

А.Н. Огурцов

# ФИЗИКА ДЛЯ СТУДЕНТОВ

Часть 8

**ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА**

*OUTLINE of PHYSICS for STUDENTS*



И  
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

<https://sites.google.com/site/anogurtsov/lectures/phys/>

2016

## Строение и важнейшие свойства ядер

### 1. Атомные ядра и их описание

**Ядром** называется центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома и его положительный электрический заряд.

В экспериментах Резерфорда по прохождению  $\alpha$ -частиц через металлическую фольгу было обнаружено, что атомные ядра имеют размеры порядка  $10^{-14}$ – $10^{-15}$  м, в то время как линейные размеры атомов примерно  $10^{-10}$  м.

Атомное ядро состоит из элементарных частиц – **протонов** ( $p$ ) и **нейтронов** ( $n$ ), которые считаются двумя зарядовыми состояниями одной частицы – **нуклона** (от лат. *nucleus* – ядро). Протон имеет положительный электрический заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона. Нейтрон не имеет электрического заряда. Массы нуклонов:

$$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 1836m_e;$$

$$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 1839m_e.$$

Общее число нуклонов в атомном ядре  $A$  называется **массовым числом**.

**Заряд ядра** равен величине  $Ze$ , где  $e$  – заряд протона,  $Z$  – **зарядовое число** ядра, равное числу протонов в ядре (совпадает с порядковым номером химического элемента в Периодической системе элементов – атомным номером).

Ядро химического элемента  $X$  с атомным номером  $Z$  и массовым числом  $A$  обозначается:



Поскольку атом нейтрален, то **заряд ядра определяет число электронов** в атоме, от которого зависит их распределение по состояниям в атоме, а следовательно, зависят **химические свойства** атома.

**Изотопами** называются ядра с одинаковым атомным номером  $Z$  (зарядом или числом протонов), но разными  $A$  (т. е. разным числом нейтронов  $N = A - Z$ ). Например, **изотопы водорода** ( $Z = 1$ ): **протий** –  ${}^1_1\text{H}$  ( $Z = 1, N = 0$ ), **дейтерий** –  ${}^2_1\text{H}$  ( $Z = 1, N = 1$ ), **тритий** –  ${}^3_1\text{H}$  ( $Z = 1, N = 2$ ).

**Изобарами** называются ядра с одинаковым массовым числом  $A$ , но разными  $Z$ . Например,  ${}^{210}_{81}\text{Tl}$ ,  ${}^{210}_{82}\text{Pb}$ ,  ${}^{210}_{83}\text{Bi}$ .

**Изотонами** называются ядра с одинаковым числом нейтронов  $N = A - Z$ . Например,  ${}^{13}_6\text{C}$ ,  ${}^{14}_7\text{N}$ ,  ${}^{15}_8\text{O}$ .

Наряду с термином **ядро атома** часто используется также термин **нуклид**.

Самым тяжёлым из имеющихся в природе элементов является изотоп урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$ . Элементы с атомными номерами больше 92 называются **трансурановыми**. Все они получены искусственно в результате различных ядерных реакций.

Размер ядра характеризуется **радиусом ядра**, имеющим условный смысл ввиду размытости границ ядра. Эмпирическая формула для радиуса ядра:

$$R = R_0 \sqrt[3]{A},$$

где  $R_0 = (1,3 \div 1,7)10^{-15}$  м, может быть истолкована как *пропорциональность объёма ядра числу нуклонов в нем*. Следовательно, плотность ядерного вещества примерно одинакова для всех ядер ( $\approx 10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>).

## 2. Дефект массы и энергия связи ядра

Поскольку большинство ядер устойчиво, то между нуклонами существует особое **ядерное (сильное) взаимодействие** – притяжение, которое обеспечивает устойчивость ядер, несмотря на отталкивание одноименно заряженных протонов.

**Энергией связи ядра**  $E_{\text{св}}$  называется физическая величина, равная работе, которую надо совершить, чтобы расщепить ядро на составляющие его нуклоны, не сообщая им кинетической энергии.

Из закона сохранения энергии следует, что при образовании ядра должна выделяться такая же энергия, какую нужно затратить при расщеплении ядра на составляющие его нуклоны. Энергия связи ядра является разностью между энергией всех нуклонов в ядре и их энергией в свободном состоянии.

Энергия связи нуклонов в атомном ядре:

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

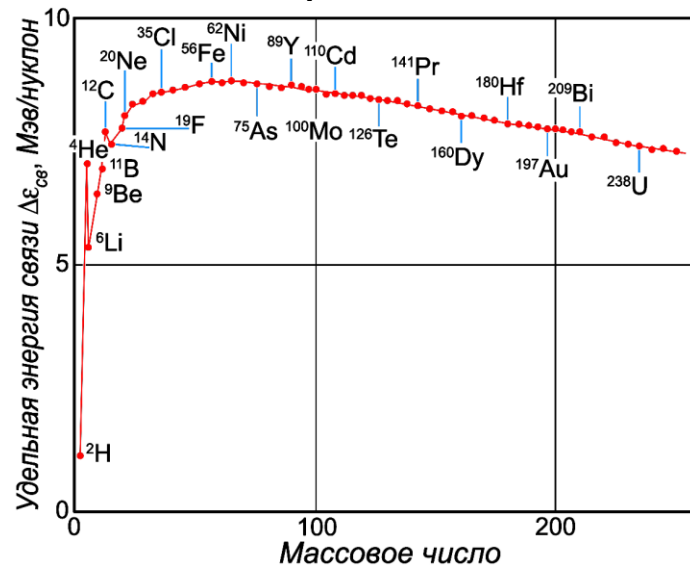
где  $m_p$ ,  $m_n$ ,  $m_{\text{я}}$  – соответственно массы протона, нейтрона и ядра;  $m_{\text{H}} = m_p + m_e$  – масса атома водорода  ${}^1_1\text{H}$ ;  $M_{\text{а}}$  – атомная масса данного вещества.

Масса  $\Delta m$ , соответствующая энергии связи

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

называется **дефектом массы** ядра. На эту величину уменьшается масса всех нуклонов при образовании из них ядра.

**Удельной энергией связи** называется энергия связи, приходящаяся на



один нуклон:  $\Delta\epsilon_{\text{св}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}$ . Она характеризует устойчивость (прочность) атомных ядер, т. е. чем больше  $\Delta\epsilon_{\text{св}}$ , тем прочнее ядро.

Зависимость удельной энергии связи от массового числа приведена на рисунке. **Наиболее устойчивы** ядра *средней части Периодической таблицы* ( $28 < A < 138$ ). В этих ядрах  $\Delta\epsilon_{\text{св}}$  составляет приблизительно 8,7 МэВ/нуклон (для сравнения, энергия связи валентных электронов в атоме порядка 10 эВ, что в миллион раз меньше).

При переходе к более тяжёлым ядрам удельная энергия связи *уменьшается*, поскольку при увеличении числа протонов в ядре увеличивается

энергия их кулоновского отталкивания (например, для урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  она составляет 7,6 МэВ). Поэтому связь между нуклонами становится менее сильной, а сами ядра менее прочными.

*Энергетически выгодно:* 1) деление тяжёлых ядер на более лёгкие; 2) слияние лёгких ядер друг с другом в более тяжёлые. При обоих процессах выделяется огромное количество энергии; эти процессы в настоящее время реализованы практически: реакции деления ядер и реакции термоядерного синтеза ядер.

### 3. Спин ядра и его магнитный момент

Собственный момент импульса ядра – **спин ядра** – это векторная сумма **спинов нуклонов** (равен  $1/2$ ) и орбитальных моментов импульса нуклонов (момента импульса, обусловленных движением нуклонов внутри ядра).

Спин ядра квантуется по закону  $L_{\text{я}} = \hbar\sqrt{I(I+1)}$ , где  $I$  – **спиновое квантовое число**, которое принимает значения  $0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, \dots$

Атомное ядро кроме спина обладает **магнитным моментом**  $P_{\text{мЯ}} = g_{\text{Я}}L_{\text{Я}}$ , где  $g_{\text{Я}}$  – коэффициент пропорциональности, называемый **ядерным гиромагнитным отношением**. Единицей магнитных моментов ядер служит **ядерный магнетон**:  $\mu_{\text{Я}} = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5,0508 \cdot 10^{-27} \frac{\text{Дж}}{\text{Тл}}$ . Ядерный

магнетон в  $\frac{m_p}{m_e} \approx 1836$  раз меньше магнетона Бора, поэтому магнитные свойства атомов определяются в основном магнитными свойствами его электронов.

Наличие магнитного момента ядра объясняет **сверхтонкую структуру** в спектрах атомов во внешнем магнитном поле.

### 4. Свойства ядерных сил:

- 1) ядерные силы являются силами *притяжения*;
- 2) ядерные являются *короткодействующими* – их действие проявляется только на расстояниях порядка  $10^{-15}$  м;
- 3) ядерным силам свойственна *зарядовая независимость*: притяжение между любыми двумя нуклонами одинаково независимо от зарядового состояния нуклонов (протонного или нейтронного); ядерные силы имеют незлектрическую природу;
- 4) ядерным силам свойственно *насыщение*: каждый нуклон в ядре взаимодействует только с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов;
- 5) ядерные силы зависят от взаимной *ориентации спинов* взаимодействующих нуклонов. Например, протон и нейтрон образуют **дейтрон** – ядро изотопа дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  – только при условии параллельной ориентации их спинов;
- 6) ядерные силы **не являются центральными**, т. е. действующими по линии, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов.

## 5. Модели атомного ядра

**1. Капельная модель.** Эта модель основана на аналогии между поведением молекул в капле жидкости и нуклонов в ядре – короткодействие ядерных взаимодействий, одинаковая плотность ядерного вещества в разных ядрах (несжимаемость), свойство насыщения ядерных сил. Она трактует ядро, как *каплю электрически заряженной несжимаемой жидкости*, подчиняющуюся законам квантовой механики.

Капельная модель объяснила механизмы ядерных реакций, особенно реакции деления ядер, позволила получить полуэмпирическую формулу для энергии связи нуклонов в ядре.

**2. Оболочечная модель.** В этой модели нуклоны считаются движущимися независимо друг от друга в *усреднённом центрально-симметричном поле*. В соответствии с этим имеются дискретные энергетические уровни, заполняемые нуклонами с учётом принципа Паули.

Эти уровни группируются в **оболочки**, в каждой из которых может находиться определённое число нуклонов.

Ядра с полностью заполненными оболочками являются наиболее устойчивыми – **магические ядра**, у которых число протонов  $Z$  или нейтронов  $N$  равно одному из *магических чисел*: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126.

Ядра, у которых магическими являются и  $Z$ , и  $N$ , называются **дважды магическими**. Дважды магических ядер известно всего *пять*:  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^{16}_8\text{O}$ ,  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ,  ${}^{48}_{20}\text{Ca}$ ,  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ .

В частности, особенная устойчивость ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$  проявляется в том, что это единственная частица, испускаемая тяжёлыми ядрами при радиоактивном распаде (она называется  $\alpha$ -частицей).

## 6. Радиоактивное излучение и его виды

Радиоактивность была открыта в 1896 г. французским физиком Анри Беккерелем при изучении люминесценции солей урана. Оказалось, что урановые соли без внешнего воздействия (*самопроизвольно*) испускали излучение неизвестной природы, которое засвечивало изолированные от света фотопластинки, ионизовало воздух, проникало сквозь тонкие металлические пластинки, вызывало люминесценцию ряда веществ. Таким же свойством обладали и вещества, содержащие полоний  ${}^{210}_{84}\text{Po}$  и радий  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ .

