / 2m_e = 0,927 \cdot 10^{-23}$ Дж/Тл – магнетон Бора, и характеризующее форму электронного облака. Знак « $-$ » перед μ_l означает, что магнитный момент направлен в сторону, противоположную механическому. Проекция момента импульса электрона и магнитного момента на направление z внешнего магнитного поля также квантуются:

$$L_{lz} = m_l \hbar, \quad \mu_{lz} = m_l \mu_B$$

где m_l – **магнитное орбитальное квантовое число** ($m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \pm l$), определяющее проекцию момента импульса электрона на заданное направление, т.е. характеризующее пространственную ориентацию электронного облака. Электронное облако – это квантовомеханический аналог орбиты, называемой также атомной орбиталью.

Также выяснилось, что для корректного объяснения атомных спектров необходимо учитывать существование собственного (спинового) механического и магнитного моментов электрона, имеющих квантовую природу и являющихся неотъемлемым свойством любой элементарной частицы, подобным заряду и массе. Собственный механический момент электрона называют **спином**. Значения спинового механического и магнитного моментов определяются соотношением

$$L_s = \sqrt{s(s+1)}\hbar, \quad \mu_s = -2\sqrt{s(s+1)}\mu_B.$$

Здесь s – спиновое квантовое число. Для электрона возможно единственное значение $s = 1/2$, т.е. величина (но не направление!) спинового момента электрона остается постоянной. Для других микрочастиц оно может быть как полуцелым, так и целым (и равным нулю). Спин составных микрочастиц, например, атомов, определяемый спинами входящих в него частиц, зависит от их взаимной ориентации и обычно не превышает нескольких единиц.

Существование спина электрона приводит к возможности его различных ориентаций в пространстве, т.е. к квантованию проекций спинового механического и магнитного момента на направление внешнего магнитного поля:

$$L_{sz} = m_s \hbar, \quad \mu_{sz} = 2m_s \mu_B.$$

Опытами установлено, что возможны только две ориентации спина электрона в магнитном поле, антипараллельные между собой. **Магнитное спиновое квантовое число m_s** , задающее ориентацию спина, может принимать только два значения $m_s = \pm 1/2$.

Полный момент импульса электрона складывается из орбитального и спинового моментов и определяется квантовым числом, принимающим значения $j = l - \frac{1}{2}, l + \frac{1}{2}$. Для изолированного атома именно полный момент импульса является сохраняющейся величиной.

Состояние электрона в атоме водорода описывается собственными функциями $\Psi_{nlm,m_s}(r, \theta, \phi)$, явный вид которых имеется в справочниках. Каждому собственному значению E_n (кроме E_1) соответствует несколько собственных функций Ψ_{nlm,m_s} , отличающихся значениями квантовых чисел l, m_l, m_s , т.е. атом водорода может иметь одно и то же значение энергии, находясь в несколько различных состояниях. Главное квантовое число, обозначаемое числом n или буквами латинского алфавита (K, L, M, N, \dots), определяет энергию (размер) электронного облака (орбитали) и номер энергетического уровня, на котором находится электрон. Орбитальное квантовое число l определяет форму орбиталей, которые обозначают, как s ($l=0$), p ($l=1$), d ($l=2$), f ($l=3$), g ($l=4$) – орбитали. Совокупность орбиталей с одинаковыми значениями главного n и орбитального l квантовых чисел образует энергетический подуровень. Так как $l < n$, возможны подуровни: $(1s), (2s, 2p), (3s, 3p, 3d), (4s, 4p, 4d, 4f)$ и т.д.

