

Лекция 6(1 ч). **Структурные
уровни организации материи**

Вопросы:

- Структурные уровни организации материи в неживой природе
- Физический вакуум
- Уровни микро- и макромира
- Радиоактивность
- Закон радиоактивного распада

Структурные уровни организации материи в неживой природе

- Структурность и системность в описании материи

Все природные объекты представляют собой упорядоченные, иерархически структурированные системы.

Под *системой* принято понимать упорядоченное множество (совокупность) взаимосвязанных элементов. Связи между элементами образуют ее *структуру*.

При этом предполагается включение систем нижних (более мелких или простых) уровней в системы более высоких уровней.

В зависимости от критериев обобщения возможны различные варианты систематизации в описании материи, например: по формам существования материи – вещество и поле; по типу материальных систем – живая и неживая природа; по типам взаимодействия между элементами при организации системы – физические, химические, биологические, социальные системы.

Структурные уровни организации материи в неживой природе

- Структурность и системность в описании материи

Так, в живой природе часто выделяют «нуклеиновые кислоты и белки» как системы доклеточного уровня, далее – «клетки и микроорганизмы (вирусы, микробы, бактерии)», «одно- и многоклеточные организмы» соответственно растительного и животного мира, а затем – «органические виды», «биоценозы» как надорганизменные структуры.

Структурные уровни организации материи в неживой природе обычно рассматриваются в следующей последовательности: «элементарные частицы», «атомы», «молекулы», «поля и физический вакуум», «макротела», «планеты и их системы», «звезды и их системы», «галактики и их объединения (метегалактики)».

Структурные уровни организации материи в неживой природе

- Структурность и системность в описании материи

Следует отметить, что некоторое множество объектов воспринимается как целостная система в том случае, если энергия связи между объектами больше суммы их кинетической энергии и энергии внешних воздействий, направленных на разрушение структуры. С переходом от мегасистем к макросистемам и далее к молекулам и атомам над гравитационными силами начинают доминировать силы электромагнитные, обусловленные взаимодействием заряженных частиц.

Вообще, чем меньше размеры материальной системы, тем более прочно связаны между собой ее элементы. Так, в атомных ядрах действуют еще более мощные силы – ядерные, которые обуславливают существование высокостабильной структуры – атомного ядра.

Структурные уровни организации материи в неживой природе

- Основные характеристики и особенности вещества и поля

1. Вещество имеет атомно-молекулярную структуру, т. е. состоит из различного вида частиц, обладающих массой покоя. Физическое поле такой структуры не имеет. Однако подразделение материи на вещество, имеющее прерывистое (корпускулярное) строение, и непрерывное (континуальное) поле не является абсолютным. Каждому полю соответствуют кванты действия этого поля, роль которых выполняют те или иные виртуальные частицы. Так, в случае электромагнитного поля – это фотоны, в случае ядерного поля – п-мезоны, в случае гравитационного поля – гравитоны (предположительно). При этом эти кванты поля могут иметь массу покоя как равную нулю (фотоны), так и отличную от нуля (п-мезоны, $m_p \approx 270 \cdot m_e$).

Структурные уровни организации материи в неживой природе

- Основные характеристики и особенности вещества и поля

2. Физическим полям присуще свойство связывать частицы вещества в более сложные структурные единицы (в ядра атомов, атомы, молекулы, макротела, космические объекты) за счет того или иного фундаментального взаимодействия. Так, *сильные взаимодействия*, обладая максимальной интенсивностью ($I = 1$ отн. ед.), удерживают нуклоны в атомных ядрах, обеспечивая тем самым их высокую стабильность, но имеют малый радиус действия ($r \approx 10^{-15}$ м). Поэтому ядерные поля (поля сильных взаимодействий) не способны создавать макротела.

Электромагнитные взаимодействия осуществляются через электромагнитное поле, обладают значительно меньшей интенсивностью ($I \approx 10^{-2}$ отн. ед.), но неограниченным радиусом действия ($r \rightarrow \infty$).

Структурные уровни организации материи в неживой природе

- Основные характеристики и особенности вещества и поля

В связи с этим *электромагнитные взаимодействия* определяют образование атомов и молекул вещества и ответственны за все электрические и магнитные эффекты, наблюдаемые нами в разных формах проявления (оптические, механические, тепловые, химические и другие явления).

Гравитационные взаимодействия – самые слабые из известных взаимодействий ($I \approx 10^{-31}$ отн. ед.), но они универсальны (происходят с любыми вещественными структурными элементами материи) и вследствие неограниченного радиуса действия ($r \rightarrow \infty$) являются определяющими в образовании космических объектов (и их систем).

Структурные уровни организации материи в неживой природе

- Основные характеристики и особенности вещества и поля

3. Вещество и поле различаются проницаемостью. Вещество относительно мало проницаемо по сравнению с такими полями, как электромагнитное и гравитационное. В то же время на уровне процессов микромира это различие исчезает: для таких частиц, как нейтрино, вещество становится весьма «прозрачным», а для ядерных полей, наоборот, характерна очень малая проницаемость.

4. Вещество и поле различаются по степени концентрации массы и энергии. В макроявлениях наблюдается большая концентрация названных величин у частиц вещества и очень малая – у электромагнитного и гравитационного полей. Но в микромире это различие также стирается: ядерные поля обладают огромной концентрацией массы и энергии.