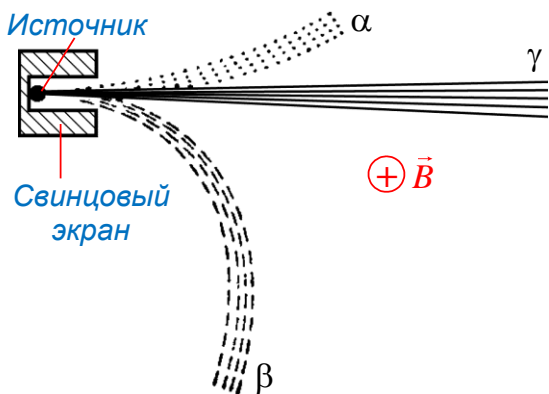
Обнаруженное излучение было названо **радиоактивным излучением**, а само явление испускания радиоактивного излучения – **радиоактивностью**.

Различаются *естественная и искусственная радиоактивности*.

**Естественной радиоактивностью** называется радиоактивность, наблюдающаяся у существующих в природе неустойчивых изотопов. **Искусственной радиоактивностью** называется радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций.

Радиоактивное излучение бывает **трёх типов**:  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучение. Состав  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучей был установлен по их отклонению в магнитном поле.

**(1)  $\alpha$ -Излучение** отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает высокой ионизирующей способностью и малой проникающей способностью ( $\alpha$ -лучи поглощаются слоем алюминия толщиной 0,05 мм).



(поглощается слоем алюминия толщиной 2–3 мм), чем у  $\alpha$ -частиц.

$\beta$ -Излучение представляет собой поток быстрых электронов  ${}_{-1}^0e$  ( $\beta^-$  – распад) или позитронов  ${}_{+1}^0e$  ( $\beta^+$  – распад).

(3)  $\gamma$ -Излучение не отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает относительно слабой ионизирующей способностью и очень большой проникающей способностью (например, проходит слой свинца толщиной 5 см), при прохождении через кристаллы обнаруживает дифракцию.  $\gamma$ -Излучение представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение с чрезвычайно малой длиной волны  $\lambda < 10^{-10}$  м и, вследствие этого, ярко выраженными корпускулярными свойствами, т.е. является потоком частиц –  $\gamma$ -квантов (фотонов).

## 7. Закон радиоактивного распада

**Радиоактивным распадом** называется естественное радиоактивное превращение ядер, происходящее самопроизвольно. Ядро, испытывающее радиоактивный распад, называется **материнским**; возникающее **дочернее ядро**, как правило, оказывается возбуждённым, и его переход в основное состояние сопровождается испусканием  $\gamma$ -фотона. Таким образом, гамма-излучение – основная форма уменьшения энергии возбуждённых продуктов радиоактивных превращений.

Самопроизвольный распад атомных ядер подчиняется **закону радиоактивного распада**:

$$N = N_0 \exp(-\lambda t),$$

где  $N_0$  – число ядер в данном объёме вещества в начальный момент времени  $t = 0$ ;  $N$  – число ядер в том же объёме к моменту времени  $t$ ;  $\lambda$  – **постоянная распада**, имеющая смысл вероятности распада ядра за 1 с и равная доле ядер, распадающихся в единицу времени.

Теория радиоактивного распада основывается на двух предположениях: 1) постоянная распада не зависит от внешних условий; 2) число ядер, распадающихся за время  $dt$  пропорционально наличному числу ядер. Убыль  $-dN$  числа ядер:  $-dN = \lambda N dt$ , следовательно, закон распада получим,

разделяя переменные и интегрируя выражение  $\frac{dN}{N} = -\lambda dt$ .

Интенсивность процесса радиоактивного распада характеризуют две величины: (1) **период полураспада**  $T_{1/2}$  и (2) **среднее время жизни**  $\tau$  радиоактивного ядра.

$\alpha$ -Излучение представляет собой поток ядер гелия – заряд  $\alpha$ -частицы равен  $+2e$ , а масса совпадает с массой ядра изотопа гелия  ${}^4_2\text{He}$ .

(2)  $\beta$ -Излучение также отклоняется

электрическим и магнитным полями; его ионизирующая способность на два порядка меньше чем ионизирующая способность  $\alpha$ -лучей, а проникающая способность, напротив, гораздо больше

**Период полураспада**  $T_{1/2}$  – время, за которое исходное число радиоактивных ядер в среднем уменьшается вдвое:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \exp(-\lambda T_{1/2}),$$

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

Суммарная продолжительность жизни  $dN$  ядер равна  $t|dN| = t\lambda N dt$ .  
**Среднее время жизни**  $\tau$  для всех первоначально существовавших ядер:

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

**Активностью**  $A$  **нуклида** в радиоактивном источнике называется число распадов, происходящих с ядрами образца в 1 с: 
$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N.$$

**Единица активности – беккерель (Бк):** 1 Бк – активность нуклида, при которой за 1 с происходит один акт распада. **Внесистемная единица активности** нуклида в радиоактивном источнике – **кюри (Ки):** 1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк.

## 8. Правила смещения

При радиоактивном распаде **выполняется закон сохранения электрических зарядов:**

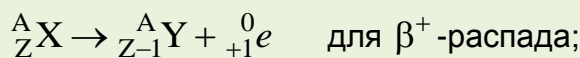
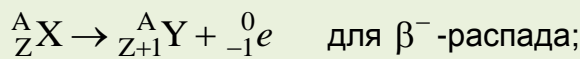
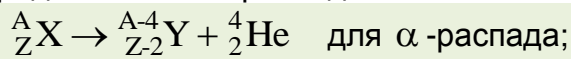
$$Z_{\text{я}} e = \sum_i Z_i e$$

и **закон сохранения массовых чисел:**

$$A_{\text{я}} = \sum_i A_i,$$

где  $Z_{\text{я}} e$  и  $A_{\text{я}}$  – соответственно, заряд и массовое число материнского ядра;  $Z_i e$  и  $A_i$  – соответственно заряды и массовые числа частиц, получившихся в результате радиоактивного распада.

Следствием этих законов являются **правила смещения**, позволяющие установить, какое ядро возникает в результате распада данного материнского ядра в различных типах радиоактивного распада:



где  ${}^A_Z X$  – материнское ядро;  $Y$  – символ дочернего ядра;  ${}^4_2 \text{He}$  – ядро гелия ( $\alpha$ -частица);  ${}^0_{-1} e$  – символическое обозначение электрона;  ${}^0_{+1} e$  – символическое обозначение **позитрона** – частицы с массой покоя электрона, и спином  $\frac{1}{2}$ , несущей положительный электрический заряд  $+e$ .

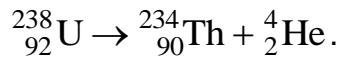
Возникающие в результате радиоактивного распада ядра могут быть, в свою очередь, радиоактивными. Это приводит к возникновению **цепочки**, или **ряда радиоактивных превращений**, заканчивающихся стабильным

элементом. Совокупность элементов, образующих такую цепочку, называется **радиоактивным семейством**.

Естественно радиоактивные ядра образуют **три радиоактивных семейства**, называемых семейством **урана** ( ${}^{238}_{92}\text{U}$ ), семейством **тория** ( ${}^{232}_{90}\text{Th}$ ) и семейством **актиния** ( ${}^{235}_{89}\text{Ac}$ ), которые после цепочки  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов заканчиваются на стабильных изотопах свинца  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ ,  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$  и  ${}^{207}_{82}\text{Pb}$  (имеющих особую устойчивость ядер, содержащих магическое число протонов – 82). **Четвёртое** из известных семейств – семейство **нептуния**, начинается от трансуранового элемента  ${}^{237}_{93}\text{Np}$ , полученного искусственным путём, и заканчивается на висмуте  ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ .

## 9. Альфа-распад

В основном  $\alpha$ -распад характерен для тяжёлых ядер ( $A > 200$ ,  $Z > 82$ ).  $\alpha$ -Распад подчиняется правилу смещения, например, распад изотопа урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$  приводит к образованию тория  ${}^{234}_{90}\text{Th}$ :



Согласно современным представлениям,  $\alpha$ -частицы образуются внутри тяжёлых ядер вследствие **объединения** двух протонов и двух нейтронов. Такая образовавшаяся частица сильнее отталкивается от оставшихся протонов ядра, чем отдельные протоны. Одновременно  $\alpha$ -частица испытывает меньшее ядерное притяжения к нуклонам в ядре, чем отдельные нуклоны.

Скорости вылетающих при распаде  $\alpha$ -частиц *очень велики* –  $1,4 \div 2 \cdot 10^7$  м/с, что соответствует энергиям  $4 \div 8,8$  МэВ. Опыты Резерфорда показали, что даже имея такие скорости  $\alpha$ -частицы *не могут приблизиться* к ядру на расстояние, при котором начинают действовать ядерные силы, и рассеяние  $\alpha$ -частиц на ядре объясняется *только* кулоновским взаимодействием. Таким образом, можно сделать вывод, что **ядро окружено потенциальным барьером**, высота которого не меньше 8,8 Мэв.

С другой стороны,  $\alpha$ -частицы, испускаемые ураном, имеют энергию 4,2 МэВ. Следовательно,  $\alpha$ -частицы вылетают из ядра с энергией, *значительно меньше* высоты потенциального барьера вследствие **туннельного эффекта**.

Для  $\alpha$ -частиц характерна *сильная зависимость* между периодом полураспада  $T_{1/2}$  и энергией  $E$  вылетающих частиц.

Эта зависимость определяется **законом Гейгера-Нэттола**:

$$\ln \lambda = A + B \ln R_\alpha,$$

где  $A$  и  $B$  эмпирические (определяемые из опыта) константы,  $\lambda = (\ln 2)/T_{1/2}$ ,  $R_\alpha$  – **пробег**  $\alpha$ -частицы в воздухе – **расстояние, проходимое частицей до её полной остановки**.

Таким образом, чем меньше период полураспада, тем больше *пробег*  $\alpha$ -частицы, а следовательно, и её энергия.

Пробег  $\alpha$ -частиц в воздухе (при нормальных условиях) составляет несколько сантиметров, в более плотных средах он гораздо меньше, составляя



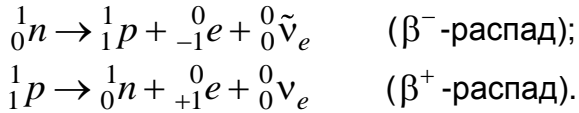
сотые доли миллиметра ( $\alpha$ -частицы можно задержать обычным листом бумаги).

Энергетический спектр  $\alpha$ -частиц, испускаемых данным радиоактивным элементом, обнаруживает "тонкую" структуру, т. е. испускается несколько групп  $\alpha$ -частиц, причём в пределах каждой группы их энергии практически постоянны. Дискретный спектр  $\alpha$ -частиц свидетельствует о том, что атомные ядра обладают дискретными энергетическими уровнями.

## 10. Бета-распад

Термином "бета-распад" обозначают **три типа** ядерных превращений: **электронный** ( $\beta^-$ ) и **позитронный** ( $\beta^+$ ) распады, а также **электронный захват** (другие названия – *e-захват* или *K-захват*).

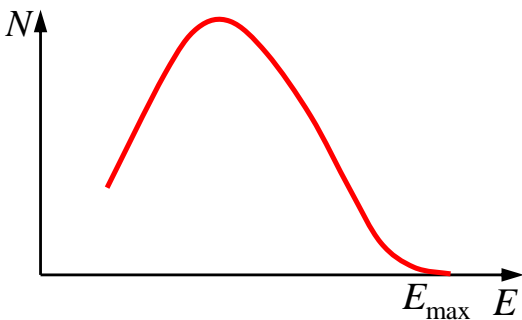
**Первые два типа** превращений состоят в том, что ядро испускает электрон  ${}_{-1}^0e$  (позитрон  ${}_{+1}^0e$ ) и электронное **антинейтрино**  ${}^0_0\tilde{\nu}_e$  (электронное **нейтрино**  ${}^0_0\nu_e$ ).  $\beta$ -Электроны рождаются в результате процессов, происходящих *внутри* ядра при *превращении* одного вида нуклона в ядре в другой – *нейтрона в протон* или *протона в нейтрон*:



Здесь  ${}^1_0n$  и  ${}^1_1p$  – обозначения нейтрона и протона.