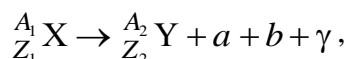
Таким образом, состояние электрона в атоме водорода определяется четырьмя квантовыми числами: n, l, m_l, m_s . Поэтому максимальное число электронов в находящихся в состоянии, задаваемом главным квантовым числом n равно:

$$z(n) = \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2n^2$$

17. Радиоактивность

Ядро – центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома и его положительный электрический заряд Ze , где Z – порядковый номер в таблице элементов. Атомные ядра состоят из Z положительных протонов, определяющих заряд ядра, и N нейтронов, не имеющих заряда. Обозначение элемента с указанием чисел Z и N выглядит так: ${}^A_Z X$, где X – химический символ элемента. $A = N + Z$ – число нуклонов (протонов и нейтронов), называемое массовым числом.

Радиоактивностью называется способность некоторых атомных ядер к самопроизвольному (спонтанному) изменению состава атомного ядра, сопровождаемому испусканием различных видов радиоактивных излучений и элементарных частиц. Различается естественная и искусственная радиоактивность. Естественной называется радиоактивность, наблюдающаяся у существующих в природе неустойчивых изотопов, искусственная радиоактивность – это радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций. Процессы, происходящие в ходе радиоактивного распада, могут быть описаны символическим соотношением:

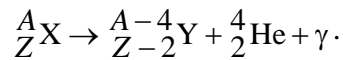


где X и Y – символы исходного и конечного химического элемента; A_1, A_2 и Z_1, Z_2 – массовые и зарядовые числа исходного и конечного ядра; a – частицы, вылетающие из ядра; γ – сопровождающее распад γ - или рентгеновское излучение. При радиоактивном распаде выполняется закон сохранения полной релятивистской энергии, импульса, заряда и массового числа (общего числа нуклонов – протонов и нейтронов). Электрону приписывают массовое число, равное нулю. Сопровождающее α – и β – распады и испускаемое дочерним ядром γ -излучение (коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны, меньшей 10^{-10} м) не вызывает изменения заряда и массового числа ядер.

Гамма-лучи являются основной формой уменьшения энергии возбужденных продуктов радиоактивных превращений.

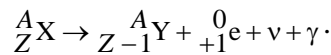
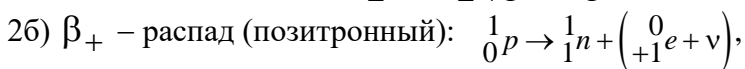
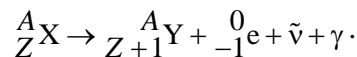
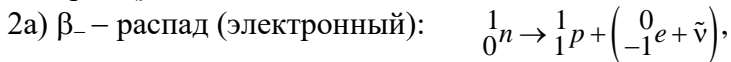
Основные типы радиоактивности:

1) альфа-распад – вылет α -частицы – системы из двух протонов и двух нейтронов, т.е. ядра атома гелия ${}^4_2\text{He}$:



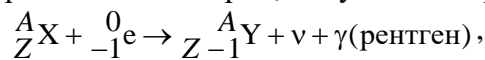
Заряд ядра уменьшается на 2 единицы, массовое число уменьшается на 4 единицы, процесс сопровождается испусканием γ -лучей.

2) бета-распад – взаимные превращения в ядре нейтрона в протона (β_-) и протона в нейтрон (β_+):



Сопровождаются вылетом электрона ${}_0^1e$ или позитрона ${}_0^1e$ и электронных антинейтрино ${}^0_0\bar{\nu}$ или нейтрино ${}^0_0\nu$. Заряд ядра при β_- – распаде увеличивается на 1, при β_+ – распаде уменьшается на 1. Массовое число не изменяется.

2в) электронный захват – ядро поглощает один из K – электронов своего атома, при этом один из протонов превращается в нейтрон, испуская нейтрино:



сопровождается характеристическим рентгеновским излучением.

3) спонтанное деление – деление ядра обычно на два осколка, имеющих приблизительно равные массы и заряды. Заряд и массовое число делятся примерно пополам.

4) протонная радиоактивность – ядро претерпевает превращения, испуская один или два протона. Заряд и массовое число уменьшаются на единицу (или на два).