Структурные уровни организации материи в неживой природе

- Основные характеристики и особенности вещества и поля

5. Вещество и поле различаются по своей корпускулярной и волновой природе. Это различие исчезает на уровне процессов микромира, где частицы вещества обладают волновыми свойствами, а непрерывное в макропроцессах электромагнитное поле проявляет свой корпускулярный характер (в виде фотона как кванта этого поля).

Выводы. Особенности вещества и поля достаточно точно характеризуют реальный мир в макроскопическом приближении. Однако эти особенности не являются абсолютными, и при переходе в область микромира обнаруживается их относительность. Здесь понятия «частица» и «волна» выступают как взаимодействующие характеристики, отражающие сложную, двойственную, сущность самих микрообъектов.

Физический вакуум

- Абсолютный и физический вакуум

Как обобщающее понятие физическое поле включает в себя и понятие физического вакуума. При этом следует различать:

- *абсолютный вакуум* как некую абстракцию, определяющую абсолютную пустоту;
- *физический вакуум* (по Дираку) как особую форму существования материи.

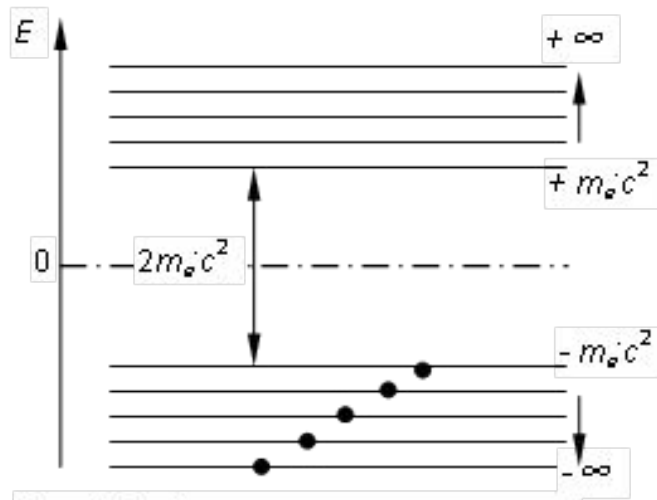
В 1928 г. английский физик П. Дирак записал релятивистское квантовомеханическое уравнение для свободного электрона. В качестве следствий из этого уравнения были получены такие важные характеристики, как спин и собственный магнитный момент электрона, а также было предсказано существование антиэлектрона – позитрона.

Последнее предположение было связано с тем, что для полной энергии свободного электрона в уравнении Дирака реализуются как положительные, так и отрицательные значения.

Физический вакуум

- Абсолютный и физический вакуум

Иначе говоря, для заданного импульса частицы p возможны решения уравнения, отвечающие энергиям $E = \pm\sqrt{p^2 \cdot c^2 + m_e^2 \cdot c^4}$ (см. энергетический инвариант релятивистской теории). В соответствии с квантово-механическими положениями, а именно с дискретизацией (квантованием) энергии микрочастицы и ее возможными переходами между уровнями энергии *энергетическая диаграмма для вакуума* принимает вид, представленный на рисунке. Видно, что есть две области собственных значений энергии



собственных значений энергии электрона: отрицательная $[-\infty; -m_e \cdot c^2]$ и положительная $[+m_e \cdot c^2; +\infty]$, а также существует промежуточный интервал энергий величиной $2m_e \cdot c^2$, значения которого не доступны для частицы («запрещенная зона»).

Физический вакуум

- Абсолютный и физический вакуум

Определение. П. Дирак определил «вакуум» как такое состояние квантовомеханической системы, когда все уровни с отрицательной энергией уже заселены электронами, а положительные энергетические уровни свободны.

П. Дирак вышел из этого «трудного» положения следующим образом. Руководствуясь принципом запрета Паули, согласно которому электроны, как фермионы, не могут соседствовать на одном уровне с другими электронами, он высказал идею о ненаблюдаемости в обычных условиях квантовых переходов электронов в состоянии с отрицательной энергией в связи с тем, что все отрицательные уровни уже заняты (другими электронами).

Физический вакуум

- Абсолютный и физический вакуум

В связи с этим, так как заняты абсолютно все уровни, расположенные ниже запрещенной зоны ($2m_e \cdot c^2$), электроны, находящиеся там, никак себя не обнаруживают и не проявляют в обычных процессах.

Если же одному из электронов на отрицательных уровнях передать энергию $E \geq 2m_e \cdot c^2$, то этот электрон «перескочит» на положительный уровень и будет вести себя как обычный электрон с положительной массой и отрицательным зарядом (см. рис. 2.2, пер. 1).

