

# Уравнение Шредингера, его свойства.

## Вероятностная интерпретация волновой функции.

### Уравнение Шрёдингера

Уравнение Шрёдингера описывает квантовомеханическое поведение микрочастиц. Оно является основным уравнением квантовой механики и описывает эволюцию волновой функции во времени и пространстве. В нерелятивистской механике уравнение Шрёдингера для частицы массы  $m$ , движущейся в потенциальном поле с потенциальной энергией  $V(\mathbf{r})$ , записывается следующим образом:

$$i\hbar \frac{\partial \psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right) \psi(\mathbf{r}, t)$$

где:

- $\psi(\mathbf{r}, t)$  — волновая функция частицы,
- $i$  — мнимая единица,
- $\hbar$  — приведённая постоянная Планка,
- $\nabla^2$  — оператор Лапласа,
- $V(\mathbf{r})$  — потенциальная энергия.

### Основные свойства уравнения Шрёдингера

1. **Линейность:** Уравнение Шрёдингера линейно относительно волновой функции. Это значит, что если  $\psi_1$  и  $\psi_2$  являются решениями уравнения Шрёдингера, то и любая их линейная комбинация  $a\psi_1 + b\psi_2$  (где  $a$  и  $b$  — произвольные коэффициенты) также является решением.
2. **Стационарное уравнение Шрёдингера:** В случае, когда потенциальная энергия не зависит от времени, уравнение Шрёдингера можно разделить на временную и пространственную части. Волновая функция записывается в виде  $\psi(\mathbf{r}, t) = \psi(\mathbf{r})e^{-iEt/\hbar}$ , где  $\psi(\mathbf{r})$  удовлетворяет стационарному уравнению Шрёдингера:

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right) \psi(\mathbf{r}) = E\psi(\mathbf{r})$$

3. **Нормировка волновой функции:** Волновая функция должна быть нормированной, что означает, что вероятность нахождения частицы во всем пространстве равна единице:

$$\int |\psi(\mathbf{r}, t)|^2 d\mathbf{r} = 1$$

4. **Непрерывность и конечность:** Волновая функция и ее первые производные должны быть непрерывными и конечными во всех точках пространства.

## Вероятностная интерпретация волновой функции

В квантовой механике волновая функция  $\psi(\mathbf{r}, t)$  имеет вероятностную интерпретацию, предложенную Максом Борном. Согласно этой интерпретации, квадрат модуля волновой функции  $|\psi(\mathbf{r}, t)|^2$  дает плотность вероятности нахождения частицы в точке  $\mathbf{r}$  в момент времени  $t$ . То есть вероятность нахождения частицы в элементе объема  $d\mathbf{r}$  вокруг точки  $\mathbf{r}$  равна  $|\psi(\mathbf{r}, t)|^2 d\mathbf{r}$ .

Эта интерпретация приводит к следующим выводам:

- Волновая функция должна быть нормированной.
- Плотность вероятности может изменяться во времени, что отражает эволюцию квантового состояния частицы.

Таким образом, волновая функция несет полную информацию о вероятностном распределении всех возможных состояний частицы.

# Спонтанное и индуцированное вынужденное излучение. Коэффициенты “А” и “В” Эйнштейна.

## Спонтанное излучение

Спонтанное излучение происходит, когда атом, находящийся в возбужденном состоянии, переходит в более низкое энергетическое состояние, испуская фотон. Этот процесс не зависит от внешних электромагнитных полей и происходит случайно. Спонтанное излучение характеризуется вероятностью  $A_{21}$ , где индекс "21" означает переход с уровня 2 на уровень 1.

## Индуцированное (вынужденное) излучение

Индуцированное излучение происходит, когда фотон взаимодействует с атомом в возбужденном состоянии и заставляет его перейти в более низкое энергетическое состояние, испуская дополнительный фотон. Этот процесс зависит от интенсивности внешнего электромагнитного поля и описывается вероятностью  $B_{21}$ . В отличие от спонтанного, индуцированное излучение порождает фотоны, которые когерентны с воздействующим фотоном — имеют ту же частоту, фазу и направление распространения.

## Коэффициенты Эйнштейна

Альберт Эйнштейн в 1917 году ввел коэффициенты  $A$  и  $B$  для описания вероятностей спонтанного и индуцированного излучений:

1. **Коэффициент**  $A_{21}$  — вероятность спонтанного перехода с уровня 2 на уровень 1. Этот коэффициент описывает естественный распад возбужденного состояния без внешнего воздействия.
2. **Коэффициент**  $B_{21}$  — вероятность индуцированного перехода с уровня 2 на уровень 1 под воздействием внешнего электромагнитного поля.
3. **Коэффициент**  $B_{12}$  — вероятность поглощения фотона, при котором атом переходит с уровня 1 на уровень 2.

Эти коэффициенты связаны между собой и описываются следующими уравнениями:

$$A_{21} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} B_{21}$$

где  $h$  — постоянная Планка,  $\nu$  — частота излучения,  $c$  — скорость света.

# Основные выводы из теории Эйнштейна

1. **Равновесное состояние:** В равновесии, когда система находится при температуре  $T$ , вероятность испускания и поглощения фотонов уравнивается. В этом состоянии коэффициенты  $A$  и  $B$  удовлетворяют определенным соотношениям, обеспечивающим выполнение закона Планка для черного тела.
2. **Когерентность лазеров:** Принципиальное различие между спонтанным и вынужденным излучением лежит в основе работы лазеров. В лазерах используются среды с инверсной заселенностью уровней (больше атомов в возбужденном состоянии, чем в основном), что усиливает индуцированное излучение и приводит к генерации когерентного света.

## Пример использования в лазерах

В лазерах активная среда создается, например, с помощью трехуровневой системы:

1. Атомы из основного состояния 1 переводятся в высокое возбужденное состояние 3.
2. Из состояния 3 атомы частично возвращаются в основное состояние, а частично переходят в метастабильное состояние 2.
3. В метастабильном состоянии 2 атомы накапливаются до тех пор, пока не возникнет индуцированное излучение, создавая когерентное излучение лазера.

# Волновая функция, ее вероятностный смысл и условия, которым она должна удовлетворять. Принцип суперпозиции в квантовой механике.

## Волновая функция

Волновая функция  $\psi(\mathbf{r}, t)$  в квантовой механике является математическим описанием квантового состояния системы. Она несет всю информацию о вероятностном распределении возможных состояний частицы или системы частиц.

## Вероятностный смысл волновой функции

Вероятностный смысл волновой функции был предложен Максом Борном и состоит в следующем:

- Квадрат модуля волновой функции  $|\psi(\mathbf{r}, t)|^2$  определяет плотность вероятности нахождения частицы в точке  $\mathbf{r}$  в момент времени  $t$ . Таким образом, вероятность нахождения частицы в объеме  $d\mathbf{r}$  равна  $|\psi(\mathbf{r}, t)|^2 d\mathbf{r}$ .

## Условия, которым должна удовлетворять волновая функция

Волновая функция должна удовлетворять следующим условиям:

1. **Нормировка:** Волновая функция должна быть нормирована, что означает, что общая вероятность нахождения частицы во всем пространстве равна единице:

$$\int |\psi(\mathbf{r}, t)|^2 d\mathbf{r} = 1$$

2. **Непрерывность:** Волновая функция и ее первые производные должны быть непрерывными.
3. **Ограниченность:** Волновая функция должна быть конечной во всех точках пространства.
4. **Убывание на бесконечности:** Волновая функция должна стремиться к нулю на бесконечности так, чтобы интеграл нормировки сходил.

## Принцип суперпозиции в квантовой механике

Принцип суперпозиции является одним из фундаментальных принципов квантовой механики. Он утверждает, что если  $\psi_1$  и  $\psi_2$  являются возможными состояниями системы,

то их линейная комбинация также является возможным состоянием:

$$\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2$$

где  $c_1$  и  $c_2$  — произвольные комплексные числа.

Это означает, что система может находиться в состоянии, которое является суперпозицией двух или более различных состояний. Принцип суперпозиции лежит в основе многих квантовых явлений, таких как интерференция и квантовая запутанность.