Энергия покоя нейтрона *превышает* энергию покоя атома водорода (т. е. протона и электрона вместе взятых) на 782 кэВ. За счёт этой энергии может происходить *самопроизвольное* превращение нейтрона в протон –  $\beta^-$ -распад – *в том числе и вне ядра*. И действительно,  $\beta$ -электроны, рождающиеся при радиоактивном распаде свободных нейтронов, имеют энергию 782 кэВ.

$\beta^+$ -Распад для свободного протона наблюдаться не может, однако для протона, связанного в ядре благодаря ядерному взаимодействию частиц, эта реакция оказывается энергетически возможной.

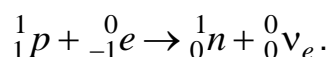


Энергетический спектр испускаемых при бета-распаде электронов является непрерывным, простирающимся до **верхней границы энергии  $\beta$ -спектра**  $E_{\max}$ . Полная энергия, теряемая ядром при бета-распаде, всегда равна  $E_{\max}$ , но она по разному распределяется между электроном и антинейтрино. Максимальное значение энергии электрона  $E = E_{\max}$

означает, что вся энергия уносится электроном, нулевое значение энергии электрона соответствует тому, что вся энергия уносится антинейтрино.

Для  $\beta^-$ -радиоактивности свободных нейтронов  $E_{\max} = 782$  кэВ.

**В случае e-захвата (K-захвата)** превращение протона в нейтрон идёт по схеме:



При этом исчезает один из электронов на ближайшем к ядру  $K$ -слое атома.

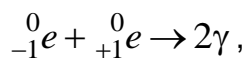
Протон, превращаясь в нейтрон, как бы "захватывает"  $K$ -электрон. Особенностью этого типа бета-распада является вылет из ядра только нейтрино  ${}^0_0\nu_e$ . Исчезновение одного из электронов в  $K$ -слое атома приводит к электронным переходам между внутренними электронными оболочками атома, что сопровождается *характеристическим рентгеновским излучением*.

## 11. Античастицы и их аннигиляция

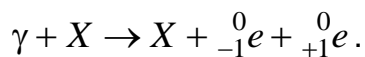
Электрон и позитрон это пример пары **античастиц**. Существование позитрона было теоретически предсказано в 1930 г. Дираком и подтверждено экспериментально в 1932 г. Андерсоном.

Практически у каждой частицы имеется античастица, обычно обозначаемая тем же символом, но с добавлением *тильды* над ним. У частицы и античастицы **масса, время жизни и спин одинаковы**. *Остальные характеристики*, в том числе электрический заряд и магнитный момент, *равны по модулю, но противоположны по знаку*. Примерами частиц и античастиц являются: протон  $p$  и антипротон  $\tilde{p}$ , нейтрон  $n$  и антинейтрон  $\tilde{n}$ , нейтрино  $\nu_e$  и антинейтрино  $\tilde{\nu}_e$ , электрон  $e^- \equiv {}^0_{-1}e$  и позитрон  $e^+ \equiv \tilde{e}^- \equiv {}^0_{+1}e$ .

Взаимодействие частицы и античастицы приводит к их **аннигиляции**. Термин "аннигиляция" переводится как "уничтожение", но, разумеется, его не следует трактовать буквально. В результате процесса аннигиляции электрона с позитроном рождается два (реже три) высокоэнергетичных фотона ( $\gamma$ -кванта):



причём энергия электронно-позитронной пары переходит в энергию фотонов. Появление в этом процессе не менее двух фотонов следует из закона сохранения импульса. Возможен и *обратный процесс* – **рождение электронно-позитронной пары** при взаимодействии  $\gamma$ -квантов (фотонов) большой энергии ( $E_\gamma > 1,02 \text{ МэВ} = 2m_e c^2$ ) с веществом (ядром  $X$ ):



Частица  $X$  необходима для того, чтобы выполнялись законы сохранения энергии и импульса.

*Процессы возникновения и аннигиляции электронно-позитронных пар являются примером взаимосвязи различных форм материи: в этих процессах материя в форме вещества превращается в материю в форме электромагнитного поля, и наоборот.*

## 12. Гамма-излучение

Гамма-излучение является жёстким электромагнитным излучением, энергия которого испускается при переходах ядер из возбуждённых энергетических состояний в основное или менее возбуждённые состояния, а также при ядерных реакциях.

$\gamma$ -Излучение *не самостоятельный* тип радиоактивности. Оно *сопровождает* процессы  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов и не вызывает изменения заряда и массового числа ядер.  $\gamma$ -Излучение испускается **дочерним** (а не материнским) ядром, которое в момент своего образования оказывается возбуждённым. Переход из возбуждённого состояния ядра в основное происходит за время

примерно  $10^{-13}$ – $10^{-14}$  с, что значительно меньше времени жизни возбуждённого атома (примерно  $10^{-8}$  с).

Спектр  $\gamma$ -излучения является **линейчатым**, что доказывает дискретность энергетических состояний атомных ядер.

$\gamma$ -Излучение является столь коротковолновым, что его волновые свойства проявляются весьма слабо, а на первый план выступают корпускулярные свойства. Поэтому  $\gamma$ -излучение рассматривают как *поток частиц* –  $\gamma$ -квантов.

$\gamma$ -Кванты, обладая нулевой массой покоя, *не могут замедляться* в среде, поэтому при прохождении  $\gamma$ -излучения сквозь вещество они либо поглощаются, либо рассеиваются им. *Основными процессами*, сопровождающими прохождение  $\gamma$ -излучения через вещество, являются:

- *фотоэффект* или **фотоэлектрическое поглощение  $\gamma$ -излучения** – испускание атомом, вследствие поглощения  $\gamma$ -кванта, электрона с одной из внутренних электронных оболочек, которое сопровождается характеристическим рентгеновским излучением. Фотоэффект является преобладающим механизмом поглощения в области малых энергий  $\gamma$ -квантов  $E_\gamma < 100$  кэВ;
- *комpton-эффект* (комптоновское рассеяние) является основным механизмом взаимодействия  $\gamma$ -квантов с веществом при энергиях  $E_\gamma \approx 500$  кэВ;
- *образование электрон-позитронных пар* (при  $E_\gamma > 1,02$  МэВ =  $2m_e c^2$ ) становится основным процессом взаимодействия  $\gamma$ -квантов с веществом при  $E_\gamma > 10$  МэВ.

Если энергия  $\gamma$ -кванта превышает энергию связи нуклонов в ядре ( $7 \div 8$  МэВ), то в результате поглощения  $\gamma$ -кванта может наблюдаться **ядерный фотоэффект** – выброс из ядра одного из нуклонов, чаще всего нейтрона.

### 13. Дозиметрические величины и единицы

Воздействие  $\gamma$ -излучения (а также других видов ионизирующего излучения) на вещество характеризуют **дозой ионизирующего излучения**.

*Различаются:*

- **Поглощённая доза излучения** – это физическая величина, равная отношению энергии излучения к массе облучаемого вещества.

**Единица** поглощённой дозы излучения – **грей (Гр)**:  $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$  – доза излучения, при которой облучённому веществу массой 1 кг передаётся энергия любого ионизирующего излучения 1 Дж.

- **Экспозиционная доза излучения** – это физическая величина, равная отношению суммы электрических зарядов всех ионов одного знака, созданных электронами, освобождёнными в облучённом воздухе (при условии полного использования ионизирующей способности электронов), к массе этого воздуха.

**Единица** экспозиционной дозы излучения – **кулон на килограмм (Кл/кг)**; внесистемной единицей является **рентген (Р)**:  $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ .

- **Биологическая доза** – это величина, определяющая воздействие излучения на организм.

**Единица биологической дозы** – это **биологический эквивалент рентгена (бэр)**: 1 бэр – доза любого вида ионизирующего излучения, производящая такое же биологическое действие, как и доза рентгеновского или  $\gamma$ -излучения в 1 Р (1 бэр =  $10^{-2}$  Дж/кг).

**Мощность дозы излучения** – величина, равная отношению дозы излучения к времени облучения. *Различают:*

- 1) **мощность поглощённой дозы** (единица – **грей на секунду (Гр/с)**);
- 2) **мощность экспозиционной дозы** (единица – **ампер на килограмм (А/кг)**).

#### 14. Эффект Мёссбауэра

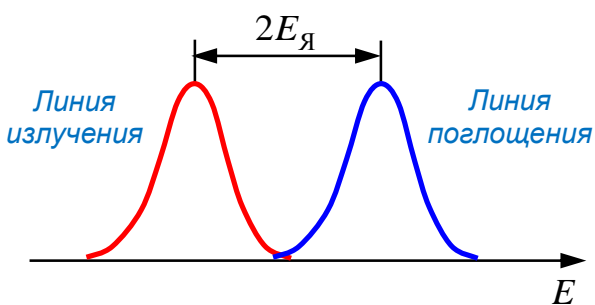
**Эффектом Мёссбауэра** называется явление упругого испускания или поглощения  $\gamma$ -квантов атомными ядрами, связанными в твёрдом теле, не сопровождающееся изменением внутренней энергии тела (т. е. происходящее без возбуждения квантов колебаний кристаллической решётки – фононов).

При излучении или поглощении  $\gamma$ -кванта **ядром свободного атома**, вследствие закона сохранения импульса ядро атома приобретает импульс, равный импульсу излучённого или поглощённого фотона, а значит и кинетическую энергию – кинетическую **энергию отдачи ядра** ( $E_{\text{Я}}$ ).

Следствием этого является то, что:

- при переходе ядра из возбуждённого состояния с энергией  $E$  в основное, излучаемый  $\gamma$ -квант имеет энергию  $E_{\gamma}$  несколько меньшую, чем  $E$ , из-за отдачи ядра в процессе излучения:  $E_{\gamma} = E - E_{\text{Я}}$ ;
- при возбуждении ядра и переходе его из основного состояния в возбуждённое с энергией  $E$   $\gamma$ -квант должен иметь энергию несколько большую, чем  $E$ :  $E'_{\gamma} = E + E_{\text{Я}}$ .

Таким образом, максимумы линий излучения и поглощения должны быть сдвинуты друг относительно друга на величину  $2E_{\text{Я}}$  (см. рисунок), что делает



невозможным **резонансное** поглощение  $\gamma$ -квантов для **свободных ядер**.

Резонансное поглощение  $\gamma$ -излучения может быть получено только при **компенсации потери энергии на отдачу ядра**.

Такая ситуация реализуется в **твёрдом теле**, когда атомы жёстко связаны между собой и энергия и импульс отдачи передаётся не одному атому, а всему кристаллу в целом. В этом случае потери энергии на отдачу становятся исчезающе малыми, поскольку масса кристалла гораздо больше массы одного атома и кинетическая энергия, которую приобретает весь кристалл, ничтожна.

При достаточно низких температурах, когда вероятность возбуждения фононов вследствие отдачи атомов снижается, процессы излучения и поглощения  $\gamma$ -излучения происходят практически без потерь энергии (идеально упруго) без изменения внутренней энергии тела.

## 15. Приборы для регистрации радиоактивных излучений и частиц

Наблюдение и регистрация радиоактивных излучений ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) и частиц основаны на их способности производить ионизацию или возбуждение атомов среды.

**Сцинтилляционный счётчик** – детектор ядерных частиц, основными элементами которого являются **сцинтиллятор** (кристаллофосфор, излучающий вспышки света при попадании в него частиц) и фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), позволяющий преобразовать слабые световые вспышки в электрические импульсы, которые регистрируются электронной аппаратурой.