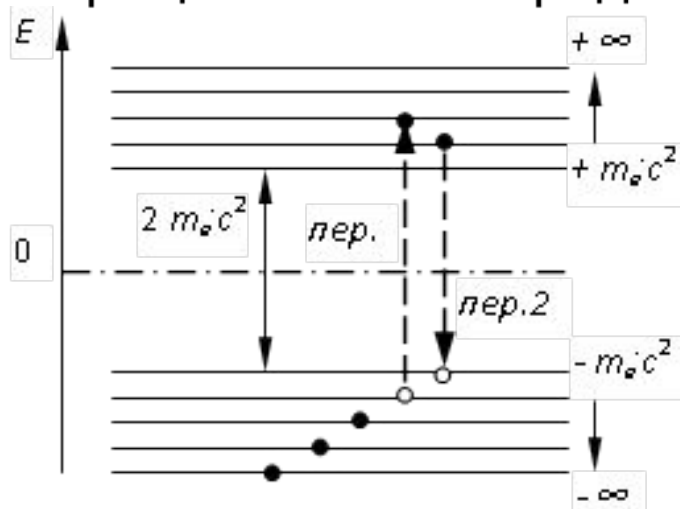


Рис. 2.2. Квантовые переходы в вакууме

А образовавшаяся в ходе этого перехода – «перескока» вакансия («дырка») на соответствующем отрицательном энергетическом уровне уже будет проявлять себя как электрон с положительным зарядом.

Физический вакуум

- Абсолютный и физический вакуум

Так теоретически была предсказана первая античастица – позитрон. Если электрон встречается с позитроном, то они аннигилируют (исчезают), иначе говоря, электрон переходит с положительного уровня на вакантный отрицательный уровень (рис. 2.2, пер. 2), становясь вновь «ненаблюдаемым».

В 1932 г. К. Андерсон с помощью камеры Вильсона, помещенной между полюсами электромагнита, обнаружил позитрон (по противоположной «закрутке» его следа по отношению к следу электрона) в космических лучах. Электронно-позитронные пары рождаются при прохождении γ -фотонов через вещество земной атмосферы (при этом $E_\gamma \geq 2m_e \cdot c^2 = 1,02 \text{ МэВ}$).

Уровни микро- и макромира

- Структурные уровни вещества в микромире
В микромире различают следующие структурные уровни вещества:
- *молекулярный уровень* – уровень молекулярного строения вещества (рассматривается молекула как единая квантовомеханическая система, объединяющая атомы, и обладающая индивидуальными химическими свойствами);
- *атомный уровень* – уровень атомного строения вещества (рассматривается атом как структурный элемент микромира, состоящий из ядра и электронной оболочки);
- *нуклонный уровень* – уровень атомного ядра и составляющих его частиц (рассматриваются нуклоны, т. е. протоны и нейтроны, из которых синтезируются атомные ядра);
- *кварковый уровень* – уровень элементарных частиц (рассматриваются кварки и лептоны как элементарные структурные единицы вещества).

Уровни микро- и макромира

- Структурные уровни вещества в микромире
Элементарные частицы: их характеристики и систематика

1. *Масса m .* В зависимости от массы элементарные частицы подразделяются на легкие (*лептоны* с $m \approx m_e$), средние (*мезоны* с $m \approx 270m_e$) и тяжелые (*барионы* с $m \approx 1830m_e$).
2. *Время жизни t .* В зависимости от времени жизни различают *стабильные частицы* (электрон, $t > 5 \cdot 10^{21}$ лет; протон, $t > 5 \cdot 10^{31}$ лет; фотон; нейтрино), *квазистабильные частицы* – частицы, распадающиеся при слабом и электромагнитном взаимодействиях за время $t > 5 \cdot 10^{-20}$ с (нейтрон, $t \approx 900$ с), *резонансы* – частицы, распадающиеся за счет сильного взаимодействия за время $t \leq 10^{-23}$ с.
3. *Электрический заряд q .* За основную единицу электрического заряда в микромире принят заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Замечание. Истинно нейтральные частицы – это частицы, у которых отсутствуют античастицы, например, фотон, π^0 -мезон.

Уровни микро- и макромира

- Структурные уровни вещества в микромире
Элементарные частицы: их характеристики и систематика

4. *Спин $\hat{s}$* . Это собственный момент импульса частицы, имеющий квантовую природу (неотъемлемая характеристика частицы, такая же, как масса или заряд). В зависимости от спина все частицы, включая неэлементарные частицы и квазичастицы, подразделяют на *бозоны* – частицы с нулевым (мезоны $\hat{s} = 0$) или целочисленным (фотоны, глюоны $\hat{s} = 1$) спином и *фермионы* – частицы с полуцелым спином (e, μ, τ, ν, p, n $\hat{s} = 1/2$ и др.).

Внутренние квантовые числа (вводятся дополнительно).

- *лептонный заряд* (лептоны имеют $L = 1$, антилептоны – $L = -1$, а остальные частицы – $L = 0$);
- *барионный заряд* (барионы имеют $B = 1$, антибарионы – $B = -1$, а остальные частицы – $B = 0$);
- *кварковые ароматы* (характеризуют тип кварка).

Уровни микро- и макромира

- Структурные уровни вещества в микромире
Элементарные частицы: их характеристики и систематика

По характеру взаимодействия частицы объединяют в две большие группы:

- *лептоны* участвуют в процессах, обусловленных слабым и (за исключением нейтрино) электромагнитным взаимодействиями, но не участвуют в процессах сильного взаимодействия;
- *адроны* участвуют в процессах сильного взаимодействия (как правило, могут участвовать также в процессах электромагнитного и слабого взаимодействий). Адроны подразделяют в соответствии с массой на мезоны и барионы.