# Гипотеза де Бройля. Корпускулярно-волновой дуализм материи. Опыты по дифракции микрочастиц.

## Гипотеза де Бройля:

В 1923 году французский физик Луи де Бройль предложил гипотезу, согласно которой все частицы обладают волновыми свойствами. Де Бройль предположил, что если свет обладает корпускулярно-волновым дуализмом, то и частицы материи, такие как электроны, должны обладать подобным дуализмом. Основная идея гипотезы де Бройля заключается в том, что движущейся частице можно приписать волну с длиной, определяемой её импульсом:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

где  $\lambda$  — длина волны де Бройля,  $h$  — постоянная Планка,  $p$  — импульс частицы.

## Корпускулярно-волновой дуализм материи:

Корпускулярно-волновой дуализм предполагает, что все частицы материи обладают как волновыми, так и корпускулярными свойствами. Это означает, что частицы могут демонстрировать свойства волн, такие как интерференция и дифракция, и одновременно вести себя как частицы с определённой массой и импульсом.

Основные положения дуализма:

1. **Длина волны де Бройля:** Частицам можно приписать волновые свойства, если их импульс достаточно мал, чтобы длина волны де Бройля была сравнима с размерами системы, в которой они находятся. Например, длина волны электрона в атоме водорода порядка  $10^{-10}$  м, что сопоставимо с размером самого атома.

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

где  $m$  — масса частицы,  $v$  — её скорость.

2. **Групповая скорость волны де Бройля:** Групповая скорость волны де Бройля равна механической скорости частицы:

$$v_{\text{груп}} = \frac{d\omega}{dk} = v$$

где  $\omega$  — угловая частота,  $k$  — волновое число.

### **Важный вывод:**

Итак, мы показали, что групповая скорость волны де Бройля равна механической скорости частицы. И тем не менее: волна де Бройля не является волной, движущейся вместе с классической частицей. Волна де Бройля и частица — это один и тот же объект. Просто частица обладает свойством волны, и если мы хотим это подчеркнуть, то говорим о де Бройлевской длине волны. Понятие длины волны де Бройля характеризует рассматриваемый объект с волновой точки зрения, в то время как понятие импульса определяет свойства объекта как частицы. Взаимосвязь между корпускулярной и волновой характеристиками одного и того же объекта отражает важнейшее свойство микромира: микрообъект может проявлять свойства как частицы, так и волны в зависимости от типа эксперимента.

### **Опыты по дифракции микрочастиц:**

Опыты по дифракции микрочастиц, такие как дифракция электронов на кристаллах, подтверждают гипотезу де Бройля. В таких экспериментах пучок электронов, проходя через кристалл, образует интерференционную картину, аналогичную той, что образуется при прохождении света через дифракционную решетку. Это явление можно объяснить только волновой природой электронов.

Примеры опытов:

1. **Опыт с двумя щелями:** Когда электроны проходят через две близко расположенные щели, на экране наблюдается интерференционная картина. Это демонстрирует, что каждый электрон интерферирует сам с собой, проходя через обе щели одновременно в виде волны.
2. **Дифракция электронов на кристаллах:** Электроны, проходящие через кристаллическую решетку, создают на экране дифракционную картину, аналогичную дифракции света на решетке. Это явление подтверждает волновую природу электронов и подчиняется соотношениям де Бройля.

Эти эксперименты стали ключевыми доказательствами теории квантовой механики и подтвердили существование корпускулярно-волнового дуализма материи.



# **Принцип неразличимости тождественных частиц в квантовой механике. Симметричные и антисимметричные состояния тождественных микрочастиц...**

## **Принцип неразличимости тождественных частиц в квантовой механике**

### **Принцип неразличимости**

В квантовой механике тождественные частицы (частицы одного и того же типа, например, электроны) неразличимы. Это означает, что их состояние не изменяется при перестановке двух частиц. Математически это выражается тем, что волновая функция системы тождественных частиц должна быть либо симметричной, либо антисимметричной относительно перестановки этих частиц.

### **Симметричные и антисимметричные состояния**

#### **Симметричные состояния**

Симметричные состояния описывают бозоны — частицы с целым спином (0, 1, 2, ...). Волновая функция системы бозонов симметрична относительно перестановки частиц:

$$\psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \psi(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_1)$$

Примеры бозонов включают фотоны, глюоны и W/Z-бозоны.

#### **Антисимметричные состояния**

Антисимметричные состояния описывают фермионы — частицы с полуцелым спином ( $1/2$ ,  $3/2$ , ...). Волновая функция системы фермионов антисимметрична относительно перестановки частиц:

$$\psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = -\psi(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_1)$$

Примеры фермионов включают электроны, протоны и нейтроны.

### **Принцип Паули**

Принцип Паули, предложенный Вольфгангом Паули в 1925 году, утверждает, что две тождественные фермионные частицы не могут находиться в одном квантовом состоянии. Это следствие антисимметрии волновой функции для фермионов. Если две частицы пытаются занять одно и то же квантовое состояние, их волновая функция становится нулевой:

$$\psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = -\psi(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_1) \implies \psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = 0$$

## Фермионы и бозоны

### Фермионы

Фермионы подчиняются принципу Паули и статистике Ферми-Дирака. Они составляют материю и включают такие частицы, как:

- Электроны
- Протоны
- Нейтроны

### Бозоны

Бозоны подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна и не подчиняются принципу Паули. Они являются переносчиками взаимодействий и включают:

- Фотоны (переносят электромагнитное взаимодействие)
- Глюоны (переносят сильное взаимодействие)
- W- и Z-бозоны (переносят слабое взаимодействие)

## Заключение

Принцип неразличимости тождественных частиц, симметрия и антисимметрия состояний, а также классификация частиц на фермионы и бозоны являются фундаментальными концепциями квантовой механики, объясняющими поведение и свойства элементарных частиц. Принцип Паули играет ключевую роль в структуре атомов и свойствах вещества.

# Основные постулаты квантовой механики. Представление физических величин операторами. Вычисление средних значений физических величин.

## Основные постулаты квантовой механики

### 1. Волновая функция

Квантовое состояние системы описывается волновой функцией  $\psi(\mathbf{r}, t)$ , которая содержит всю информацию о системе. Квадрат модуля волновой функции  $|\psi(\mathbf{r}, t)|^2$  представляет плотность вероятности нахождения частицы в точке  $\mathbf{r}$  в момент времени  $t$ .

### 2. Уравнение Шрёдингера

Эволюция волновой функции во времени определяется уравнением Шрёдингера:

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

где  $\hat{H}$  — гамильтониан системы, включающий кинетическую и потенциальную энергии.

### 3. Операторы физических величин

Каждой физической величине  $A$  в квантовой механике соответствует оператор  $\hat{A}$ . Измеримые значения величины  $A$  (собственные значения оператора  $\hat{A}$ ) находятся решением уравнения:

$$\hat{A}\psi = a\psi$$

где  $a$  — собственное значение,  $\psi$  — собственная функция оператора  $\hat{A}$ .

## Представление физических величин операторами

### Операторы

Физические величины в квантовой механике представляются эрмитовыми операторами. Например:

- Координата  $x$  представляется оператором  $\hat{x} = x$ .
- Импульс  $p$  представляется оператором  $\hat{p} = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$ .

Эти операторы действуют на волновую функцию и позволяют вычислять вероятности и средние значения соответствующих физических величин.

## Вычисление средних значений физических величин

Среднее значение физической величины  $A$ , представленной оператором  $\hat{A}$ , вычисляется по волновой функции  $\psi$  следующим образом:

$$\langle A \rangle = \int \psi^*(\mathbf{r}, t) \hat{A} \psi(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r}$$

где  $\psi^*$  — комплексно-сопряженная волновая функция,  $\hat{A}$  — оператор физической величины,  $\mathbf{r}$  — координата.

### Пример

Для координаты  $x$  и волновой функции  $\psi(x)$ , среднее значение координаты вычисляется так:

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(x) x \psi(x) dx$$

Для импульса  $p$  и волновой функции  $\psi(x)$ , среднее значение импульса:

$$\langle p \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(x) \left( -i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \right) \psi(x) dx$$

# Частица в одномерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Квантование энергии. Плотность вероятности нахождения частиц для различных состояний.

## Частица в одномерной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками

### Описание системы

Рассмотрим одномерную потенциальную яму с бесконечно высокими стенками. Потенциал  $V(x)$  для этой системы определяется как:

$$V(x) = \begin{cases} 0, & 0 < x < L \\ \infty, & x \leq 0 \text{ или } x \geq L \end{cases}$$

где  $L$  — ширина ямы.