**Ионизационные счётчики** – заполненные газом электрические конденсаторы – детекторы частиц, основанные на способности заряженных частиц вызывать ионизацию газа, с последующим разделением продуктов ионизации в электрическом поле. Если счётчик регистрирует только ионы, образовавшиеся непосредственно под действием частиц, то такой счётчик называется **импульсной ионизационной камерой**. Счётчики, в которых основную роль играет вторичная ионизация, обусловленная столкновениями первичных ионов с атомами и молекулами газа, в результате чего возникает разряд в газе, называются **газоразрядными счётчиками**. Пример газоразрядного счётчика – счётчик Гейгера-Мюллера.

**Полупроводниковые счётчики** – полупроводниковые диоды, прохождение через которые регистрируемых частиц, приводит к появлению электрического тока через диод.

**Камера Вильсона** – цилиндр с плотно прилегающим поршнем, заполненный нейтральным газом. При резком (адиабатическом) расширении газ становится пересыщенным, и на траекториях частиц, пролетевших через камеру, образуются треки из тумана, которые фотографируются.

**Пузырьковая камера** – конструктивно похожая на камеру Вильсона и заполненная прозрачной перегретой жидкостью. Пролетающая через камеру заряженная частица вызывает резкое вскипание жидкости, и траектория частицы оказывается обозначенной цепочкой пузырьков газа – образуя трек, который, как и в камере Вильсона, фотографируется. Эффективный объем пузырьковой камеры на 2–3 порядка больше, чем у камеры Вильсона, так как жидкости гораздо плотнее газов.

**Ядерные фотоэмульсии** – толстослойные фотографические эмульсии, прохождение заряженных частиц через которые вызывает ионизацию, приводящую к образованию скрытого изображения в эмульсии. После проявления следы заряженных частиц обнаруживаются в виде цепочки зёрен металлического серебра. Для исследований высокоэнергетических частиц используются **стопы пластинок** – большое число маркированных фотоэмульсионных пластинок, помещаемых на пути частиц и после проявления промеряемых под микроскопом.

## 16. Ядерные реакции и их основные типы

**Ядерные реакции** – это превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с  $\gamma$ -квантами) или друг с другом.

Символически реакции записываются в виде:



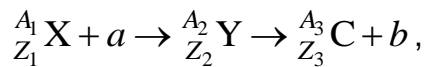
где  $X$  и  $Y$  – исходное и конечное ядра;  $a$  и  $b$  – бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частицы.

В любой ядерной реакции выполняются законы сохранения электрических зарядов и массовых чисел: сумма зарядов (и массовых чисел) ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме зарядов (и сумме массовых чисел) конечных продуктов (ядер и частиц) реакции. Выполняются также законы сохранения энергии, импульса и момента импульса.

Ядерные реакции могут быть как **экзотермическими** (с выделением энергии) так и **эндотермическими** (с поглощением энергии).

Ядерные реакции протекают в несколько этапов. На **ПЕРВОМ** этапе налетающая частица застревает в ядре-мишени, образуя **составное ядро** или **компаунд-ядро**, и её энергия передаётся не какому-либо нуклону, а равномерно распределяется между всеми частицами составного ядра, так что ни одна из них не получает энергии, достаточной для вылета из ядра. Составное ядро рассматривается как возбуждённая статистическая система частиц, совершающая неупорядоченные движения, подобные движению частиц в капле жидкости. В результате случайных отклонений от равномерного распределения энергии возбуждения между частицами составного ядра на какой-либо одной из них концентрируется энергия, достаточная для вылета этой частицы из ядра. Этот **ВТОРОЙ** этап ядерной реакции происходит по истечении времени  $(10^7 \div 10^8) \cdot \tau_{\text{я}}$  после первого этапа, где  $\tau_{\text{я}}$  – **характерное ядерное время** ( $\sim 10^{-22}$  с).

Схема ядерной реакции с образованием компаунд-ядра:



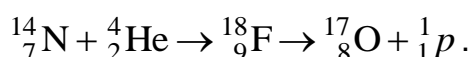
где  ${}_{Z_1}^{A_1}X$  – исходное ядро-мишень;  $a$  – налетающая частица;  ${}_{Z_2}^{A_2}Y$  – составное ядро;  ${}_{Z_3}^{A_3}C$  – ядро – продукт ядерной реакции;  $b$  – частица, вылетевшая из ядра в результате реакции.

Если  $a \equiv b$ , то происходит **рассеяние** частицы ядром: **упругое** – при  $E_b = E_a$  или **неупругое** – при  $E_b \neq E_a$ . Если же испущенная частица **не тождественна** с захваченной ( $b \neq a$ ), то идёт ядерная реакция в прямом смысле слова.

**Ядерные реакции классифицируются:**

- 1) **по роду участвующих в них частиц** – реакции под действием нейтронов; заряженных частиц;  $\gamma$ -квантов;
- 2) **по энергии вызывающих их частиц** – реакции при малых, средних и высоких энергиях;
- 3) **по роду участвующих в них ядер** – реакции на лёгких ( $A < 50$ ); средних ( $50 < A < 100$ ) и тяжёлых ( $A > 100$ ) ядрах;
- 4) **по характеру происходящих ядерных превращений** – реакции с испусканием нейтронов, заряженных частиц; реакции захвата (в случае этих реакций составное ядро не испускает никаких частиц, а переходит в основное состояние, излучая один или несколько  $\gamma$ -квантов).

Первая в истории ядерная реакция была осуществлена Резерфордом при бомбардировке ядра азота  $\alpha$ -частицами:



## 17. Ядерные реакции под действием нейтронов

В зависимости от скорости (энергии) нейтроны делят на **медленные** и **быстрые**.

**Медленные нейтроны:**

ультрахолодные ( $\leq 10^{-7}$  эВ),  
 очень холодные ( $10^{-7} \div 10^{-4}$  эВ),  
 холодные ( $10^{-4} \div 10^{-3}$  эВ),  
 тепловые ( $10^{-3} \div 0,5$  эВ),  
 резонансные ( $0,5 \div 10^4$  эВ).

**Быстрые нейтроны:**

быстрые ( $10^4 \div 10^8$  эВ),  
 высокоэнергетичные ( $10^8 \div 10^{10}$  эВ),  
 релятивистские ( $\geq 10^{10}$  эВ).

В веществах, называемых **замедлителями** (графит, тяжёлая вода  $D_2O$ ,  $HDO$ , соединения бериллия), быстрые нейтроны рассеиваются на ядрах, и их энергия переходит в энергию теплового движения атомов вещества-замедлителя.

Медленные нейтроны эффективны для возбуждения ядерных реакций, поскольку они относительно долго могут находиться вблизи атомного ядра, а поэтому вероятность захвата нейтрона ядром очень большая.

Для медленных нейтронов характерны **упругое рассеяние на ядрах** (реакция типа  $(n, n)$ ) и **радиационный захват** (реакция типа  $(n, \gamma)$ ). Реакция типа  $(n, \gamma)$  приводит к образованию нового изотопа исходного вещества:

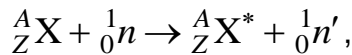


Под действием тепловых нейтронов на лёгких ядрах наблюдаются реакции захвата нейтронов с испусканием протонов и  $\alpha$ -частиц (реакции типа  $(n, p)$  и  $(n, \alpha)$ ):



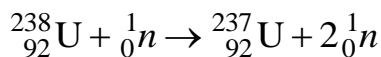
Но, главным образом, реакции типа  $(n, p)$  и  $(n, \alpha)$  происходят под действием **быстрых нейтронов**, т. к. в этом случае энергия достаточна для преодоления потенциального барьера, препятствующего вылету протонов и  $\alpha$ -частиц.

Для быстрых нейтронов наблюдается неупругое рассеяние  $(n, n')$ :

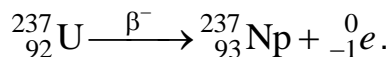


где вылетающий из ядра нейтрон  ${}^1_0n'$  имеет энергию, меньшую энергии налетающего нейтрона  ${}^1_0n$ , а остающееся после вылета нейтрона ядро находится в возбуждённом состоянии  ${}^A_ZX^*$ , поэтому его переход в нормальное состояние сопровождается испусканием  $\gamma$ -кванта.

Когда энергия электронов достигает 10 МэВ, становятся возможными реакции типа  $(n, 2n)$ . Например, в результате реакции



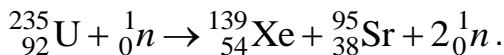
образуется  $\beta^-$ -активный изотоп, распадающийся по схеме



## 18. Реакции деления ядра

Тяжёлое компаунд-ядро, возбуждённое при резонансном захвате нейтрона, может разделиться на две приблизительно равные части (**реакция деления тяжёлых ядер**). Образовавшиеся части называются **осколками деления**. Неустойчивость тяжёлых ядер обусловлена **взаимным отталкиванием** большого числа протонов, находящихся в ядрах.

Пример реакции деления:

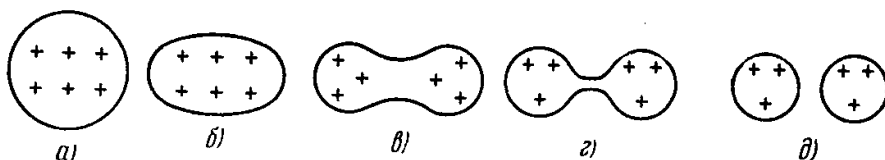


Деление тяжёлого ядра на два осколка сопровождается **выделением энергии** порядка 1 МэВ на каждый нуклон. Это следует из того, что удельная энергия связи для ядер средней массы составляет примерно 8,7 МэВ, в то время как для тяжёлых ядер она равна 7,6 МэВ (см. рисунок на стр. 8–3).

Например, при делении ядра урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$ , содержащего 238 нуклонов, выделяется энергия порядка 200 МэВ.

В основу теории деления атомных ядер положена **капельная модель ядра**. Ядро рассматривается как капля электрически заряженной несжимаемой жидкости (а) с плотностью, равной ядерной, и подчиняющейся законам квантовой механики. При захвате нейтрона устойчивость такой заряженной капли нарушается, ядро приходит в **колебания** – попеременно то вытягивается, то сжимается.

Вероятность деления ядер определяется **энергией активации**



– **минимальной энергией**, необходимой для осуществления реакции деления ядра. При энергиях возбуждения **меньших**, чем энергия активации деления, деформация ядра-капли не доходит до критической (б), ядро не делится и возвращается в основное энергетическое состояние, испустив  $\gamma$ -квант.

При энергиях возбуждения **больше** энергии активации деления деформация капли достигает критического значения (в), образуется и удлиняется "перетяжка" в капле (з), и наступает деление (д).

Тяжёлые ядра способны к делению, если для них выполняется условие  $Z^2/A \geq 17$ , где  $Z^2/A$  – **параметр деления**. Это условие выполняется для всех ядер, начиная с серебра  ${}_{47}^{108}\text{Ag}$ , для которого  $Z^2/A \approx 20$ .

**Критическим параметром деления** называется параметр  $(Z^2/A)_{\text{крит}} = 49$ . Ядра с параметром деления большим критического  $Z^2/A > 49$  совершенно неустойчивы относительно деления. Такие ядра, если бы они возникли, мгновенно претерпевали бы деление за времена порядка  $10^{-23}$ – $10^{-24}$  с.

При  $Z^2/A < 49$  возможно **самопроизвольное (спонтанное) деление ядер**, происходящее аналогично  $\alpha$ -распаду за счёт туннельного эффекта. Однако период полураспада для спонтанного деления ядер составляет  $10^{16}$ – $10^{17}$  лет.

Осколки деления в момент своего образования обладают избытком нейтронов, поскольку для средних ядер число протонов приблизительно равно числу нейтронов ( $N/Z \approx 1$ ), а для тяжёлых ядер число нейтронов значительно



превышает число протонов ( $N/Z \approx 1,6$ ). Избыточные нейтроны, испускаемые осколками, называются **нейтронами деления**. В среднем на каждый акт деления приходится 2,5 испущенных нейтрона. Большинство из них испускается практически мгновенно ( $t \leq 10^{-14}$  с) – **мгновенные нейтроны**, а часть ( $\sim 0,7\%$ ) спустя некоторое время после деления ( $0,05 \text{ с} \leq t \leq 60 \text{ с}$ ) – **запаздывающие нейтроны**.