Сводная классификация элементарных частиц

Кванты полей	Лептоны	Адроны		
		Мезоны	Барионы	
			Нуклоны	Гипероны
Фотон, векторные бозоны, глюоны	e, μ, τ, ν	π, K, η и мезонные резонансы	p, n	Λ, Σ, Θ и барионные резонансы

Уровни микро- и макромира

- Структурные уровни вещества в микромире
Кварковый уровень в микромире

В 1964 г. американский физик, теоретик-экспериментатор из Калифорнийского технологического института М. Гелл-Манн для объяснения большого многообразия тяжелых частиц – адронов – предложил *кварковую модель* их построения. Согласно этой модели все адроны являются комбинациями кварков.

Сегодня принято говорить о шести типах кварков: *d* (down), *u* (up), *s* (strange), *c* (charm), *b* (beauty), *t* (truth). Каждый тип кварка является носителем определенного квантового свойства – аромата (strange – странности, charm – шарма, beauty – красоты, truth – истинности) или не содержит такого вообще, как кварки *d*, *u*.

Кварки – микрочастицы (не более 10^{-15} м) со спином $\check{s} = 1/2$ и электрическим зарядом q , кратным $1/3$ ($-1/3$ или $+2/3$); в настоящее время они рассматриваются как элементарные бесструктурные образования.

Уровни микро- и макромира

- Структурные уровни вещества в микромире
Кварковый уровень в микромире

Кварки, группируясь по двое либо по трое, образуют тот или иной адрон. При этом каждый барион состоит из трех кварков, а каждый мезон является композицией кварк – антикварк (соответствующий антикварк отличается от кварка знаками электрического заряда и аромата).

Уровни микро- и макромира

- Структурные уровни вещества в микромире
Кварковый уровень в микромире

Ниже приведена таблица с кварковыми формулами ряда адронов.

Частица	$p^+(1/2)$	$\pi^0(1/2)$	$\pi^+(0)$	$\pi^-(0)$	$\Omega^-(3/2)$
Кварковая формула	$uud (\uparrow\downarrow\uparrow)$	$udd (\uparrow\downarrow\uparrow)$	$u\tilde{d} (\uparrow\downarrow)$	$\tilde{u}d (\uparrow\downarrow)$	$sss (\uparrow\uparrow\uparrow)$
П р и м е ч а н и е. В верхней строке в скобках указан спин частицы.					

На примере Ω –гиперона возникает естественный вопрос о согласовании с принципом Паули, который, как известно, запрещает одинаковым фермионам (спин $\check{s} = 1/2$) находиться в одном и том же состоянии. Чтобы устранить это «противоречие», вскоре после установления квантовых чисел кварков – ароматов (s, c, b) – была введена дополнительная, внутренняя, степень свободы (внутреннее квантовое число), которую называли *цветом*. Иначе говоря, каждый кварк может быть также охарактеризован в конкретном квантовом состоянии одним из трех цветов: красный (r), зеленый (g) и голубой (b).

Уровни микро- и макромира

- Структурные уровни вещества в микромире
Кварковый уровень в микромире

Получающаяся смесь разноцветных кварков – бесцветна, а цвет антикварка считается дополнительным (противоположным по знаку) к цвету соответствующего кварка, что также определяет бесцветность их композиции.

Таким образом, «противоречие» принципу Паули для кварковых композиций было устранено с помощью *принципа бесцветности адронов*. Этот принцип разрешает только те сочетания разноцветных кварков, которые дают в результате бесцветную смесь. В связи с этим Ω –гиперон следует рассматривать как композицию из трех s-кварков разных цветов.

Уровни микро- и макромира

- Структурные уровни вещества в микромире
Современные представления о формировании вещества

На сегодня принято считать истинно элементарными частицами те, которые объединены в следующие три группы:

Лептоны	Кварки	Кванты полей
$e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ и соответствующие им античастицы (шесть видов), $\check{s} = 1/2$	d, u, s, c, b, t и соответствующие им антикварки (шесть видов), $\check{s} = 1/2$	γ -фотоны ($m_0 = 0, \check{s} = 1$); векторные бозоны W^-, W^+, Z^0 ($m_0 = 81 \dots 96 \text{ ГэВ}, \check{s} = 1$); глюоны ($m_0 = 0, \check{s} = 1$); гравитоны ($m_0 = 0, \check{s} = 2$)

По современным представлениям элементарные частицы со спином $\check{s} = 1/2$ (лептоны и кварки) являются базовыми при формировании вещества, в связи с этим их часто называют *частицами вещества*.

Уровни микро- и макромира

- Структурные уровни вещества в микромире
Современные представления о формировании вещества

Частицы с целым спином ($\check{S} = 1, 2$) исполняют роль связующего звена: они обеспечивают образование адронов и взаимопревращение частиц с полуцелым спином $\check{S} = 1/2$, а также образование более сложных материальных структур (атомов, молекул и т. п.). Эти частицы – *кванты полей (виртуальные частицы)* – переносят фундаментальные взаимодействия между частицами вещества.

В результате акта взаимодействия частица вещества приобретает импульс отдачи, а квант соответствующего поля (*переносчик взаимодействия*) поглощается ею.

Виртуальные частицы нельзя зарегистрировать, но их действие можно оценить, измерить. Они проявляются, например, в виде световых и гравитационных волн, а иногда испускаются при взаимодействии частиц вещества (например, испускание фотонов при аннигиляции пары электрон – позитрон; рентгеновское излучение).