### Уравнение Шрёдингера

Для частицы массы  $m$ , находящейся в этой потенциальной яме, стационарное уравнение Шрёдингера записывается как:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = E\psi(x)$$

с граничными условиями  $\psi(0) = 0$  и  $\psi(L) = 0$ .

### Решение уравнения Шрёдингера

Решение этого уравнения имеет вид:

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$  — квантовое число, определяющее разрешённые состояния.

### Квантование энергии

Энергетические уровни частицы квантуются и определяются выражением:

$$E_n = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2mL^2}$$

где  $n$  — целое число, обозначающее номер уровня энергии. Таким образом, энергия частицы в потенциальной яме дискретна.

## Плотность вероятности нахождения частиц

### Волновая функция и плотность вероятности

Волновая функция  $\psi_n(x)$  описывает вероятностное распределение нахождения частицы. Плотность вероятности нахождения частицы в точке  $x$  в состоянии  $n$  определяется как  $|\psi_n(x)|^2$ :

$$|\psi_n(x)|^2 = \left( \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \left( \frac{n\pi x}{L} \right) \right)^2 = \frac{2}{L} \sin^2 \left( \frac{n\pi x}{L} \right)$$

### Плотность вероятности для различных состояний

1. Основное состояние  $n = 1$ :

$$\begin{aligned} \psi_1(x) &= \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \left( \frac{\pi x}{L} \right) \\ |\psi_1(x)|^2 &= \frac{2}{L} \sin^2 \left( \frac{\pi x}{L} \right) \end{aligned}$$

2. Первое возбужденное состояние  $n = 2$ :

$$\begin{aligned} \psi_2(x) &= \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \left( \frac{2\pi x}{L} \right) \\ |\psi_2(x)|^2 &= \frac{2}{L} \sin^2 \left( \frac{2\pi x}{L} \right) \end{aligned}$$

3. Второе возбужденное состояние  $n = 3$ :

$$\begin{aligned} \psi_3(x) &= \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \left( \frac{3\pi x}{L} \right) \\ |\psi_3(x)|^2 &= \frac{2}{L} \sin^2 \left( \frac{3\pi x}{L} \right) \end{aligned}$$

## Интерпретация

- Для основного состояния  $n = 1$ , плотность вероятности максимальна в центре ямы и минимальна у стенок.

- Для первого возбужденного состояния  $n = 2$ , плотность вероятности имеет два максимума и один минимум в центре ямы.
- Для второго возбужденного состояния  $n = 3$ , плотность вероятности имеет три максимума и два минимума.

Таким образом, с увеличением  $n$  количество узловых точек (точек, где плотность вероятности равна нулю) увеличивается.

# Частица в трехмерном потенциальном ящике. Энергетический спектр частицы. Понятие о вырождении энергетических уровней.

## Частица в трехмерном потенциальном ящике

### Описание системы

Рассмотрим частицу массы  $m$ , заключенную в трехмерный потенциальный ящик с бесконечно высокими стенками. Потенциал  $V(x, y, z)$  для этой системы определяется как:

$$V(x, y, z) = \begin{cases} 0, & 0 < x < L_x, 0 < y < L_y, 0 < z < L_z \\ \infty, & \text{вне этих границ} \end{cases}$$

где  $L_x$ ,  $L_y$ , и  $L_z$  — размеры ящика вдоль осей  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно.

### Уравнение Шрёдингера

Для этой системы стационарное уравнение Шрёдингера имеет вид:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2 \psi(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi(x, y, z)}{\partial z^2} \right) = E \psi(x, y, z)$$

с граничными условиями  $\psi(0, y, z) = \psi(L_x, y, z) = 0$ ,  $\psi(x, 0, z) = \psi(x, L_y, z) = 0$ ,  $\psi(x, y, 0) = \psi(x, y, L_z) = 0$ .

### Решение уравнения Шрёдингера

Решение уравнения Шрёдингера в трехмерном ящике представляется в виде произведения одно-мерных функций:

$$\psi_{n_x, n_y, n_z}(x, y, z) = \sqrt{\frac{8}{L_x L_y L_z}} \sin\left(\frac{n_x \pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{n_y \pi y}{L_y}\right) \sin\left(\frac{n_z \pi z}{L_z}\right)$$

где  $n_x, n_y, n_z$  — квантовые числа, принимающие значения  $1, 2, 3, \dots$

### Энергетический спектр

Энергетические уровни частицы в трехмерном потенциальном ящике квантуются и определяются выражением:



$$E_{n_x, n_y, n_z} = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m} \left( \frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} + \frac{n_z^2}{L_z^2} \right)$$

где  $n_x, n_y, n_z$  — квантовые числа.

## Понятие о вырождении энергетических уровней

Энергетический уровень называется вырожденным, если ему соответствует более одного набора квантовых чисел  $(n_x, n_y, n_z)$ . Вырождение происходит, когда разные наборы квантовых чисел дают одно и то же значение энергии.

Пример: для кубического ящика ( $L_x = L_y = L_z$ ), уровни энергии могут быть вырожденными. Например, для  $n_x = 1, n_y = 1, n_z = 2$  и  $n_x = 1, n_y = 2, n_z = 1$  энергии будут одинаковыми.

## Плотность вероятности нахождения частицы

Плотность вероятности нахождения частицы в точке  $(x, y, z)$  для состояния  $(n_x, n_y, n_z)$  определяется как квадрат модуля волновой функции:

$$|\psi_{n_x, n_y, n_z}(x, y, z)|^2 = \frac{8}{L_x L_y L_z} \sin^2 \left( \frac{n_x \pi x}{L_x} \right) \sin^2 \left( \frac{n_y \pi y}{L_y} \right) \sin^2 \left( \frac{n_z \pi z}{L_z} \right)$$

Плотность вероятности показывает, где в ящике наиболее вероятно нахождение частицы в данном квантовом состоянии. Для разных наборов квантовых чисел плотности вероятности будут различными и иметь свои особенности.

# Орбитальный, спиновой и полный механический и магнитный моменты электрона.

## Орбитальный момент

### Орбитальный механический момент (угловой момент)

Орбитальный механический момент электрона в атоме связан с его движением вокруг ядра и определяется как:

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$$

где  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор, указывающий положение электрона относительно ядра,  $\mathbf{p}$  — импульс электрона.

В квантовой механике орбитальный момент квантуется и определяется квантовым числом  $l$ :

$$L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$$

где  $l$  — орбитальное квантовое число, принимающее целые значения  $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ , а  $\hbar$  — приведенная постоянная Планка.

### Орбитальный магнитный момент

Орбитальный магнитный момент электрона связан с его орбитальным движением и определяется как:

$$\mu_L = -\frac{e}{2m}\mathbf{L}$$

где  $e$  — заряд электрона,  $m$  — его масса.

## Спиновой момент

### Спиновой механический момент

Спин — это внутренняя характеристика частицы, аналогичная угловому моменту, но не связанная с движением частицы в пространстве. Спин электрона квантуется и определяется спиновым квантовым числом  $s$ :

$$S = \sqrt{s(s+1)}\hbar$$

Для электрона  $s = \frac{1}{2}$ , таким образом, спиновой момент электрона равен:

$$S = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar$$

### Спиновой магнитный момент

Спиновой магнитный момент электрона определяется как:

$$\mu_S = -g_s \frac{e}{2m} \mathbf{S}$$

где  $g_s \approx 2$  — гиромагнитное отношение для спина электрона.

### Полный механический момент

Полный механический момент  $\mathbf{J}$  — это векторная сумма орбитального и спинного моментов:

$$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$$

Квантовое число полного момента  $j$  определяется как:

$$J = \sqrt{j(j+1)} \hbar$$

где  $j$  может принимать значения от  $|l - s|$  до  $l + s$  с шагом 1.

### Полный магнитный момент

Полный магнитный момент также является векторной суммой орбитального и спинного магнитных моментов:

$$\mu_J = \mu_L + \mu_S$$

## Понятие вырождения энергетических уровней

**Вырождение энергетических уровней** — это явление, при котором одному значению энергии соответствует несколько различных квантовых состояний. Вырожденные состояния характеризуются различными наборами квантовых чисел, которые приводят к одному и тому же значению энергии.