Обычно все типы радиоактивности сопровождаются испусканием гамма-лучей – жесткого коротковолнового электромагнитного излучения. Ядро, испытывающее радиоактивный распад, называется материнским; возникающее дочернее ядро оказывается возбужденным, и его переход в основное состояние сопровождается испусканием γ -фотона. С учетом излучения энергия в процессе распада сохраняется.

Самопроизвольный распад атомных ядер подчиняется закону радиоактивного распада:

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N_0 – количество ядер в данном объеме вещества в начальный момент времени $t = 0$; N – число нераспавшихся ядер в том же объеме к моменту времени t ; λ – постоянная распада, равная доле ядер, распадающихся в единицу времени.

Период полураспада $T_{1/2}$ – время, за которое распадается половина первоначального количества радиоактивного вещества. $T_{1/2}$ находится в пределах от $3 \cdot 10^{-7}$ с до $5 \cdot 10^{15}$ лет. Характеризует устойчивость ядер к радиоактивному распаду. Постоянная распада λ связана с периодом полураспада $T_{1/2}$ соотношением:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Величина $\tau = 1/\lambda$, обратная постоянной распада, называется средним временем жизни радиоактивного атома.

Используя соотношение для $T_{1/2}$, закон радиоактивного распада имеет вид

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}.$$

Величина $A = \lambda N = n/\tau$ называется активностью радиоактивного вещества. Активность измеряется числом распадов ядер радиоактивного вещества в единицу времени. Единица активности в системе СИ – беккерель (1 Бк = 1 расп/с).

Возникающие в результате радиоактивного распада ядра могут быть, в свою очередь, радиоактивными. Это приводит к возникновению цепочки или ряда радиоактивных превращений, заканчивающихся стабильным элементом. Совокупность элементов, образующих такую цепочку, называется радиоактивным семейством. В природе существуют 3 радиоактивных ряда (семейства), родоначальниками которых являются ^{238}U (ряд урана), ^{232}Th (ряд тория) и ^{235}U (ряд актиноурана). Конечные продукты – изотопы свинца ^{206}Pb , ^{208}Pb , ^{207}Pb .

18. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИКИ АТОМНОГО ЯДРА

Атомное ядро имеет размеры близкие к 10^{-15} м и состоит из протонов и нейтронов (нуклонов). Общее число нуклонов в ядре называется массовым числом A . Атомное ядро характеризуется зарядом Ze , где Z – зарядовое число ядра, равное числу протонов в ядре и совпадающее с порядковым номером химического элемента в таблице Менделеева.

Энергия связи нуклонов в ядре, т.е. энергия, которую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны, равна

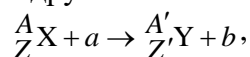
$$E_{\text{св}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}]c^2,$$

где m_p , m_n , $m_{\text{я}}$ – массы протона, нейтрона и ядра. Величина

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}},$$

равная разности между массой частиц, составляющих ядро, и массой самого ядра называется дефектом массы ядра. На эту величину уменьшается масса всех нуклонов при образовании из них атомного ядра. Удельная энергия связи $\delta E_{\text{св}} = E_{\text{св}}/A$ (энергия связи, отнесенная к одному нуклону) характеризует устойчивость атомных ядер. При практических вычислениях массы всех частиц и атомов выражаются в атомных единицах массы: 1 а.е.м. = $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг. В энергетических единицах 1 а.е.м. = 931.494 МэВ.

Ядерные реакции – это превращение атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами или друг с другом. Символическая запись реакции имеет вид



Изменение энергии при ядерной реакции (тепловой эффект ядерной реакции) определяется соотношением

$$Q = c^2 (\Sigma m_1 - \Sigma m_2),$$

где Σm_1 – сумма масс частиц до реакции, Σm_2 – сумма масс частиц после реакции.

В отличие от радиоактивного распада, который всегда протекает с выделением энергии, ядерные реакции могут быть как экзотермическими (с выделением энергии), так и эндотермическими (с поглощением энергии). В ядерных реакциях выполняются законы сохранения релятивистской полной энергии, заряда, числа нуклонов и импульса.