Уровни микро- и макромира

- Структурные уровни вещества в микромире
Современные представления о формировании вещества

Разнообразные эксперименты по прямому «просвечиванию» нуклонов (p , n) и других адронов электронами высоких энергий (около 1 ГэВ) позволили по результатам рассеяния электронов сделать вывод о сложном строении адронов, о наличии внутри адронов центров рассеяния – микрочастиц с электрическими зарядами $q = -1/3$ или $q = +2/3$, т. е. кварков. Но многочисленные поиски свободных кварков оказались безуспешными: по-видимому, в свободном состоянии они не существуют. В соответствии с одной из гипотез кварк, получивший энергию в результате столкновения с электроном, не вылетает наружу из адрона, а затрачивает эту энергию на образование пар кварк – антикварк, т. е. на образование новых адронов, преимущественно мезонов. Так, например, образуются p -мезоны, которые сами участвуют в образовании ядра атома из нуклонов.

Уровни микро- и макромира

- Структурные уровни вещества в микромире
Нуклонный, атомный и молекулярный уровни организации вещества
- *Нуклонный уровень* организации материи представляет собой атомное ядро, состоящее из нуклонов (протонов и нейтронов). Последние удерживаются силами взаимного притяжения ядерных π -мезонных полей, которым присуща зарядовая независимость. Порядковый номер химического элемента равен числу протонов Z в ядре данного элемента; число нейтронов $N = A - Z$, где A – массовое число элемента (в углеродных единицах). Размер ядра примерно равен $10^{-15} - 10^{-14}$ м. Заряд ядра $q_{\text{я}} = +Z \cdot e$, где $+e$ – заряд протона.

Уровни микро- и макромира

- Структурные уровни вещества в микромире
Нуклонный, атомный и молекулярный уровни организации вещества
- *Атомный уровень* организации материи - это атом, который представляет собой единую квантово-механическую систему, состоящую из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженной электронной оболочки. В нормальном (неионизированном) состоянии атом электрически нейтрален.

Электроны на своих орбитах удерживаются силами электрического притяжения между ними и ядром атома. Каждый электрон обладает определенным запасом энергии, причем чем дальше электрон располагается от ядра, тем больше его энергия. Так как электрон не может пребывать в одном и том же энергетическом состоянии (на одной и той же орбите) наряду с другими электронами, то в оболочке электроны располагаются слоями. При этом в первом, ближайшем к ядру, слое может содержаться до двух электронов, во втором – до восьми, в третьем – до 18, в четвертом – до 32. После второго слоя орбиты также разделяются на подслои.

Уровни микро- и макромира

- Структурные уровни вещества в микромире
Нуклонный, атомный и молекулярный уровни организации вещества
- *Молекулярный уровень* организации вещества - это молекула как наименьшая структурная единица вещества, которая обладает его индивидуальными химическими свойствами и состоящая из атомов, соединенных химическими связями. Различают одноатомные молекулы – атомы инертных газов, двухатомные молекулы, состоящие из одинаковых атомов, например H_2, N_2, Cl_2, F_2 , и из разных атомов, например $HCl, NaCl$; молекулы сложных веществ (H_2O, H_2SO_4, Na_2CO_3).
Среди внутримолекулярных связей отметим:
 - ионную связь, образуемую в результате действия электростатических сил между противоположно заряженными ионами, из которых построены кристаллические решетки ионных веществ (ионные кристаллы, например $NaCl$);
 - ковалентную связь, образуемую двумя или несколькими атомами в результате обобществления ими электронов (например, кристалл кремния).

Уровни микро- и макромира

- Макроскопический уровень вещества и его состояния

Агрегатные состояния вещества

На этом уровне вещество может находиться в трех основных агрегатных состояниях: *газообразном, жидком и твердом.*

Часто эту классификацию дополняют «четвертым состоянием вещества» (по определению некоторых физиков) – *плазмой*, которая представляет собой частично или полностью ионизованный газ, в котором положительно и отрицательно заряженные частицы (обычно положительные ионы и свободные электроны) компенсируют свои электрические заряды. Плазма в целом электрически нейтральна (точнее, квазинейтральна). Так, плазменное состояние возможно, если газ находится в сильном электрическом поле ($E \geq 10^8$ В/см) или нагрет до очень высоких температур ($T \geq 10^3 - 10^4$ К).

Уровни микро- и макромира

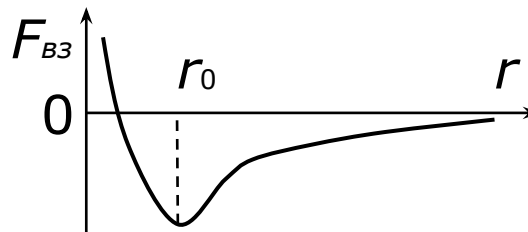
- Макроскопический уровень вещества и его состояния

Учение о строении и свойствах макротел

Напомним, что учение о строении и свойствах макротел (газ, жидкость, твердое тело), основанное на представлениях об атомах и молекулах, называется *молекулярно-кинетической теорией (МКТ)*.