# Собственные механический и магнитный моменты электрона. Опыт Штерна и Герлаха.

## Собственный механический момент (спин)

Электрон обладает внутренним угловым моментом, называемым спином. Спин — это квантово-механическая характеристика, не имеющая классического аналога, и для электрона он равен  $\frac{1}{2}\hbar$ . Вектор спинового момента  $\mathbf{S}$  выражается как:

$$\mathbf{S} = \sqrt{s(s+1)}\hbar$$

где  $s = \frac{1}{2}$ .

## Собственный магнитный момент

Магнитный момент, связанный со спином электрона, называется спиновым магнитным моментом и определяется выражением:

$$\mu_s = -g_s \frac{e}{2m} \mathbf{S}$$

где:

- $g_s \approx 2$  — гиромагнитное отношение для спина электрона,
- $e$  — заряд электрона,
- $m$  — масса электрона,
- $\mathbf{S}$  — спиновый момент.

## Опыт Штерна и Герлаха

Опыт Штерна и Герлаха, проведенный в 1922 году, был разработан для демонстрации квантования углового момента. В этом эксперименте пучок атомов серебра пропускается через неоднородное магнитное поле.

### Описание эксперимента:

1. Атомы серебра испускаются из печи и проходят через коллиматор, формирующий узкий пучок.
2. Этот пучок направляется через неоднородное магнитное поле, которое создает градиент поля вдоль определенного направления.

3. После прохождения через магнитное поле, атомы попадают на детектор, где наблюдается их распределение.

### **Результаты и интерпретация:**

- В отсутствии магнитного поля пучок остается неразделенным.
- В присутствии неоднородного магнитного поля пучок разделяется на два отдельных пучка, соответствующих двум возможным ориентациям спина электрона (вверх и вниз по направлению магнитного поля).

Этот эксперимент подтвердил, что угловой момент и, следовательно, магнитный момент квантованы и могут принимать только дискретные значения, соответствующие  $\pm \frac{\hbar}{2}$ . Опыт Штерна и Герлаха показал, что спин электрона может быть направлен либо параллельно, либо антипараллельно направлению внешнего магнитного поля, что соответствует двум возможным значениям проекции спина на это направление.

# Фотопроводимость полупроводников.

## Процессы генерации и рекомбинации носителей заряда.

Фотопроводимость полупроводников — это явление увеличения электрической проводимости полупроводникового материала при его облучении светом. Этот процесс связан с генерацией и рекомбинацией носителей заряда в полупроводнике.

### Процессы генерации носителей заряда

Когда полупроводник облучается светом, фотоны могут поглощаться материалом, если энергия фотонов превышает ширину запрещенной зоны  $E_g$  полупроводника. Этот процесс приводит к генерации электронно-дырочных пар:



Генерация электронов и дырок увеличивает концентрацию носителей заряда в полупроводнике, что, в свою очередь, приводит к увеличению его проводимости.

### Процессы рекомбинации носителей заряда

Рекомбинация — это процесс, обратный генерации, при котором электрон из зоны проводимости переходит в валентную зону, занимая место дырки, и при этом выделяется энергия (например, в виде фотона или тепла). Существует два основных типа рекомбинации:

1. **Радиативная рекомбинация** — при этом процессе энергия рекомбинации выделяется в виде фотона. Этот процесс важен в таких устройствах, как светодиоды и лазеры.
2. **Безрадиационная рекомбинация** — при этом процессе энергия передается другому электрону или фонону, и выделяется в виде тепла.

### Влияние на проводимость

Увеличение числа свободных носителей заряда (электронов и дырок) приводит к увеличению электрической проводимости полупроводника. При поглощении фотонов с энергией  $h\nu \geq E_g$  каждый поглощенный фотон создает пару носителей заряда, что приводит к увеличению тока в электрической цепи при приложении внешнего напряжения.

# Применение фотопроводимости

Фотопроводимость используется в различных приложениях, таких как:

- **Фотодетекторы:** Устройства, преобразующие световой сигнал в электрический.
- **Солнечные элементы:** Преобразование солнечной энергии в электрическую.
- **Оптоэлектронные устройства:** Различные сенсоры и модуляторы света.

# Принцип работы лазера. Особенности лазерного излучения. Основные типы лазеров, их применение.

Лазер (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) — это устройство, которое создает интенсивный когерентный пучок света посредством усиления света за счет стимулированного излучения.

## Основные принципы работы лазера

### 1. Инверсная населённость:

Для работы лазера необходима инверсная населённость, когда число атомов (или молекул) в возбужденном состоянии превышает число атомов в основном состоянии. Это достигается за счет накачки энергии (оптической, электрической или химической) в активную среду.

### 2. Стимулированное излучение:

При прохождении фотона через среду с инверсной населённостью он может индуцировать испускание другого фотона с той же частотой, фазой и направлением. Этот процесс называется стимулированным излучением и является ключевым для усиления света в лазере.

### 3. Оптический резонатор:

Лазер содержит оптический резонатор, состоящий из двух параллельных зеркал, между которыми многократно отражается свет. Одно из зеркал полупрозрачное, что позволяет части света выходить наружу в виде когерентного лазерного пучка.

## Особенности лазерного излучения

#### • Когерентность:

Лазерное излучение когерентно, то есть волны имеют постоянную фазовую разность. Это позволяет создавать узконаправленные пучки света и использовать их в интерференционных и дифракционных экспериментах.

#### • Монохроматичность:

Лазеры излучают свет с очень узким диапазоном частот (одной длиной волны), что позволяет получать высокую спектральную яркость.

#### • Направленность:

Лазерные пучки имеют очень малое расхождение, что позволяет передавать свет на большие расстояния без значительных потерь.



- **Высокая интенсивность:**

Лазеры способны генерировать очень интенсивные пучки света, что делает их полезными для различных применений, включая резку и сварку материалов.

## **Основные типы лазеров и их применение**

### **1. Газовые лазеры:**

- **Гелий-неоновый лазер:** Используется в выравнивании, голографии и в качестве указок.
- **Лазеры на углекислом газе (CO<sub>2</sub>):** Применяются для резки, сварки и обработки материалов.

### **2. Твердотельные лазеры:**

- **Рубиновый лазер:** Один из первых типов лазеров, используется в научных исследованиях.
- **Неодимовый лазер (Nd:YAG):** Используется в медицине, для резки и сверления твердых материалов, в военных и научных приложениях.

### **3. Полупроводниковые (диодные) лазеры:**

- Применяются в лазерных указках, оптических дисководы, телекоммуникациях и медицинских устройствах.

### **4. Красители лазеры:**

- Используют органические красители в качестве активной среды. Применяются в спектроскопии и медицине для удаления татуировок и лечения кожи.

### **5. Волоконные лазеры:**

- Используют оптические волокна, активированные редкоземельными элементами. Применяются в телекоммуникациях, медицине и промышленной обработке материалов.

# Эмиссия электронов из металла. Эффект Шоттки. Холодная (автоэлектронная) эмиссия.

## Эмиссия электронов из металла

Эмиссия электронов из металла — это процесс, при котором электроны покидают поверхность металла под действием различных внешних воздействий. Существуют несколько типов эмиссии: термоэлектронная, фотоэлектронная, автоэлектронная и вторичная электронная эмиссия.

### Термоэлектронная эмиссия

Этот процесс происходит при нагреве металла до высокой температуры, при которой кинетическая энергия электронов становится достаточной для преодоления работы выхода — энергии, необходимой для выхода электрона из металла в вакуум.

### Эффект Шоттки

Эффект Шоттки заключается в снижении работы выхода электрона из металла под воздействием внешнего электрического поля. Электрическое поле деформирует потенциальный барьер на поверхности металла, что облегчает выход электронов.

Основные моменты:

- **Снижение работы выхода:** Электрическое поле уменьшает работу выхода на величину, зависящую от напряженности поля.
- **Усиление термоэлектронной эмиссии:** Эффект Шоттки увеличивает плотность тока термоэлектронной эмиссии за счет уменьшения энергетического барьера для электронов.

### Холодная (автоэлектронная) эмиссия

Автоэлектронная эмиссия, или холодная эмиссия, происходит при низких температурах под воздействием сильного электрического поля.