## 19. Цепная реакция деления

Каждый из мгновенных нейтронов, возникших в реакции деления, взаимодействуя с соседними ядрами делящегося вещества, вызывает в них реакцию деления.

При этом идёт *лавинообразное* нарастание числа актов деления – начинается **цепная реакция деления** – ядерная реакция, в которой частицы, вызывающие реакцию, образуются как продукты этой реакции.

Условием возникновения цепной реакции является наличие размножающихся нейтронов.

**Коэффициентом размножения нейтронов**  $k$  называется отношение числа нейтронов, возникающих в некотором звене реакции, к числу таких нейтронов в предшествующем звене.

**Необходимое условие** развития цепной реакции:  $k > 1$ . Такая реакция называется **развивающаяся реакция**. При  $k = 1$  идёт самоподдерживающаяся реакция. При  $k < 1$  идёт затухающая реакция.

Часть вторичных нейтронов не участвует в поддержании цепной реакции – захватывается неделящимися примесями, выходит из зоны реакции без захвата ядром, теряет энергию в процессах неупругого рассеяния и т. д.

Поэтому **коэффициент размножения** зависит от природы делящегося вещества, а для данного изотопа – от его количества, а также размеров и формы **активной зоны** – пространства, где происходит цепная реакция.

Минимальные размеры активной зоны, при которых возможно осуществление цепной реакции, называется **критическими размерами**.

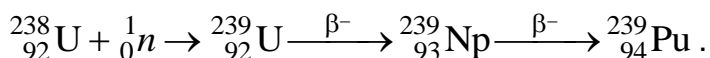
Минимальная масса делящегося вещества, находящегося в системе критических размеров, необходимая для осуществления цепной реакции, называется **критической массой**.

Цепные реакции делятся на **управляемые** и **неуправляемые**. Взрыв атомной бомбы – пример неуправляемой реакции. Управляемые цепные реакции осуществляются в ядерных реакторах.

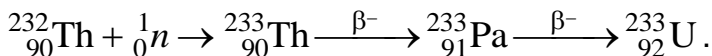
## 20. Ядерные реакторы

В природе имеется **три** изотопа урана и тория, которые могут служить ядерным топливом или сырьём для его получения:

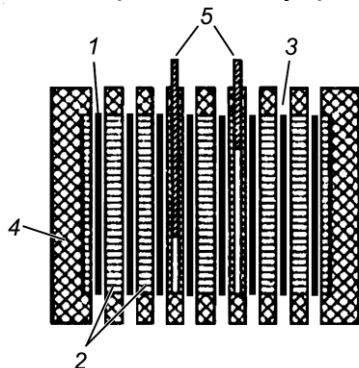
- 1)  ${}_{92}^{235}\text{U}$  – в естественном уране его содержится примерно 0,7%;
- 2)  ${}_{92}^{238}\text{U}$  – в естественном уране его содержится примерно 99,3% – используется для получения трансуранового элемента плутония по схеме:



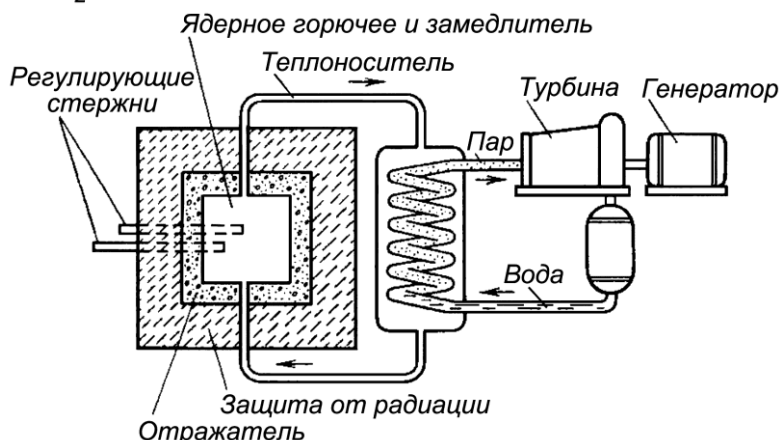
- 3)  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  – служит сырьём для получения искусственного ядерного топлива  ${}^{233}_{92}\text{U}$  по схеме:



**Ядерным реактором** называется устройство, в котором осуществляется и поддерживается управляемая цепная реакция деления.



Рассмотрим схему реактора на медленных нейтронах. В активной зоне реактора расположены тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) 1 и замедлитель 2 (в нем нейтроны замедляются до тепловых скоростей). ТВЭЛы представляют собой блоки из делящегося материала, заключённые в герметичную оболочку, слабо поглощающую нейтроны. За счёт энергии, выделяющейся при делении ядер, ТВЭЛы разогреваются, а поэтому для охлаждения они помещаются в поток теплоносителя 3.

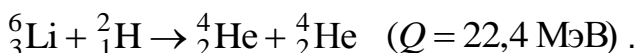
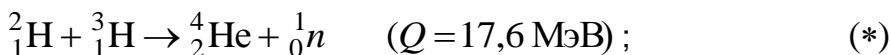
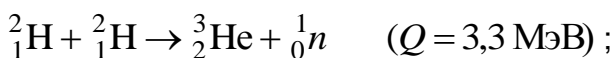
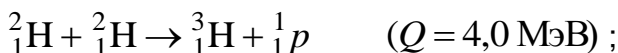


Активная зона окружена отражателем 4, уменьшающим утечку нейтронов. Поддержание стационарного режима реактора производится с помощью управляющих стержней 5 из материалов, сильно поглощающих нейтроны, например, из бора или кадмия. Теплоносителем в реакторе служит вода,

жидкий натрий и др. Теплоноситель в парогенераторе отдаёт своё тепло пару, который поступает в паровую турбину. Турбина вращает электрический генератор, ток от которого поступает в электрическую сеть.

## 21. Реакция синтеза атомных ядер

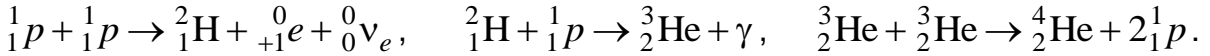
Реакция синтеза атомных ядер – образование из лёгких ядер более тяжёлых. При реакциях синтеза удельная энергия связи ядер резко увеличивается при переходе от ядер дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  и трития  ${}^3_1\text{H}$  к литию  ${}^6_3\text{Li}$  и гелию  ${}^4_2\text{He}$  (см. стр. 8-3), что приводит к большому энерговыделению  $Q$ :



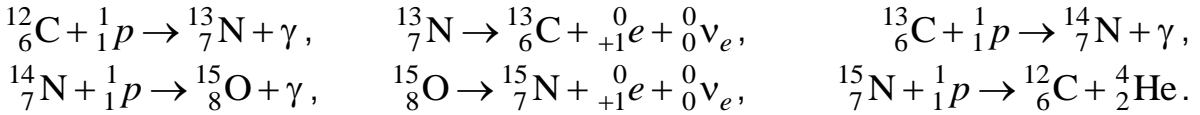
В реакциях синтеза выделяется значительно больше энергии в расчёте на один нуклон, чем в реакциях деления (например, при делении ядра урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$  выделяется 200 МэВ, что составляет 0,84 МэВ/нуклон, а в реакции (\*) выделяется  $17,6/5 = 3,5$  МэВ/нуклон).

Реакции синтеза лёгких ядер, связанные с преодолением их кулоновского отталкивания, эффективно могут протекать лишь при сверхвысоких температурах порядка  $10^8$ – $10^9$ К. Такие реакции называются **термоядерными реакциями синтеза** и происходят в веществе, находящимся в плазменном состоянии. Термоядерные реакции являются, по-видимому, источниками энергии звёзд, компенсирующими их излучение. Предположительно термоядерные реакции на Солнце, в которых ядра водорода превращаются в ядра гелия, могут протекать в форме одного из двух **термоядерных циклов**:

1) **протон-протонный цикл**:



2) **углерод-азотный цикл**:



## Дополнение

### 22. Фундаментальные взаимодействия

В настоящее время различают **четыре типа фундаментальных взаимодействий**: сильное, электромагнитное, слабое и гравитационное.

**Сильное взаимодействие** свойственно частицам, называемых адронами (*hadros* (греч.) – сильный, массивный, крупный), к числу которых принадлежат, в частности, протон, и нейтрон. Наиболее известное его проявление – ядерные силы, обеспечивающие существование атомных ядер.

В **электромагнитном взаимодействии**, наиболее известном и наиболее изученном, непосредственно участвуют только электрически заряженные частицы и фотоны. Одно из его проявлений – кулоновские силы, обуславливающие существование атомов.

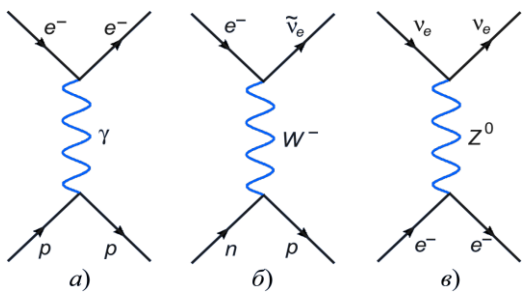
**Слабое взаимодействие** присуще всем частицам, кроме фотонов. Наиболее известное его проявление – бета-превращения атомных ядер. Оно же обуславливает нестабильность многих элементарных частиц, например нейтрона.

**Гравитационное взаимодействие** свойственно всем телам Вселенной, проявляясь в виде сил всемирного тяготения. Эти силы обуславливают существование звёзд, планетных систем, и т. п. Гравитационное взаимодействие предельно слабое и в мире элементарных частиц при обычных энергиях непосредственной роли не играет.

Фундаментальные взаимодействия различаются интенсивностями и радиусами действия:

Взаимодействие	Интенсивность	Радиус действия, м
Сильное	$\sim 1$	$\sim 10^{-16}$
Электромагнитное	$\frac{1}{137}$	$\infty$
Слабое	$\sim 10^{-10}$	$\sim 10^{-18}$
Гравитационное	$\sim 10^{-38}$	$\infty$

В 60-х годах Ш.Гэлшоу, С.Вайнбергом и А.Саламом была создана **теория электрослабого** взаимодействия, объединившая электромагнитное и слабое



взаимодействия. Схематично, электромагнитное взаимодействие двух заряженных частиц происходит путём обмена между ними **виртуальным фотоном**  $\gamma$ . В результате возникает, например рассеяние электрона протоном, которое схематически изображается **диаграммой Фейнмана (а)**. А слабое взаимодействие происходит путём

обмена **промежуточными векторными бозонами** ( $W^+, W^-, Z^0$ ) – тяжёлыми частицами со спином 1. При этом  $W^\pm$ -бозоны осуществляют взаимодействие при котором изменяется знак заряда исходной частицы (например, бета-распад  ${}^0_0n \rightarrow {}^1_1p + {}_{-1}^0e + {}^0_0\tilde{\nu}_e$  (диаграмма Фейнмана (б)), а  $Z^0$ -бозон – при котором знак не изменяется (например, рассеяние нейтрино на электроне  ${}^0_0\tilde{\nu} + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_{-1}^0e + {}^0_0\tilde{\nu}_e$  (диаграмма Фейнмана (в))). Таким образом, *три промежуточных бозона и фотон* являются квантами, так называемых, **калибровочных векторных полей** электрослабого взаимодействия.

### 23. Элементарные частицы

У каждой элементарной частицы есть античастица, обозначается она тем же символом, но с добавлением тильды над ним.

Античастицы фотона,  $\pi^0$ - и  $\eta^0$ -мезонов тождественны самим частицам. Эти частицы являются *истинно нейтральными*, они не способны к аннигиляции, но испытывают взаимные превращения, являющиеся фундаментальным свойством всех элементарных частиц.