Основными положениями МКТ являются:

- 1) вещество состоит из большого числа атомов и молекул;
- 2) атомы и молекулы любого вещества находятся в постоянном хаотическом тепловом движении, интенсивность которого определяется температурой;
- 3) между атомами и молекулами действуют силы взаимного притяжения и отталкивания (при $r \geq r_0 \approx 10^{-9}\text{м}$ преобладают силы притяжения, а при $r < 10^{-9}\text{м}$ – силы отталкивания).



Уровни микро- и макромира

- Макроскопический уровень вещества и его состояния

Учение о строении и свойствах макротел

Тепловое движение атомов и молекул имеет особенности, присущие тому или иному агрегатному состоянию вещества:

- межмолекулярное взаимодействие практически отсутствует (пренебрежимо мало) в газах ввиду больших расстояний между частицами;
- в твердых телах силы притяжения и отталкивания, действующие между атомами и молекулами, уравниваются, т. е. результирующая сила равна нулю;
- молекулы жидкости колеблются около положения равновесия, а по истечении некоторого времени скачкообразно переходят в новые положения равновесия, где и продолжают свои колебания. (Эти периодические переходы молекул определяют характерное для жидкости свойство – текучесть).

Радиоактивность

- Понятие радиоактивности

Определение. Радиоактивностью называется самопроизвольное превращение одних (неустойчивых) атомных ядер (*распад*) в другие, сопровождаемое испусканием элементарных частиц. Такие ядра и соответствующие им нуклиды (атомы) называют *радиоактивными (радионуклиды)*.

Необходимое условие радиоактивного распада – масса исходного ядра (материнского ядра) должна превышать сумму масс продуктов распада (дочерних ядер). Поэтому каждый распад происходит с выделением энергии в форме невидимого (ультракороткого) излучения.

К числу радиоактивных процессов относятся:

- α – *распад*, т.е. самопроизвольное испускание радионуклидом α -частицы (ядро атома гелия ${}^4_2\text{He}$);
- β – *распад*, т.е. самопроизвольный процесс превращения материнского ядра в дочернее ядро с тем же массовым числом A , но с зарядовым числом Z , отличающимся от исходного на ± 1 , и сопровождающимся испусканием β -частиц (электрон или позитрон) или возможным захватом ядром электрона из собственной оболочки атома;

Радиоактивность

- Понятие радиоактивности

- γ – *распад* заключается в испускании возбужденным ядром (при переходе его в основное состояние) γ -квантов, энергия которых варьируется в пределах от 10 кэВ до 5 МэВ; возбужденные ядра образуются при β -распаде в случае, если распад материнского ядра в основное состояние дочернего ядра запрещен;

- *спонтанное деление тяжелых ядер* – по своим характеристикам близко к вынужденному делению ядер под действием нейтронов;

- *протонная радиоактивность* – здесь ядро испытывает превращение, испуская один или два протона.

Радиоактивность, наблюдаемая у ядер в природных условиях, называется естественной.

Радиоактивность ядер, полученных посредством ядерных реакций в лабораторных условиях, называется искусственной.

Радиоактивность следует рассматривать как внутриядерный процесс. Это вытекает из того, что на него не оказывают воздействия вид химического соединения (соли или чистый уран), агрегатное состояние, большие давления, температуры и электромагнитные поля.

Радиоактивность

- Понятие радиоактивности

Все три типа излучения обладают различной проникающей способностью.

Образующиеся α -частицы сразу растрачивают почти всю свою энергию на ионизацию атомов окружающей среды и поэтому их проникающая способность мала (α -частицы задерживаются тонким листом картона).

β – частицы способны проникать через миллиметровый лист алюминия.

Наибольшая проникающая способность – у γ - излучения. Отдельные γ - фотоны могут проникать через сантиметровый лист свинца.

α и β - лучи подвержены электромагнитному воздействию, γ - лучи (как поток нейтральных фотонов) – нет.

Все три типа излучения (α , β , γ) можно обнаружить только в смесях различных радионуклидов. Чистый радионуклид испускает или α -, или β - лучи, которые могут сопровождаться γ - лучами. Испускание только γ - излучения наблюдается крайне редко.

Радиоактивность

- Закон радиоактивного распада

Так как отдельные радионуклиды претерпевают превращения независимо друг от друга (или одинаковые ядра распадаются за различные времена, предсказать которые заранее нельзя), поэтому можно считать, что число ядер dN , распадающихся за малый промежуток времени dt , пропорционально как числу имеющихся (еще нераспавшихся) ядер N на момент времени t , так и промежутку времени dt :

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt, \quad (1)$$

где λ – постоянная распада (характеристика радионуклида).

Интегрированием (1) получается классический закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

где N_0 – количество радиоактивных ядер на начальный момент, N – количество нераспавшихся ядер на момент времени t .

Радиоактивность

- Закон радиоактивного распада

Интенсивность радиоактивного распада характеризуют числом распадов в единицу времени, т.е. отношением:

$$|dN/dt| = \lambda \cdot N. \quad (3)$$

Эту величину принято обозначать как A и называть *активностью*; единицей измерения активности в СИ считается беккерель $1 \text{ (Бк)} = 1 \text{ (распад/с)}$, также на практике используется кюри $1 \text{ (Ки)} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ (Бк)}$.