Основные моменты:

- **Туннелирование:** Электроны туннелируют через потенциальный барьер, созданный сильным электрическим полем.

- **Сильные поля:** Эффективность автоэлектронной эмиссии значительно увеличивается при применении сильных электрических полей.
- **Применение:** Автоэлектронная эмиссия используется в электронных микроскопах, фотовольтаике и в различных вакуумных электронных устройствах.

## Подробное объяснение

### Термоэлектронная эмиссия

Для термоэлектронной эмиссии ток плотности  $J$  определяется уравнением Ричардсона:

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{W}{kT}\right)$$

где  $A$  — константа Ричардсона,  $T$  — температура,  $W$  — работа выхода,  $k$  — постоянная Больцмана.

### Эффект Шоттки

При эффекте Шоттки работа выхода  $W$  уменьшается на величину  $\Delta W$ , которая зависит от напряженности электрического поля  $E$ :

$$\Delta W = \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}}$$

где  $e$  — заряд электрона,  $\epsilon_0$  — диэлектрическая постоянная вакуума.

### Холодная (автоэлектронная) эмиссия

Автоэлектронная эмиссия описывается уравнением Фаулера-Нордгейма, которое связывает плотность тока эмиссии  $J$  с напряженностью электрического поля  $E$ :

$$J = \frac{aE^2}{\phi} \exp\left(-\frac{b\phi^{3/2}}{E}\right)$$

где  $a$  и  $b$  — константы,  $\phi$  — работа выхода.

# Собственная проводимость полупроводников. Концентрация электронов и дырок в чистых полупроводниках. Температурная зависимость...

## Собственная проводимость полупроводников

### Определение

Собственная (инtrinзик) проводимость полупроводников обусловлена тепловым возбуждением электронов из валентной зоны в зону проводимости в чистых (без примесей) материалах.

### Концентрация электронов и дырок в чистых полупроводниках

В чистых полупроводниках (например, кремнии и германии) при температуре выше абсолютного нуля некоторое количество электронов получает достаточную энергию для перехода из валентной зоны в зону проводимости, оставляя за собой дырки в валентной зоне. Эти свободные электроны и дырки являются носителями заряда, определяющими проводимость материала.

### Основные уравнения

Для собственной проводимости:

$$n = p$$

где  $n$  — концентрация электронов в зоне проводимости, а  $p$  — концентрация дырок в валентной зоне. Оба этих параметра равны собственной концентрации  $n_i$ .

### Концентрация носителей заряда

Концентрация собственных носителей заряда в полупроводнике  $n_i$  определяется выражением:

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

где:

- $N_c$  — эффективная плотность состояний в зоне проводимости,
- $N_v$  — эффективная плотность состояний в валентной зоне,
- $E_g$  — ширина запрещенной зоны,
- $k$  — постоянная Больцмана,
- $T$  — температура.

## Температурная зависимость собственной проводимости

Концентрация собственных носителей заряда сильно зависит от температуры. При повышении температуры большее количество электронов получает энергию, достаточную для перехода через запрещенную зону, что увеличивает  $n_i$ . Это приводит к экспоненциальному росту проводимости с повышением температуры:

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p)$$

где:

- $\sigma$  — проводимость,
- $\mu_n$  — подвижность электронов,
- $\mu_p$  — подвижность дырок,
- $e$  — заряд электрона.

## Уровень Ферми в чистых полупроводниках

Уровень Ферми  $E_F$  — это химический потенциал системы, уровень энергии, при котором вероятность нахождения электрона равна 1/2 при абсолютном нуле температуры. В чистых полупроводниках уровень Ферми находится посередине запрещенной зоны, так как концентрации электронов и дырок равны:

$$E_F \approx \frac{E_c + E_v}{2}$$

где:

- $E_c$  — минимальная энергия зоны проводимости,
- $E_v$  — максимальная энергия валентной зоны.

## Заключение

Собственная проводимость полупроводников определяется тепловым возбуждением электронов через запрещенную зону, и её величина зависит от температуры

экспоненциально. Концентрация носителей заряда и уровень Ферми играют ключевую роль в определении электрических свойств чистых полупроводников.

# Примесная проводимость полупроводников. Концентрация основных и неосновных носителей в полупроводниках р-типа. Уровень Ферми...

## Примесная проводимость полупроводников

### Примесная проводимость

Примесная проводимость возникает в полупроводниках, когда в них вводятся примеси, изменяющие концентрацию носителей заряда. Эти примеси делятся на донорные и акцепторные. В случае полупроводников р-типа используются акцепторные примеси.

### Концентрация основных и неосновных носителей в полупроводниках р-типа

В полупроводниках р-типа основными носителями заряда являются дырки, создаваемые акцепторными примесями, которые захватывают электроны из валентной зоны. Неосновные носители — электроны, находятся в зоне проводимости, их концентрация значительно меньше.

Концентрация дырок ( $p$ ) в полупроводнике р-типа определяется концентрацией акцепторных атомов ( $N_A$ ):

$$p \approx N_A$$

Концентрация электронов ( $n$ ) определяется выражением:

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

где  $n_i$  — концентрация собственных носителей заряда.

### Уровень Ферми примесного полупроводника р-типа

В примесных полупроводниках уровень Ферми ( $E_F$ ) смещается вблизи уровня акцепторных примесей, который находится чуть выше валентной зоны. Для полупроводника р-типа уровень Ферми находится ближе к валентной зоне:

$$E_F \approx E_V + kT \ln \left( \frac{N_V}{N_A} \right)$$

где:

- $E_V$  — энергия верхнего края валентной зоны,
- $N_V$  — эффективная плотность состояний в валентной зоне,
- $k$  — постоянная Больцмана,
- $T$  — температура.

## Температурная зависимость проводимости примесного полупроводника р-типа

Температурная зависимость проводимости примесного полупроводника р-типа можно разделить на три области:

### 1. Область замерзания (низкие температуры):

- При очень низких температурах большинство акцепторных уровней остаются неионизированными, и проводимость очень мала.

### 2. Область ионизации (промежуточные температуры):

- При увеличении температуры акцепторные атомы ионизируются, создавая большое количество дырок. Проводимость резко возрастает.

### 3. Область насыщения (высокие температуры):

- При ещё большем повышении температуры, когда все акцепторные уровни ионизированы, проводимость определяется собственными носителями заряда. В этой области проводимость определяется экспоненциальной зависимостью, характерной для собственных полупроводников.

## Заключение

Примесная проводимость полупроводников р-типа обусловлена ионизацией акцепторных примесей, которые создают дырки как основные носители заряда. Уровень Ферми находится близко к валентной зоне и меняется с температурой. Проводимость полупроводников р-типа демонстрирует характерную температурную зависимость, отражающую процесс ионизации и вклад собственных носителей при высоких температурах.



# **Примесная проводимость полупроводников. Концентрация основных и неосновных носителей в полупроводниках n-типа. Уровень Ферми...**

## **Примесная проводимость полупроводников**

### **Примесная проводимость**

Примесная проводимость в полупроводниках обусловлена введением примесей, которые изменяют концентрацию носителей заряда. В полупроводниках n-типа используются донорные примеси, которые добавляют свободные электроны в зону проводимости.

### **Концентрация основных и неосновных носителей в полупроводниках n-типа**

В полупроводниках n-типа основными носителями заряда являются электроны, создаваемые донорными примесями, которые предоставляют свои электроны в зону проводимости. Неосновными носителями являются дырки в валентной зоне, концентрация которых значительно меньше.

Концентрация электронов ( $n$ ) в полупроводнике n-типа определяется концентрацией донорных атомов ( $N_D$ ):

$$n \approx N_D$$

Концентрация дырок ( $p$ ) определяется выражением:

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

где  $n_i$  — концентрация собственных носителей заряда.

### **Уровень Ферми примесного полупроводника n-типа**

В примесных полупроводниках уровень Ферми ( $E_F$ ) смещается вблизи уровня донорных примесей, который находится чуть ниже зоны проводимости. Для полупроводника n-типа уровень Ферми находится ближе к зоне проводимости:

$$E_F \approx E_C - kT \ln \left( \frac{N_C}{N_D} \right)$$

где:

- $E_C$  — энергия нижнего края зоны проводимости,
- $N_C$  — эффективная плотность состояний в зоне проводимости,
- $k$  — постоянная Больцмана,
- $T$  — температура.