Элементарные частицы объединяются в **три группы**: фотоны, лептоны и адроны.

**Группа фотонов** состоит из одной частицы – фотона – кванта **электромагнитного** взаимодействия.

**Группа лептонов** состоит из электрона, мюона, электронного и мюонного нейтрино, тяжёлого лептона –  $\tau$ -лептона (таона), таонного нейтрино, а также соответствующих им античастиц. Они *участвуют* только в **электромагнитном и слабом** взаимодействиях.

К **группе адронов** относятся мезоны (пионы и каоны) и барионы (нуклоны (протон, нейтрон) и нестабильные частицы). При распаде бариона, наряду с другими частицами, всегда образуется новый барион – **закон сохранения барионного заряда**. Адроны обладают **сильным взаимодействием**, наряду с **электромагнитным и слабым**.

Адроны состоят из **кварков**. Каждый мезон  $M$  строится из одного кварка  $q$  и одного антикварка  $\tilde{q}$ , каждый барион  $B$  – из трёх кварков  $q$ :

$$M = q\tilde{q}, \quad B = qq\tilde{q}.$$

Число лептонов равно числу типов кварков – **принцип кварк-лептонной симметрии**.

Имеются кварки **шести типов**, которые подобно лептонам образуют три дублета, или три поколения ( $u, d$ ), ( $c, s$ ), ( $t, b$ ):

- 1) верхний ( $up$ ) –  $u$ ;
- 2) нижний ( $down$ ) –  $d$ ;
- 3) "очарованный" ( $charm$ ) –  $c$ ;

- 4) "странный" (*strange*) – *s* ;  
 5) "истинный" (*true*) – *t* ;  
 6) "прелестный" (*beauty*) – *b* .

У кварков имеются античастицы – **антикварки**.

Сводная таблица элементарных частиц.

Группа	Название частицы	Символ		Заряд, ед. <i>e</i>	Масса покоя, ед. <i>m<sub>e</sub></i>	Спин, ед. $\hbar$	Изотопический спин <i>I</i>	Лептонное число <i>L</i>	Барионное число <i>B</i>	
		частицы	античастицы							
Фотоны	Фотон	$\gamma$		0	0	1	—	0	0	
Лептоны	Электрон	$e^-$	$e^+$	1	1	1/2	—	+1	0	
	Электронное нейтрино	$\nu_e$	$\tilde{\nu}_e$	0	0	1/2	—	+1	0	
	Мюон	$\mu^-$	$\mu^+$	1	206,8	1/2	—	+1	0	
	Мюонное нейтрино	$\nu_\mu$	$\tilde{\nu}_\mu$	0	0	1/2	—	+1	0	
	Тау-лептон (Таон)	$\tau^-$	$\tau^+$	1	3487	1/2	—	+1	0	
	Таонное нейтрино	$\nu_\tau$	$\tilde{\nu}_\tau$	0	0	1/2	—	+1	0	
Мезоны	Пионы	$\pi^0$		0	264,1	0	1	0	0	
		$\pi^+$	$\pi^-$	1	273,1	0	1	0	0	
	Каоны	$K^0$	$\tilde{K}^0$	0	974,0	0	1/2	0	0	
		$K^+$	$K^-$	1	966,2	0	1/2	0	0	
	Эта-мезон	$\eta^0$		0	1074	0	—	0	0	
Адроны	Барионы	Протон	$p$	$\tilde{p}$	1	1836,2	1/2	1/2	0	+1
		Нейтрон	$n$	$\tilde{n}$	0	1838,7	1/2	1/2	0	+1
	Гипероны:									
	Барионы	лямбда	$\Lambda^0$	$\tilde{\Lambda}^0$	0	2183	1/2	0	0	+1
		сигма	$\Sigma^0$	$\tilde{\Sigma}^0$	0	2334	1/2	1	0	+1
			$\Sigma^+$	$\tilde{\Sigma}^+$	1	2328	1/2	1	0	+1
			$\Sigma^-$	$\tilde{\Sigma}^-$	1	2343	1/2	1	0	+1
		кси	$\Xi^0$	$\tilde{\Xi}^0$	0	2573	1/2	1/2	0	+1
			$\Xi^-$	$\tilde{\Xi}^-$	1	2586	1/2	1/2	0	+1
	омега	$\Omega^-$	$\tilde{\Omega}^-$	1	3273	3/2	0	0	+1	

## Предметный указатель

Ссылки в указателе состоят из **двух** чисел. **Первое число** – соответствующая часть пособия: 1–Механика, 2–Молекулярная физика и термодинамика, 3–Электричество, 4–Магнетизм, 5–Колебания и волны, 6–Оптика, 7–Квантовая физика, 8–Ядерная физика. **Второе число** – номер страницы.

### А

абсолютно неупругое тело 1-3  
 – твёрдое тело 1-3  
 – упругое тело 1-3  
 – чёрное тело 6-26  
 аберрация 6-4  
 агрегатные состояния 2-23  
 адиабата 2-16  
 адиабатическое приближение 7-25  
 активная зона реактора 8-17  
 активность нуклида 8-7  
 акцептор 7-28  
 альфа-излучение 8-5  
 альфа-распад 8-8  
 аморфные тела 2-27  
 ампер 1-2, 3-22, 4-6  
 амплитуда колебания 5-2  
 амплитудные коэффициенты  
   отражения 5-30  
 – – пропускания 5-30  
 анализатор 6-22  
 анизотропность 2-27  
 аннигиляция 8-10  
 антинейтрино 8-9  
 антистоксовый спутник 7-23  
 антиферромагнетик 4-28  
 античастицы 8-10  
 астигматизм 6-5

### Б

барионы 8-20  
 беккерель 8-7  
 бета-излучение 8-6, 8-9  
 бета-распад 8-9  
 биения 5-10  
 бипризма Френеля 6-9  
 ближний порядок 2-25  
 бозоны 7-17  
 – промежуточные 8-20

броуновское движение 2-9  
 бэр 8-12

### В

ватт 1-12  
 вакансия 2-29  
 вебер 4-12  
 вектор 1-28  
 – Умова (Пойтинга) 5-31  
 векторное произведение векторов  
   1-29  
 вес тела 1-19  
 вечный двигатель первого рода 2-13  
 взаимная индукция 4-19  
 внутреннее трение 1-20  
 возгонка 2-30  
 волна 5-20  
 – бегущая 5-21  
 – де Бройля 7-6  
 – плоская 5-21  
 – поперечная 5-20  
 – продольная 5-20  
 – стоячая 5-24  
 – сферическая 5-22  
 – упругая 5-20  
 – – гармоническая 5-20  
 – – электромагнитная 5-27  
 волновая функция 7-8  
 волновое число 5-22  
 – уравнение 5-22  
 волновой пакет 5-23  
 волновая поверхность 5-21  
 восприимчивость вещества  
   диэлектрическая 3-15  
 – – магнитная 4-23  
 время релаксации 5-13  
 вязкость 1-20  
 – динамическая 1-21  
 – кинематическая 1-21

**Г**

газ идеальный 2-3  
 – электронный 3-29  
 гамма-излучение 8-6, 8-10  
 гармонический анализ 5-10  
 генри 4-7, 4-17  
 герц 1-7, 5-3  
 гипероны 8-20  
 гипотеза де Бройля 7-6  
 – Планка 6-28  
 гиромагнитное отношение 3-21  
 – – ядерное 8-4  
 гистерезис 3-16, 4-27  
 градиент 1-23, 1-30  
 – скорости 1-21  
 граничные условия 3-16, 4-26, 4-32  
 грей 8-11

**Д**

давление 1-19  
 – гидростатическое 1-20  
 – динамическое 1-20  
 – молекулярное 2-25  
 – парциальное 2-4  
 – под искривлённой поверхностью  
 жидкости 2-26  
 – света 6-31  
 – статическое 1-20  
 дальний порядок 2-25  
 движение вращательное 1-3  
 – замедленное 1-5  
 – криволинейное 1-4  
 – механическое 1-3  
 – неравномерное 1-5  
 – поступательное 1-3  
 – прямолинейное 1-4  
 – равномерное 1-5  
 – ускоренное 1-5  
 двойное лучепреломление 6-23  
 действующее значение переменного  
 тока 5-19  
 дейтерий 8-2  
 дейтрон 8-4  
 декартовая система координат 1-4  
 декремент затухания 5-13  
 дефект массы 8-3  
 дефекты 2-29  
 деформация 1-17  
 – пластическая 1-17

– относительная 1-18  
 – упругая 1-18  
 джоуль 1-12  
 диаграмма состояния 2-31, 2-32  
 диамагнетика 4-23  
 дивергенция векторного поля 1-31,  
 4-31  
 диод 7-31  
 диоптрия 6-4  
 диполь магнитный 4-5  
 – электрический 3-9, 5-32  
 дислокации 2-29  
 дисперсия аномальная 6-19  
 – нормальная 6-19  
 – света 6-18  
 диссипативная система 1-13  
 диссипативные силы 1-22  
 дисторсия 6-5  
 дифракционная решётка 6-15  
 дифракция 6-12  
 – на пространственной решётке  
 6-16  
 – Фраунгофера 6-14  
 – Френеля 6-13  
 дифференциал функции полный  
 1-28  
 диффузия 2-10  
 дихроизм 6-24  
 диэлектрики 3-13  
 длина волны 5-21  
 – когерентности 6-7  
 – пути 1-4, 6-8  
 – – геометрическая 6-8  
 – – оптическая 6-8  
 – свободного пробега молекул  
 средняя 2-9  
 добротность 5-13  
 доза излучения 8-11  
 домены 3-16, 4-28  
 дырки 7-27

**Ж**

жидкость 1-18  
 – идеальная 1-20  
 – несжимаемая 1-19  
 – перегретая 2-24  
 – переохлаждённая 2-30  
 – реальная 1-20

## 3

**закон** Авогадро 2-4

- Ампера 4-6
- Архимеда 1-19
- Био 6-25
- Био-Савара-Лапласа 4-4
- Бойля-Мариотта 2-3
- Больцмана (равнораспределения) 2-12
- Бугера 6-50
- Видемана-Франца 3-30
- всемирного тяготения 1-23
- Гейгера-Нэттола 8-8
- Гей-Люссака 2-4
- Гука 1-18
- Дальтона 2-4
- Джоуля-Ленца 3-26, 3-30
- Дюлонга и Пти 2-29
- движения центра масс 1-10
- инерции 1-7
- Кирхгофа 6-27
- Кулона 3-2
- Максвелла 2-7
- Малюса 6-22
- Мозли 7-21
- Ньютона первый 1-7
- – второй 1-9
- – третий 1-10
- Ньютона (вязкость) 2-10
- Ома 3-24, 3-27, 3-29
- отражения 5-29, 6-2
- Паскаля 1-19
- полного тока для магнитного поля в веществе 4-25
- преломления 5-30, 6-2
- радиоактивного распада 8-6
- излучения Вина 6-28
- смещения Вина 6-27
- **сохранения** барионного заряда 8-20
- – заряда 3-2
- – импульса 1-10
- – – релятивистского 1-26
- – массовых чисел 8-7
- – момента импульса 1-17
- – механической энергии 1-13
- – электрических зарядов 8-7
- – энергии 1-13, 1-27
- Стефана-Больцмана 6-27
- Фарадея 4-14

- Фика (диффузия) 2-10
- Фурье (теплопроводность) 2-10
- заряд единичный 1-32
- точечный 3-2
- электрический 3-2
- элементарный 3-2
- зеркало Ллойда 6-9
- зеркала Френеля 6-9
- зона валентная 7-26
- проводимости 7-26
- энергетическая 7-26
- зонная теория твёрдых тел 7-25
- зоны Френеля 6-13