Определение. Период полураспада T – время, за которое распадается половина первоначального количества ядер; это время определяется из условия:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \rightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (4)$$

В задачах на расчет активности следует воспользоваться специальной формой закона распада через активность, т.е.

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T} t}, \quad (5)$$

где A_0 – активность радиоактивного препарата на начальный момент времени.

Радиоактивность

- Закон радиоактивного распада

Часто в задачах на радиоактивность требуется определить среднее время жизни радионуклида τ . Для этого надо воспользоваться правилами нахождения среднего: в данном случае следует усреднять по общему количеству ядер на начальный момент времени, т.е. по N_0 . Количество ядер $dN(t)$, испытавших распад за промежуток времени $[t, t + dt]$, определяется согласно закона (1) как $dN(t) = \lambda N(t) dt$. Время жизни каждого из этих ядер равно t . Следовательно, сумма времен жизни всех N_0 имевшихся изначально ядер определяется интегрированием по t : $\int_0^\infty t \cdot dN(t)$. Разделив эту сумму на число ядер N_0 , получаем:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^\infty t \cdot dN(t) = \frac{1}{N_0} \int_0^\infty t \cdot \lambda N(t) dt = \frac{1}{N_0} \int_0^\infty t \cdot \lambda N_0 \exp[-\lambda t] dt = \int_0^\infty t \cdot \lambda \exp[-\lambda t] dt = \frac{1}{\lambda}$$

Связь периода полураспада и среднего времени жизни радионуклида: $T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \ln 2 \cdot \tau$.

Радиоактивность

- α - распад

Распад происходит по схеме: ${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2He$, где X – материнское ядро, Y – дочернее ядро.

Установлено, что α - частицы испускают только тяжелые ядра, например: ${}^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^4_2He$.

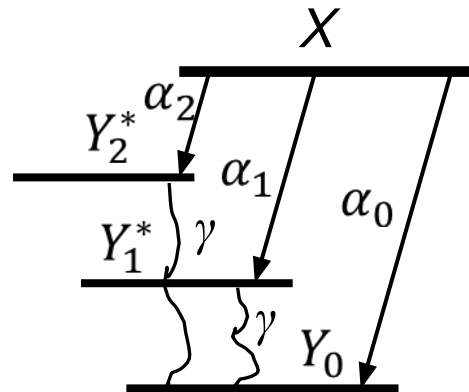
Кинетическая энергия α – частиц возникает за счет избытка энергии покоя материнского ядра над суммарной энергией покоя дочернего ядра и α – частицы. Эта избыточная энергия распределяется между α – частицей и дочерним ядром в отношении, обратно пропорциональном их массам (согласно закону сохранения импульса).

Скорости, с которыми α – частицы вылетают из распавшегося ядра – велики ($\sim 10^7$ м/с), а кинетическая энергия составляет ~ 1 МэВ. Пролетая через вещество, α – частица постепенно теряет свою энергию, растрачивая ее на ионизацию молекул (атомов) вещества, и в конце концов останавливается. Например, в воздухе при нормальном давлении пробег частицы составляет $\sim 1 - 3$ см. На образование одной пары ионов в воздухе тратится ~ 35 эВ.

Радиоактивность

- α - распад

Отличительной особенностью α - распада является моноэнергетичность α - частиц, несильно отличающихся по энергиям. Это объясняется тем, что дочернее ядро Y может возникать не только в основном, но и в возбужденных состояниях (см. рис.). Наиболее интенсивной является группа α_0 - частиц, обусловленная переходом непосредственно в основное состояние. Распады, идущие через возбужденные уровни ядра Y , сопровождаются испусканием γ - квантов.

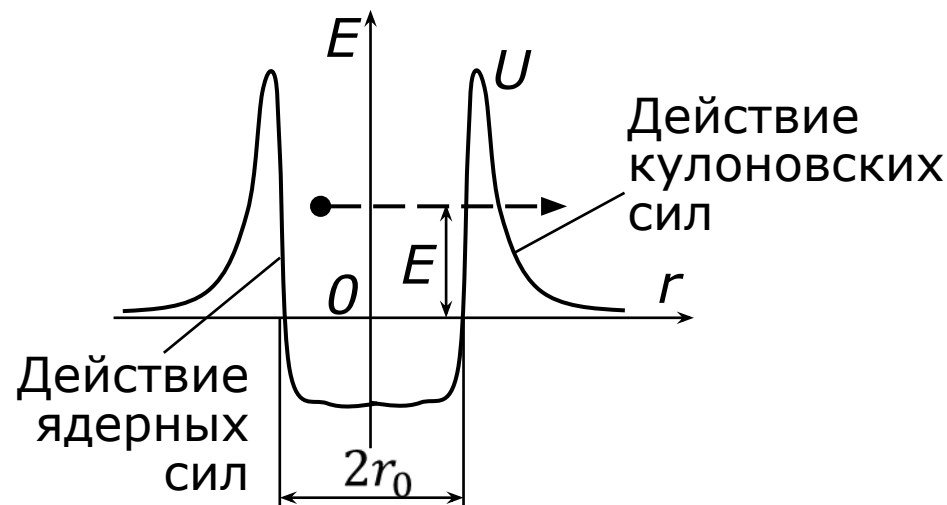


Радиоактивность

- α - распад

α - частица возникает только в момент радиоактивного распада ядра. Покидая ядро, ей приходится преодолевать потенциальный барьер, высота которого превосходит энергию частицы.