## Температурная зависимость проводимости примесного полупроводника n-типа

Температурная зависимость проводимости примесного полупроводника n-типа можно разделить на три области:

### 1. Область замерзания (низкие температуры):

- При очень низких температурах большинство донорных уровней остаются неионизированными, и проводимость очень мала.

### 2. Область ионизации (промежуточные температуры):

- При увеличении температуры донорные атомы ионизуются, создавая большое количество свободных электронов. Проводимость резко возрастает.

### 3. Область насыщения (высокие температуры):

- При ещё большем повышении температуры, когда все донорные уровни ионизированы, проводимость определяется собственными носителями заряда. В этой области проводимость определяется экспоненциальной зависимостью, характерной для собственных полупроводников.

## Заключение

Примесная проводимость полупроводников n-типа обусловлена ионизацией донорных примесей, которые создают свободные электроны как основные носители заряда. Уровень Ферми находится близко к зоне проводимости и меняется с температурой. Проводимость полупроводников n-типа демонстрирует характерную температурную зависимость, отражающую процесс ионизации и вклад собственных носителей при высоких температурах.

# Ядерная модель атома Резерфорда-Бора.

## Постулаты Бора. (Билет 10, 24)

### Ядерная модель атома Резерфорда:

Ядерная модель атома, предложенная Резерфордом, основывалась на результатах экспериментов по рассеянию альфа-частиц. В этих экспериментах было обнаружено, что альфа-частицы отклоняются на большие углы при прохождении через тонкие металлические фольги. Это наблюдение привело к выводу, что положительный заряд и основная масса атома сосредоточены в очень маленькой области пространства, которая получила название "ядро". Оставшаяся часть атома занята электронами, которые движутся вокруг ядра на значительных расстояниях.

Основные положения модели:

1. Атом состоит из маленького, плотного, положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома.
2. Вокруг ядра на больших расстояниях находятся электроны, движущиеся по орбитам под действием кулоновских сил притяжения.

### Постулаты Бора:

В 1913 году Нильс Бор предложил два постулата для объяснения устойчивости атомов и дискретных спектров излучения:

#### 1. Первый постулат Бора:

- Из бесконечного множества электронных орбит, возможных с точки зрения классической механики, осуществляются только некоторые, удовлетворяющие определенным условиям, а именно: для которых момент импульса равен целому кратному постоянной Планка:

$$p_e r = m_e v r = n \hbar$$

где  $n$  называется главным квантовым числом. **Находясь на одной из таких орбит, электрон энергию не излучает.**

#### 2. Второй постулат Бора:

- Излучение испускается или поглощается в виде кванта энергии  $\hbar\omega$  при переходе электрона из одного состояния с энергией  $E_m$  в другое, обладающее энергией  $E_n$ , т.е.

$$\hbar\omega_{nm} = E_n - E_m$$

## **Дополнительные детали:**

- Планетарная модель Резерфорда объясняет наблюдаемые данные, но классическая физика предсказывала нестабильность атомов, что привело к необходимости введения квантовых постулатов Бора.
- Постулаты Бора легли в основу квантовой механики, объясняя устойчивость атомов и дискретные линии спектров излучения.

# Радиоактивность. Закон радиоактивного распада. Виды радиоактивных излучений.

## Радиоактивность

### Определение радиоактивности

Радиоактивность — это самопроизвольное превращение нестабильных атомных ядер в более стабильные с испусканием частиц и/или электромагнитного излучения. Этот процесс сопровождается выделением энергии.

### Закон радиоактивного распада

Закон радиоактивного распада гласит, что количество нестабильных ядер в радиоактивном образце уменьшается экспоненциально со временем. Математически это выражается следующим образом:

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

где:

- $N(t)$  — количество оставшихся радиоактивных ядер в момент времени  $t$ ,
- $N_0$  — начальное количество радиоактивных ядер,
- $\lambda$  — константа распада, характеризующая вероятность распада ядра в единицу времени.

**Период полураспада** ( $T_{1/2}$ ) — это время, за которое распадается половина начального количества радиоактивных ядер. Связь между периодом полураспада и константой распада выражается формулой:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

## Виды радиоактивных излучений

Радиоактивные излучения делятся на три основных типа:

### 1. Альфа-излучение ( $\alpha$ -излучение):

- Состоит из альфа-частиц ( $\alpha$ -частиц), представляющих собой ядра гелия-4 ( ${}^4\text{He}$ ).
- Альфа-частицы имеют положительный заряд и сравнительно большую массу.

- Обладают низкой проникающей способностью и могут быть остановлены листом бумаги или кожей.
- Примеры:  $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} + \alpha$

## 2. Бета-излучение ( $\beta$ -излучение):

- Состоит из электронов ( $\beta^-$ -частицы) или позитронов ( $\beta^+$ -частицы).
- Электроны ( $\beta^-$ ) испускаются при бета-минус распаде нейтрона, превращающегося в протон, позитрон и антинейтрино.
- Позитроны ( $\beta^+$ ) испускаются при бета-плюс распаде протона, превращающегося в нейтрон, нейтрино и позитрон.
- Обладают средней проникающей способностью, могут быть остановлены несколькими миллиметрами алюминия.
- Примеры:  $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + \beta^- + \bar{\nu}_e$

## 3. Гамма-излучение ( $\gamma$ -излучение):

- Электромагнитное излучение с высокой энергией и короткой длиной волны.
- Обычно сопутствует альфа- и бета-распадам.
- Обладает высокой проникающей способностью и может быть остановлено толстым слоем свинца или бетона.
- Пример:  $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni} + \gamma$

# Примеры применения радиоактивности

## 1. Медицинские приложения:

- Лучевая терапия для лечения раковых заболеваний.
- Радиоизотопы для диагностики (например,  $^{99m}\text{Tc}$  в ядерной медицине).

## 2. Промышленные приложения:

- Радиографический контроль для выявления дефектов в материалах.
- Датчики дыма, использующие  $^{241}\text{Am}$ .

## 3. Научные исследования:

- Радиоизотопное датирование для определения возраста археологических находок (например, углерод-14 датирование).

# **Элементарные частицы. Виды взаимодействий элементарных частиц. Классификация частиц. Лептоны и адроны. Кварковая структура адронов.**

## **Элементарные частицы**

Элементарные частицы — это фундаментальные компоненты материи, которые не состоят из более простых частиц. Они являются основными строительными блоками Вселенной.

## **Виды взаимодействий элементарных частиц**

Существуют четыре основных типа фундаментальных взаимодействий:

### **1. Сильное взаимодействие:**

- Действует между кварками и глюонами.
- Ответственно за удержание кварков в адронах и адронов в атомных ядрах.
- Передатчики: глюоны.

### **2. Электромагнитное взаимодействие:**

- Действует между электрически заряженными частицами.
- Описывается квантовой электродинамикой (КЭД).
- Передатчики: фотоны.

### **3. Слабое взаимодействие:**

- Отвечает за процессы, в которых изменяется тип кварка, такие как бета-распад.
- Передатчики:  $W$ - и  $Z$ -бозоны.

### **4. Гравитационное взаимодействие:**

- Действует между всеми частицами, обладающими массой.
- Описывается общей теорией относительности.
- Предполагаемый передатчик: гравитон.

## **Классификация частиц**

Элементарные частицы делятся на две основные категории: фермионы и бозоны.

### **1. Фермионы:**

- Частицы, подчиняющиеся статистике Ферми-Дирака.

- Имеют полуцелый спин ( $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$ ).
- Включают кварки и лептоны.

## 2. Бозоны:

- Частицы, подчиняющиеся статистике Бозе-Эйнштейна.
- Имеют целый спин (0, 1, 2,  $\dots$ ).
- Включают калибровочные бозоны (глюоны, фотоны, W- и Z-бозоны) и гравитоны (гипотетические).

# Лептоны и адроны

## Лептоны:

- Лептоны — это элементарные частицы с полуцелым спином, не участвующие в сильном взаимодействии.
- Включают электроны, мюоны, тау-лептоны и нейтрино.
- Существуют в трех поколениях:
  - Первое поколение: электрон ( $e^-$ ), электронное нейтрино ( $\nu_e$ ).
  - Второе поколение: мюон ( $\mu^-$ ), мюонное нейтрино ( $\nu_\mu$ ).
  - Третье поколение: тау-лептон ( $\tau^-$ ), тау-нейтрино ( $\nu_\tau$ ).