## И

- излучательность 6-5
- излучение вынужденное 7-23
- радиоактивное 8-5
- рентгеновское 7-20
- спонтанное 7-23
- тепловое 6-25
- тормозное 7-20
- характеристическое 7-20
- изобара 2-4, 2-15
- изобары 8-3
- изопроекции 2-15
- изотерма 2-3, 2-15
- критическая 2-24
- изотермы реальных газов 2-23
- изотопы 8-2
- изотропность пространства 1-17
- изохора 2-4, 2-15
- импульс 1-9
- релятивистский 1-26
- силы 1-9
- системы 1-11
- инвариантная величина 1-26
- инверсия населённости 7-24
- индуктивность контура 4-16
- инжекция 7-31
- инертность 1-7
- интеграл определённый 1-28
- интервал между событиями 1-26
- интерференция волн 5-24
- света 6-8
- интерферометр 6-12
- ионизация 3-31
- испарение 2-30
- источники поля 1-31, 4-31



## К

камера Вильсона 8-13  
 – ионизационная 8-13  
 – пузырьковая 8-13  
 кандела 1-2, 6-6  
 капилляр 2-27  
 катодолюминесценция 7-29  
 квант 6-28  
 – действия 6-28  
 квантование пространственное 7-15  
 квантовая статистика  
 Бозе-Эйнштейна 7-18  
 – – Ферми-Дирака 7-18  
 квантовое число вращательное 7-22  
 – – главное 7-5, 7-14  
 – – колебательное 7-22  
 – – магнитное 7-15  
 – – орбитальное 7-14  
 – – спиновое 8-4  
 кварк 8-20  
 Кельвин 1-1, 1-22  
 К-захват 8-9  
 килограмм 1-2, 1-9  
 кинематические уравнения  
 движения точки 1-4  
 ковалентные связи 2-28  
 когерентность 5-24, 6-7  
 – временная 6-7  
 – пространственная 6-7  
 колебания 5-2  
 – вынужденные 5-2, 5-14  
 – гармонические 5-2  
 – затухающие 5-12  
 – поляризованные линейно 5-11  
 – – циркулярно 5-11  
 – – эллиптически 5-11  
 – свободные 5-2  
 – собственные 5-2  
 колебательный контур 5-7  
 количество вещества 2-4  
 количество движения 1-9  
 кома 6-5  
 комбинационное рассеяние света  
 7-22  
 компаунд-ядро 8-14  
 конденсация 2-30  
 конденсатор 3-18  
 консервативная система 1-13  
 консервативные силы 1-12, 1-22, 3-6  
 концентрация 2-6

координаты вектора 1-29  
 – полярные 1-6  
 – сферические 7-14  
**коэффициент** затухания 5-12  
 – мощности 5-19  
 – поглощения 6-20  
 – прозрачности потенциального  
 барьера 7-12  
 – Пуассона 1-18, 2-14  
 – размножения нейтронов 8-17  
 – теплопроводности 2-10  
 – трансформации 4-19  
 – холодильный 2-21  
 краевой угол 2-26  
 красная граница фотопроводимости  
 7-29  
 кривые фазового равновесия 2-31  
 кристаллизация 2-30  
 кристаллические тела 2-27  
 кристаллическая решётка 2-27  
 кристаллофосфор 7-30  
 кристаллы атомные 2-28  
 – ионные 2-28  
 – металлические 2-28  
 – молекулярные 2-28  
 критерий Рэлея 6-17  
 критическая точка 2-24, 2-32  
 КПД кругового процесса 2-18  
 – цикла Карно 2-22  
 кюри 8-7

## Л

лавинообразное размножение 3-32,  
 8-17  
 лазер 7-24  
 ламинарное течение 1-21  
 лептоны 8-20  
 линза 6-3  
 – собирающая 6-4  
 – рассеивающая 6-4  
 линия напряжённости  
 электростатического поля 3-4  
 – индукции магнитного поля 4-3  
 – тока жидкости 1-19  
 луч 6-2  
 лучистость 6-5  
 люкс 6-6  
 люмен 6-6  
 люминесценция 6-25  
 люминофор 7-29

**М**

магические ядра 8-5  
 магнетон Бора 3-21  
 – ядерный 8-4  
 магнитная индукция 4-3  
 магнитный момент 4-3  
 – – электронов 4-21  
 – поток 4-11  
 макротоки 4-3  
 масса 1-9  
 – молярная 2-4  
 – покоя протона 1-32, 3-2  
 – – электрона 1-32, 3-2  
 – релятивистская 1-26  
 – фотона 6-31  
 материальная точка 1-3  
 маятник математический 5-5  
 – пружинный 5-5  
 – физический 5-6  
 междуузельный атом 2-29  
 мезоны 8-20  
 мениск 2-26  
 метод векторных диаграмм 5-3, 5-9  
 – статистический 2-2  
 – термодинамический 2-2  
 – Юнга 6-9  
 – определения вязкости Пуазейля  
   1-22  
 – – – Стокса 1-22  
 метр 1-2  
 микротоки 4-3  
 модуль упругости 1-18  
 – Юнга 1-18  
 молекула 2-2  
 молекулярный объем 2-4  
 моль 1-2, 2-4  
 монокристалл 2-27  
 момент диполя электрический 3-10  
 – импульса 1-16  
 – – электрона механический 4-22  
 – – – магнитный 4-21  
 – инерции 1-14  
 – – главный 1-14  
 – силы 1-15  
 мощность 1-12  
 – электрического постоянного тока  
   3-25  
 – – тока активная 5-19  
 мюон 8-20

**Н**

намагниченность 4-24  
 – остаточная 4-27  
 направление магнитного поля 4-1  
 – электрического поля 3-4  
 напряжение на концах участка цепи  
   3-24  
 – упругое 1-18  
 напряжённость поля 1-23  
 – – магнитного 4-4  
 – – электростатического 3-4  
 набла-оператор 1-23, 1-30  
 начало термодинамики первое 2-12  
 – – второе 2-20  
 – – третье 2-20  
 невесомость 1-11  
 нейтрино 8-9, 8-20  
 нейтрон 8-2, 8-20  
 неравенство Клаузиуса 2-19  
 нормальные условия 2-3  
 нуклид 8-2  
 нуклон 8-2  
 ньютон 1-8  
 Ньютона первый закон 1-7  
 – второй закон 1-9  
 – кольца 6-10  
 – третий закон 1-10

**О**

облучённость 6-6  
 объёмная плотность энергии 3-20  
 однородность времени 1-13  
 – пространства 1-10  
 ом 3-24  
 оператор Гамильтона 1-23, 1-30  
 – Лапласа 1-31  
 оптика 6-2  
 – волновая 6-2  
 – геометрическая 6-2  
 – квантовая 6-2  
 оптическая ось 6-3  
 – – кристалла 6-23  
 – сила линзы 6-4  
 оптический резонатор 7-24  
 – центр линзы 6-3  
**опыт** Боте 6-31  
 – Ламмерта 2-9  
 – Резерфорда 7-2  
 – Штерна 2-9

**опыт** Штерна и Герлаха 7-16

– Фарадея 4-13

– Франка и Герца 7-4

орт 1-29

освещённость 6-6

основной закон динамики

    вращательного движения 1-16

– – – поступательного движения 1-9

– – – релятивистской 1-27

ось вращения 1-3

осциллятор гармонический 5-4

– квантовый 7-13

## П

пар 2-24

– насыщенный 2-24, 2-30

– пересыщенный 2-24

параксиальный пучок 6-3

парамагнетики 4-23

параметр деления 8-16

парообразование 2-30

паскаль 1-19

перемещение 1-4

– угловое 1-6

*p-n*-переход 7-30

период вращения 1-7

– колебаний 5-2

– полураспада 8-7

периодическая система элементов

    (Д.И. Менделеева) 7-20, 7-32

плавление 2-30

плечо диполя 3-9

– силы 1-16

плотность 1-9

– вероятности 7-8

– электрических зарядов линейная  
    3-3

– – – поверхностная 3-3

– – – объёмная 3-3

– электрического тока 3-22

поверхностное натяжение 2-25

поглощение света 6-20

позитрон 8-6, 8-7

показатель преломления 5-29

– – абсолютный 6-2

– – относительный 6-2

**поле** 1-8

– векторное 1-29

– вихревое 4-10

– однородное 3-10

– потенциальное 1-22, 3-6

– самосогласованное 7-25

– скалярное 1-29

– соленоидальное 4-10

– стационарное 1-8

поликристалл 2-27

полимеры 2-28

политропа 2-17

полное отражение 6-2

полосы равного наклона 6-10

– равной толщины 6-11

полупроводники 7-26

– собственные 7-27

– примесные 7-27

поляризатор 6-22

поляризация диэлектрика 3-14

– света 6-21

поляризованность 3-14

поляроид 6-24

**постоянная** Больцмана 1-32, 3-29

– Вина 6-27

– гравитационная 1-23, 1-32

– магнитная 1-32, 4-4, 4-6

– Планка 1-32, 6-28

– распада 8-6

– Ридберга 7-3

– Стефана-Больцмана 1-32, 6-27

– электрическая 1-32, 3-3

постулаты Бора 7-3

потенциал поля 1-24

– – тяготения 1-24

– электростатического поля 3-7

потенциальная яма 7-10

потенциальное поле 1-22

поток вектора напряжённости

    электростатического поля 3-4

– – магнитной индукции 4-11

– жидкости 1-19

– излучения 6-5

– поля через поверхность 1-30

потокосцепление 4-12

– взаимной индукции 4-12

– самоиндукции 4-12

правила отбора 7-13, 7-16, 7-22

**правило** Кирхгофа 3-28

– левой руки 4-6

– Ленца 4-14

– правого винта 1-7, 4-2

– сложения скоростей в  
    классической механике 1-25

**правило** сложения скоростей в релятивистской механике 1-26

- смещения 8-7
- Стокса 7-29

преобразования координат Галилея 1-24

- – Лоренца 1-25

прецессия 4-22

приведённая длина физического маятника 5-6

призма Николя 6-24

примесь 2-29

- внедрения 2-29
- замещения 2-29

**принцип** возрастания энтропии 2-20

- Гюйгенса 6-6
- Гюйгенса-Френеля 6-12
- кварк-лептонной симметрии 8-20
- независимости действия сил 1-10
- неразличимости тождественных частиц 7-17
- относительности Галилея 1-25
- – Эйнштейна 1-25
- Паули 7-19
- причинности в классической механике 1-9
- суперпозиции волн 5-23
- – потенциалов 3-8
- – электростатических полей 3-5
- – магнитных полей 4-4

пробег частицы 8-8

проводимость дырочная 7-27

- примесная 7-27
- собственная 7-27
- электронная 7-27

производная по направлению 1-29

- по объёму 1-30
- функция 1-27

проницаемость диэлектрическая 3-3, 3-15

- магнитная 4-4, 4-25

просветление оптики 6-11

протий 8-2

протон 3-2, 8-2, 8-20

**процесс** адиабатический 2-16

- изобарный 2-4, 2-15
- изотермический 2-15
- изохорный 2-4, 2-15
- изоэнтروпийный 2-19
- круговой (цикл) 2-17

- необратимый 2-18
- обратимый 2-18
- политропический 2-17
- равновесный 2-13

псевдовектор 1-6

пучности стоячей волны 5-25

пьезоэлектрики 3-17

пьезоэффект 3-17

## Р

**работа** 1-12

- выхода электронов 3-31
- газа в адиабатическом процессе 2-16
- газа при расширении 2-13
- за цикл 2-17
- расширения 2-17
- сжатия 2-17
- силы 1-12
- электрического тока 3-26