Внутренняя сторона барьера обусловлена ядерными силами, а внешняя – силами кулоновского отталкивания α - частицы и дочернего ядра (см. рис.). Преодоление α - частицей потенциального барьера в данных условиях происходит за счет туннельного эффекта.



Радиоактивность

- α - распад

У α - частицы с энергией E скорость $v = \sqrt{\frac{2E}{M}}$, а частота соударения ее со стенкой барьера $\nu = \frac{v}{2r_0}$. Согласно квантовой теории и с учетом волновых свойств α - частиц, существует определенная вероятность прохождения такого барьера $D = D_0 \cdot \exp\left[-\frac{2}{\hbar} \int_{r_0}^r \sqrt{2M(U - E)} dr\right]$, а вероятность выхода α - частицы из ядра в единицу времени, т.е. $(\nu \cdot D)$, и она также равна $\lambda = (\nu \cdot D) = \frac{\sqrt{\frac{2E}{M}}}{2r_0} D_0 \cdot \exp\left[-\frac{2}{\hbar} \int_{r_0}^r \sqrt{2M(U - E)} dr\right]$.

Радиоактивность

- β - распад

Различают три вида β - распада.

- Электронный β^- - распад протекает по схеме:

${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + {}^0_{-1}e + \tilde{\nu}$, т.е. дочернее ядро имеет атомный номер Z на единицу больший, чем у материнского ядра. Весь процесс протекает так, как если бы один из нейтронов ядра A_ZX превратился в протон по схеме ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}^0_{-1}e + \tilde{\nu}$, поэтому часто говорят, что свободный нейтрон β - радиоактивен.

Пример. β^- - распад: ${}^{234}_{90}Th \rightarrow {}^{234}_{91}Pa + {}^0_{-1}e + \tilde{\nu}$

- Позитронный β^+ - распад протекает по схеме:

${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + {}^0_{+1}e + \nu$. Этот процесс протекает так, как если бы один из протонов ядра A_ZX превратился в нейтрон по схеме ${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + {}^0_{+1}e + \nu$, причем этот процесс может идти только в составе ядра, где протон заимствует требуемую энергию у других нуклонов.

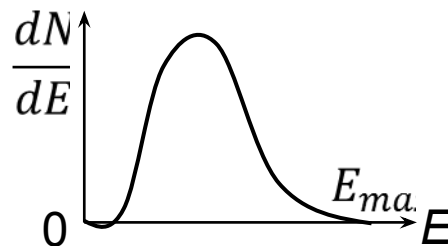
Пример. β^+ - распад: ${}^{13}_7N \rightarrow {}^{13}_6C + {}^0_{+1}e + \nu$

Радиоактивность

- β - распад
- Электронный захват протекает по схеме:
$${}_Z^AX + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_{Z-1}^AY + \nu.$$
 Этот процесс заключается в том, что ядро поглощает один из K -электронов (реже один электрон из L - или M -оболочек) своего атома, а в результате – один из протонов превращается в нейтрон, испуская при этом нейтрино: ${}_1^1p + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_0^1n + \nu$; возникшее ядро может оказаться в возбужденном состоянии и испустит γ -кванты.

Место в электронной K -оболочке, освобожденное захваченным электроном, заполняется электроном из вышележащих слоев, в результате чего возникают *рентгеновские, характеристические лучи*. Электронный захват легко обнаруживается по сопутствующему ему рентгеновскому излучению.

В отличие от α -частиц, обладающих в пределах каждой группы строго определенной энергией, β -электроны обладают самой разнообразной кинетической энергией от 0 до E_{max} .



Радиоактивность

- β - распад

Возникающие в ходе β -распада нейтрино обладают очень большой проникающей способностью (их эффективное сечение взаимодействия с ядрами – очень мало); при энергии в 1 МэВ длина свободного пробега нейтрино в воде составляет $\sim 10^{16}$ км (100 световых лет).

Энергия, выделяющаяся при β -распаде, распределяется между β -частицами и нейтрино в самых разных пропорциях, и поэтому β -спектр получается широкий и сплошной.

- γ – распад

Этот вид распада заключается в испускании возбужденным ядром при переходе его в основное состояние γ -квантов, энергия которых варьируется в пределах от 10 кэВ до 5 МэВ. Возбужденные ядра образуются при β -распаде в случае, если распад материнского ядра в основное состояние дочернего ядра – запрещен.

Существенно, что спектр испускаемых γ -квантов дискретный, так как дискретны энергетические уровни самих ядер.

Радиоактивность

- Сцинтилляционный детектор γ -квантов

В некоторых веществах, называемых *сцинтилляторами*, под действием быстрых заряженных частиц возникают световые вспышки – сцинтилляции (это разновидность люминесценции).

Так для детектирования отдельных γ -квантов используют кристаллы иодида натрия (NaI) с добавкой таллия, размером в несколько сантиметров. В результате взаимодействия со сцинтиллятором γ -квант передает энергию электрону (или позитрону), т.е. наблюдается эффект Комптона, фотоэффект или рождение электрон-позитронной пары. Сцинтилляции производятся как раз этими заряженными частицами.