## Адроны:

- Адроны — это частицы, состоящие из кварков и участвующие в сильном взаимодействии.
- Делятся на две группы:
  - **Барионы:** Состоят из трех кварков (например, протон и нейтрон).
  - **Мезоны:** Состоят из одного кварка и одного антикварка (например, пионы и каоны).

# Кварковая структура адронов

Кварки — это фундаментальные частицы, которые составляют адроны. Существует шесть типов (или "вкусов") кварков:

1. Верхний (u)
2. Нижний (d)
3. Странный (s)
4. Очарованный (c)
5. Истинный (t)
6. Прелестный (b)



**Барионы** состоят из трех кварков, например:

- Протон ( $p$ ):  $uud$
- Нейтрон ( $n$ ):  $udd$

**Мезоны** состоят из кварка и антикварка, например:

- Пион ( $\pi^+$ ):  $u\bar{d}$

## Пример кварковой структуры

- Кварки удерживаются вместе глюонами, которые являются переносчиками сильного взаимодействия.
- Каждая комбинация кварков в адронах подчиняется правилам квантовой хромодинамики (КХД).

Эти темы и их объяснения подробно рассматриваются в учебнике "Основы физики. Квантовая и статистическая физика" .

# Элементарные частицы, их основные характеристики. Симметрия и законы сохранения в мире элементарных частиц.

## Элементарные частицы и их основные характеристики

### Основные характеристики элементарных частиц

Элементарные частицы классифицируются на два типа: фермионы и бозоны.

#### 1. Фермионы:

- **Кварки:** Включают шесть типов (вкусов) — верхний (u), нижний (d), странный (s), очарованный (c), истинный (t), прелестный (b).
  - **Масса:** Значительно различается между разными кварками, от нескольких МэВ/с<sup>2</sup> до более 100 ГэВ/с<sup>2</sup>.
  - **Заряд:** +2/3 или -1/3 элементарного заряда.
  - **Спин:** 1/2.
- **Лептоны:** Включают электроны, мюоны, тау-лептоны и соответствующие нейтрино.
  - **Масса:** Электроны и мюоны имеют массу от 0,511 МэВ/с<sup>2</sup> до 105,7 МэВ/с<sup>2</sup>; нейтрино имеют очень малую массу.
  - **Заряд:** Электроны, мюоны и тау-лептоны имеют заряд -1; нейтрино — 0.
  - **Спин:** 1/2.

#### 2. Бозоны:

- **Калибровочные бозоны:** Передатчики фундаментальных взаимодействий.
  - **Фотон ( $\gamma$ ):** Безмассовый, спин 1, передает электромагнитное взаимодействие.
  - **Глюон ( $g$ ):** Безмассовый, спин 1, передает сильное взаимодействие.
  - **W- и Z-бозоны:** Масса около 80,4 ГэВ/с<sup>2</sup> (W) и 91,2 ГэВ/с<sup>2</sup> (Z), спин 1, передают слабое взаимодействие.
- **Хиггсовский бозон:** Масса около 125 ГэВ/с<sup>2</sup>, спин 0, отвечает за механизм генерации массы через поле Хиггса.

## Симметрия и законы сохранения в мире элементарных частиц

### Законы сохранения

1. **Закон сохранения энергии:** Общая энергия изолированной системы остается постоянной.
2. **Закон сохранения импульса:** Суммарный импульс изолированной системы остается постоянным.
3. **Закон сохранения углового момента:** Общий угловой момент (орбитальный + спиновой) изолированной системы остается постоянным.
4. **Закон сохранения электрического заряда:** Общий электрический заряд системы остается постоянным.
5. **Закон сохранения барионного числа:** Число барионов минус число антибарионов остается постоянным в ядерных реакциях.
6. **Закон сохранения лептонного числа:** Сумма лептонных чисел (различных поколений) остается постоянной в элементарных процессах.

## Симметрии

1. **Симметрия заряда (C-симметрия):** Обмен частиц на соответствующие античастицы.
2. **Пространственная инверсия (P-симметрия):** Зеркальное отражение координат.
3. **Временная инверсия (T-симметрия):** Обратное направление времени.
4. **Комбинированная симметрия (CPT-симметрия):** Объединяет зарядовую, пространственную и временную инверсии. Предполагается, что все физические процессы инвариантны относительно CPT-преобразования.

## Взаимодействия и симметрии

1. **Электромагнитное взаимодействие:** Инвариантно относительно C, P, T и CPT.
2. **Сильное взаимодействие:** Инвариантно относительно C, P и T, но нарушает CP-симметрию.
3. **Слабое взаимодействие:** Нарушает C и P, но инвариантно относительно CPT.

## Лептоны и адроны

- **Лептоны:** Легкие частицы, не участвующие в сильном взаимодействии. Примеры: электроны, мюоны, нейтрино.
- **Адроны:** Частицы, участвующие в сильном взаимодействии. Включают барионы (например, протоны и нейтроны) и мезоны (например, пионы).

## Кварковая структура адронов

Адроны состоят из кварков, удерживаемых глюонами. Примеры:

- **Протон:** Состоит из двух верхних (u) кварков и одного нижнего (d) кварка ( $uud$ ).
- **Нейтрон:** Состоит из одного верхнего (u) кварка и двух нижних (d) кварков ( $udd$ ).
- **Пионы:** Мезоны, состоящие из одного кварка и одного антикварка (например,  $\pi^+$  состоит из  $u$  и  $\bar{d}$ ).

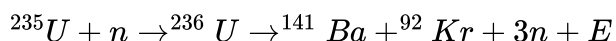
# Деление тяжелых ядер, цепные реакции. Термоядерный синтез.

## Деление тяжелых ядер и цепные реакции

### Деление тяжелых ядер

Деление тяжелых ядер — это процесс, при котором тяжелое атомное ядро (например, уран-235 или плутоний-239) делится на два или более меньших ядра, высвобождая при этом значительное количество энергии и несколько нейтронов. Этот процесс может быть вызван захватом нейтрона ядром.

Пример реакции деления урана-235:



где:

- $^{235}\text{U}$  — уран-235,
- $n$  — нейтрон,
- $^{141}\text{Ba}$  — барий-141,
- $^{92}\text{Kr}$  — криптон-92,
- $E$  — высвобожденная энергия.

### Цепные реакции

Цепная реакция — это процесс, при котором деление одного ядра вызывает последующее деление других ядер, что ведет к самоподдерживающемуся процессу. Для цепной реакции необходимы три условия:

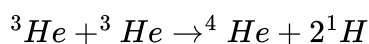
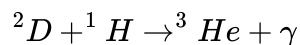
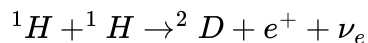
1. Достаточное количество делящихся ядер (масса, превышающая критическую).
2. Эффективное замедление нейтронов (модерация).
3. Удержание нейтронов в активной зоне (отражение).

Цепные реакции лежат в основе работы ядерных реакторов и атомных бомб. В ядерных реакторах цепная реакция контролируется с помощью регулирующих стержней, поглощающих нейтроны.

### Термоядерный синтез

Термоядерный синтез — это процесс, при котором легкие атомные ядра сливаются в более тяжелые, высвобождая огромное количество энергии. Этот процесс происходит при очень высоких температурах и давлениях, которые необходимы для преодоления кулоновского отталкивания между ядрами.

Пример реакции термоядерного синтеза в звездах (в том числе в Солнце):



где:

- ${}^1_1\text{H}$  — протон,
- ${}^2_1\text{D}$  — дейтерий,
- ${}^3_2\text{He}$  — гелий-3,
- ${}^4_2\text{He}$  — гелий-4,
- $e^+$  — позитрон,
- $\nu_e$  — нейтрино,
- $\gamma$  — гамма-квант.

## Особенности и применение

- **Ядерные реакторы:** Используются для генерации электроэнергии на основе контролируемой цепной реакции деления.
- **Термоядерные реакторы:** Разрабатываются для генерации энергии на основе термоядерного синтеза (например, проект ITER).
- **Атомные бомбы:** Используют неконтролируемую цепную реакцию деления.
- **Водородные бомбы:** Используют термоядерный синтез, инициированный взрывом атомной бомбы.

# Эффект Зеемана. Атом во внешнем магнитном поле.

## Эффект Зеемана и атом во внешнем магнитном поле

### Эффект Зеемана

Эффект Зеемана — это расщепление спектральных линий атома под воздействием внешнего магнитного поля. Этот эффект был открыт Питером Зееманом в 1896 году и может быть объяснен взаимодействием магнитного поля с магнитными моментами электронов в атоме.

### Классический эффект Зеемана

В классическом эффекте Зеемана расщепление происходит на три компоненты: одну центральную (не смещенную) и две боковые, симметрично расположенные относительно центральной. В этом случае энергия взаимодействия магнитного момента электрона с внешним магнитным полем  $B$  определяется как:

$$E = -\mu \cdot B$$

где  $\mu$  — магнитный момент электрона.

Энергетическое расщепление уровней выражается как:

$$\Delta E = m_l \mu_B B$$

где:

- $m_l$  — магнитное квантовое число,
- $\mu_B$  — магнетон Бора,
- $B$  — величина внешнего магнитного поля.

### Аномальный эффект Зеемана

В аномальном эффекте Зеемана наблюдается более сложное расщепление спектральных линий, что связано со спином электрона. В этом случае учитывается также спиновая орбитальная связь.

## Атом во внешнем магнитном поле

Когда атом помещается во внешнее магнитное поле, энергетические уровни его электронов смещаются из-за взаимодействия магнитного момента электрона с полем. Полный магнитный момент электрона включает орбитальный и спиновый моменты:

$$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$$

где  $\mathbf{L}$  — орбитальный угловой момент,  $\mathbf{S}$  — спиновый угловой момент.

Энергия взаимодействия во внешнем магнитном поле выражается как:

$$E = -(\mu_L + \mu_S) \cdot \mathbf{B}$$

где  $\mu_L$  и  $\mu_S$  — орбитальный и спиновый магнитные моменты.

## Гамильтониан Зеемана

Гамильтониан взаимодействия атома с внешним магнитным полем:

$$H_Z = \frac{e}{2m}(\mathbf{L} + g_s \mathbf{S}) \cdot \mathbf{B}$$

где  $g_s \approx 2$  — гиромагнитное отношение для спина электрона.

## Матричный элемент

Для вычисления энергетического расщепления используется матричный элемент:

$$\Delta E = \langle \psi | H_Z | \psi \rangle$$

где  $|\psi\rangle$  — волновая функция атома.

## Влияние на спектр

Эффект Зеемана приводит к тому, что одна спектральная линия расщепляется на несколько линий, что можно наблюдать в спектроскопических экспериментах.

Информация о расщеплении позволяет исследовать магнитные свойства атомов и внешних магнитных полей.



# Эффект Комптона. Дуализм волновых и корпускулярных свойств излучения. (Билет 6)

## Эффект Комптона:

Эффект Комптона заключается в изменении длины волны рентгеновского или гамма-излучения при его рассеянии на свободных или слабо связанных электронах вещества. При этом энергия и импульс передаются от фотона к электрону, что приводит к изменению энергии (и длины волны) рассеянного фотона.

## Основные положения эффекта Комптона:

1. **Рассеяние фотона на электроне:** Когда фотон сталкивается с электроном, он передает часть своей энергии и импульса электрону. В результате этого взаимодействия рассеянный фотон имеет меньшую энергию и большую длину волны по сравнению с падающим фотоном.
2. **Зависимость от угла рассеяния:** Увеличение угла рассеяния фотона приводит к большему изменению длины волны. Это изменение длины волны, или сдвиг Комптона, выражается формулой:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c}(1 - \cos \theta)$$

где  $\lambda$  и  $\lambda'$  — длины волн падающего и рассеянного фотона соответственно,  $h$  — постоянная Планка,  $m_e$  — масса электрона,  $c$  — скорость света,  $\theta$  — угол рассеяния.

3. **Наличие двух энергетических групп фотонов:** В спектре рассеянных фотонов имеются фотоны, энергия которых равна энергии падающих фотонов (упругое рассеяние), и фотоны меньшей энергии, чья энергия зависит от угла рассеяния (неупругое рассеяние).

Эффект Комптона является экспериментальным подтверждением корпускулярной теории света и свидетельствует о том, что свет обладает не только волновыми, но и корпускулярными свойствами.

## Дуализм волновых и корпускулярных свойств излучения:

Корпускулярно-волновой дуализм — это фундаментальное свойство квантовых объектов, таких как фотоны и электроны, которое означает, что они могут проявлять как волновые, так и корпускулярные свойства в зависимости от условий эксперимента.

- **Волновые свойства:** Свет ведет себя как волна в явлениях интерференции и дифракции. В этих экспериментах световые волны могут накладываться друг на

друга, создавая области усиления и ослабления (интерференционные полосы).

- **Корпускулярные свойства:** В эффекте Комптона и фотоэффекте свет ведет себя как поток частиц (фотонов), каждая из которых обладает энергией  $E = h\nu$  и импульсом  $p = \frac{h}{\lambda}$ .

Эти два аспекта природы света дополняют друг друга и являются ключевыми для понимания квантовой механики. Эффект Комптона показывает, что фотон обладает импульсом и взаимодействует с электроном подобно частице, что не может быть объяснено только волновой теорией света .

# Зонная теория твердых тел. Структура зон в металлах, полупроводниках и диэлектриках.

## Зонная теория твердых тел

Зонная теория твердых тел объясняет электрические свойства материалов путем рассмотрения энергетических зон, образованных из энергетических уровней атомов, когда они образуют кристаллическую решетку. Основные концепции зонной теории включают запрещенные зоны (щели) и зоны проводимости и валентные зоны.

## Основные понятия зонной теории

### 1. Валентная зона:

- Зона, заполненная электронами, которая придает материалу его основные химические свойства.
- В металлах валентная зона частично заполнена или перекрывается с зоной проводимости.

### 2. Зона проводимости:

- Зона, в которой могут находиться электроны, свободные для перемещения под действием внешнего электрического поля, что обеспечивает проводимость.

### 3. Запрещенная зона (щель):

- Энергетический диапазон между валентной зоной и зоной проводимости, в котором нет разрешенных энергетических уровней для электронов.

## Структура зон в металлах, полупроводниках и диэлектриках

### Металлы

- **Зонная структура:** В металлах валентная зона частично заполнена, или зона проводимости перекрывается с валентной зоной. Это означает, что в металлах много свободных электронов, которые могут свободно двигаться под действием электрического поля.
- **Проводимость:** Высокая, поскольку много свободных носителей заряда (электронов).

### Полупроводники

- **Зонная структура:** В полупроводниках существует узкая запрещенная зона (порядка 1 эВ). При комнатной температуре некоторые электроны могут перейти через

запрещенную зону из валентной зоны в зону проводимости, создавая свободные электроны (носители заряда) и дырки.

- **Типы полупроводников:**
  - **Чистые (интринзики):** Проводимость определяется только собственными электронами и дырками.
  - **Легированные (экстринзики):** Проводимость регулируется добавлением примесей (доноров или акцепторов), которые создают дополнительные свободные носители заряда.
- **Проводимость:** Умеренная и может сильно варьироваться в зависимости от температуры и легирования.

## Диэлектрики

- **Зонная структура:** В диэлектриках запрещенная зона широкая (более 3 эВ). При нормальных условиях очень мало электронов могут перейти через запрещенную зону в зону проводимости.
- **Проводимость:** Очень низкая, поскольку почти нет свободных носителей заряда.

## Примеры и их зонные структуры

1. **Кремний (Si):** Полупроводник с шириной запрещенной зоны около 1.1 эВ. Используется в электронике.
2. **Германий (Ge):** Полупроводник с шириной запрещенной зоны около 0.66 эВ.
3. **Алюминий (Al):** Металл с частично заполненной валентной зоной, обеспечивающей высокую проводимость.
4. **Кварц (SiO<sub>2</sub>):** Диэлектрик с широкой запрещенной зоной, что делает его хорошим изолятором.

## Заключение

Зонная теория твердых тел помогает объяснить различия в электрических свойствах металлов, полупроводников и диэлектриков, основываясь на их энергетических зонах и запрещенных зонах.