равновесные процессы 2-13

радиан 1-2

радиоактивность 8-5

- естественная 8-5
- искусственная 8-5

радиоактивное семейство 8-8

радиоактивный распад 8-6

радиолюминесценция 7-29

радиус-вектор 1-4

радиус когерентности 6-7

- молекулярного действия 2-25

разность потенциалов 3-8

- хода 5-24

разрешающая способность 6-17

разряд газовый 3-31

- дуговой 3-32
- искровой 3-32
- коронный 3-32
- тлеющий 3-32

распределение Больцмана 2-8, 7-18

- Бозе-Эйнштейна 7-18
- Максвелла-Больцмана 7-19
- Ферми-Дирака 7-18

реакции связей 1-9

резонанс 5-16

- напряжений 5-18
- токов 5-19

рекомбинация 3-31

рентген 8-11

рентгенолюминесценция 7-29

релятивистская динамика 1-27  
 ротор векторного поля 1-31, 4-31

## С

самоиндукция 4-17

секунда 1-2

**серия** Бальмера 7-3

– Брэкета 7-3

– Лаймана 7-3

– Пашена 7-3

– Пфунда 7-3

– Хэмфри 7-3

сверхтонкая структура 8-4

свет естественный 6-21

– плоскополяризованный 6-22

– поляризованный 6-21

– циркулярно поляризованный 6-22

– эллиптически поляризованный  
6-22

светимость 6-5, 6-6

световой поток 6-6

связи 1-9

сегнетоэлектрики 3-17

средняя длина свободного пробега  
молекул 2-8

**сила** 1-8

– активная 1-9

– внешняя 1-8

– внутреннего трения 1-21

– внутренняя 1-8

– диссипативная 1-22

– консервативная 1-12, 1-22, 3-6

– коэрцитивная 4-27

– Лоренца 4-7

– межмолекулярного

взаимодействия 2-22

– нормального давления 1-11

– обменные 4-28

– пондеромоторная 3-21

– равнодействующая 1-8

– результирующая 1-8

– света 6-5, 6-6

– сторонняя 3-22

– тока 3-21

– трения скольжения 1-11

– тяжести 1-11

– упругости 1-11

– центральная 1-8

– центростремительная 1-10

– электродвижущая 3-23

сименс 3-24

**система** единиц 1-2

– диссипативная 1-13

– замкнутая 1-8, 2-2

– изолированная 1-8

– консервативная 1-13

– координат 1-4

– механическая 1-8

– отсчёта 1-4

– – инерциальная 1-8

– термодинамическая 2-2

– уравнений Максвелла 4-28

скалярное поле 1-29

скалярное произведение векторов  
1-29

скин-эффект 4-16

**скорость** 1-5

– групповая 5-23

– космическая 1-24

– мгновенная 1-5

– наиболее вероятная молекул  
идеального газа 2-8

– средняя 1-5

– – квадратичная 2-7

– – молекулы газа 2-8

– угловая 1-7

– фазовая 5-22

смачивание 2-26

смещение электрическое 3-15

собственные значения 7-10

– функции 7-10

соленоид 4-10

соотношение неопределённостей  
Гейзенберга 7-7

сопротивление волновое 5-9

– полное 5-18

– реактивное ёмкостное 5-18

– – индуктивное 5-17

– электрическое 3-24

состояния стационарные 7-3

спектр линейчатый 6-21

– молекулярный 7-21

– сплошной 6-21

спин электрона 4-22, 7-16

спин ядра 8-4

спонтанное деление ядер 8-16

степени свободы 2-11

стерадиан 1-3

стоки поля 1-31, 4-32

стоксовый спутник 7-23

сублимация 2-30  
 сфера молекулярного действия 2-25  
 сцинтиллятор 8-13  
 счётчик газоразрядный 8-13  
 – ионизационный 8-13  
 – полупроводниковый 8-13  
 – сцинтилляционный 8-13

## Т

тело отсчёта 1-4  
 – несвободное 1-8  
 – рабочее теплового двигателя 2-21  
 – свободное 1-8  
 температура 2-3  
 – критическая 2-24  
 – термодинамическая 2-3  
 температурный коэффициент сопротивления 3-25  
**теорема** Гаусса для магнитного поля в вакууме 4-12  
 – – – электростатического поля в вакууме 3-6  
 – – – – в диэлектрике 3-16  
 – Карно 2-21  
 – Лармора 4-22  
 – Нернста-Планка 2-20  
 – о циркуляции вектора напряжённости магнитного поля 4-25  
 – – – – – обобщённая 4-30  
 – – – магнитного поля в вакууме 4-10  
 – – – электрического поля в вакууме 3-7  
 – Стокса 1-31  
 – Штейнера 1-15  
 тепловое излучение 6-25  
 тепловой двигатель 2-18, 2-21  
 теплоёмкость 2-13  
 – молярная 2-13  
 – при постоянном давлении 2-14  
 – – – объёме 2-14  
 – твёрдых тел 2-29  
 – удельная 2-13  
 теплопроводность 2-10  
 термодинамическая шкала температур 2-5  
 термодинамические параметры 2-2  
 термодинамический процесс 2-2  
 термодинамическое равновесие 2-3

термостат 2-21  
 термоядерные реакции синтеза 8-19  
 – циклы 8-19  
 тесла 4-7  
 течение жидкости 1-19  
 – – стационарное 1-20  
 – – установившееся 1-20  
 ток вихревой Фуко 4-16  
 – насыщения 3-32  
 – переменный 5-16  
 – постоянный 3-21  
 – смещения 4-29  
 – электрический 3-21  
 тороид 4-11  
 точка Кюри 3-17, 4-27  
 – Нееля 4-28  
 транзистор 7-31  
 трансформатор 4-19  
 траектория 1-4  
 триболоминесценция 7-29  
 тритий 8-2  
 тройная точка 2-31  
 трубка тока жидкости 1-19  
 туннельный эффект 7-11  
 турбулентное течение 1-21

## У

угол Брюстера 5-31, 6-23  
 – отражения 5-29, 6-2  
 – падения 5-29, 6-2  
 – предельный 6-3  
 – преломления 5-29, 6-2  
 – скольжения 6-17  
 удар 1-14  
 – абсолютно неупругий 1-14  
 – – упругий 1-14  
 – центральный 1-14  
 – – прямой 1-14  
 удельная тепловая мощность тока 3-26  
 – теплота плавления 2-30  
 – электрическая проводимость 3-24  
 удельное электрическое сопротивление 3-24  
 удельный заряд электрона 4-22  
 узлы стоячей волны 5-25  
 универсальная газовая постоянная 1-32, 2-5  
 упругость 1-11  
**уравнение** Бернулли 1-20

- Ван-дер-Ваальса 2-23
- волновое 5-23
- вынужденных колебаний 5-15
- гармонических колебаний 5-3
- Клапейрона-Клаузиуса 5-32
- Майера 2-14
- Максвелла 4-30
- Менделеева-Клапейрона 2-5
- молекулярно-кинетической теории  
идеальных газов основное 2-6
- неразрывности 1-19
- плоской волны 5-22
- Пуассона 2-16
- состояния идеального газа 2-5
- стоячей волны 5-25
- уравнение Шредингера 7-9
- Эйнштейна для внешнего  
фотоэффекта 6-30
- уровень акцепторный 7-28
- донорный 7-28
- примесный 7-27
- ускорение 1-5
- среднее 1-5
- мгновенное 1-5
- нормальное 1-6
- полное 1-6
- тангенциальное 1-6
- угловое 1-7
- условие интерференционного  
максимума 6-8
- – минимума 6-8

## Ф

- фаза 2-24, 2-31
- колебания 5-2
- фазовый переход 2-31
- – первого рода 2-31
- – второго рода 2-31
- фарад 3-3, 3-18
- Фейнмана диаграммы 8-20
- фермионы 7-17
- ферромагнетики 4-26
- фигуры Лиссажу 5-11
- физические законы 1-2
- модели 1-3
- флуоресценция 7-29
- фокальная плоскость 6-2
- фокус линзы 6-3
- фокусное расстояние 6-4
- формула** Бальмера 7-3

- барометрическая 2-8
- Больцмана 2-20
- Вина 6-27
- Вульфа-Брэггов 6-17
- Гаусса-Остроградского 1-31
- де Бройля 7-6
- Лапласа 2-26
- Лоренца 4-8
- Планка 6-28
- Рэлея-Джинса 6-27
- Томсона 5-9
- тонкой линзы 6-4
- Френеля 5-30
- фосфоресценция 7-29
- фотолюминесценция 7-29
- фотометрия 6-5
- фотон 6-30, 8-20
- виртуальный 8-20
- фотопроводимость примесная 7-28
- собственная 7-28
- фото-ЭДС 6-29
- фотоэффект 6-29
- вентильный 6-29
- внешний 6-29
- внутренний 6-29
- ядерный 8-11
- фундаментальные взаимодействия  
8-19
- функция Кирхгофа универсальная  
6-27
- Фурье разложение 5-10

## Х

- хемилюминесценция 7-29
- химический потенциал 7-18
- холодильная машина 2-18, 2-21
- хроматическая абберация 6-5

## Ц

- центр инерции 1-10
- качаний 5-6
- кристаллизации 2-30
- масс 1-10
- цепная реакция 8-17
- цикл 2-17
- Карно 2-22
- обратный 2-18
- цикл** прямой 2-18
- циркуляция 1-31

- вектора напряжённости электростатического поля 3-6
- – индукции магнитного поля 4-10
- цуг волн 6-7

## Ч

- частота вращения 1-7
- колебаний 5-3
- круговая 5-2
- циклическая 5-2
- частная производная 1-28
- число** Авогадро 1-32, 2-4
- зарядовое 8-2
- Лошмидта 2-6
- массовое 8-2
- Рейнольдса 1-21
- степеней свободы 2-11

## Ш

- шкала Кельвина 2-3
- Цельсия 2-3
- электромагнитных волн 5-32
- Штейнера теорема 1-15

## Э

- ЭДС 3-23
- самоиндукции 4-17
- электромагнитной индукции 4-14
- Эйнштейна постулаты 1-25
- эквипотенциальные поверхности 3-9
- экзотермические реакции 8-14
- экстратоки самоиндукции 4-18
- экситон 7-29
- электродвигатель 4-16
- электроёмкость 3-18
- конденсатора 3-18
- электрон 3-2, 8-20
- оптический 6-19
- элементарная работа силы 1-12
- элементарные частицы 8-20
- эмиссия автоэлектронная 3-31
- вторичная электронная 3-31
- термоэлектронная 3-31
- фотоэлектронная 3-31
- эндотермические реакции 8-14
- энергия** 1-12
- внутренняя 2-11
- Гельмгольца 2-19

- заряженного конденсатора 3-20
- – проводника 3-20
- ионизации 3-31, 7-5
- кинетическая 1-12, 1-27
- – вращения 1-15
- заряда потенциальная 3-7
- магнитного поля 4-20
- молекулы средняя 2-7, 2-12
- отдачи ядра 8-12
- поверхностная 2-25
- покоя 1-27
- потенциальная 1-13
- релятивистской частицы 1-27
- свободная 2-19
- связи ядра 8-3
- системы зарядов 3-19
- – полная механическая 1-13
- тела полная 1-27
- электромагнитных волн 5-31
- электростатического поля 3-20
- энтропия 2-18
- эффект** диамагнитный 4-23
- Доплера 5-26
- Зеемана 7-15
- Керра 6-24
- Комптона 6-32
- Коттона-Мутона 6-24
- Мёссбауэра 8-12
- парамагнитный 4-23
- Рамана 7-22
- Фарадея 6-25
- Холла 4-9
- Штарка 7-15
- эффективный диаметр молекулы 2-9

## Я

- явление электромагнитной индукции 4-14
- явления капиллярные 2-27
- переноса 2-9
- ядерные фотоэмульсии 8-13
- реакторы 8-18
- ядро атома 7-2, 8-2
- дочернее 8-6
- материнское 8-6
- яркость 6-5, 6-6
- ячейка Керра 6-24



## Содержание

<b>Строение и важнейшие свойства ядер</b>	2	15. Приборы для регистрации радиоактивных излучений и частиц	13
1. Атомные ядра и их описание	2	16. Ядерные реакции и их основные типы	13
2. Дефект массы и энергия связи ядра	3	17. Ядерные реакции под действием нейтронов	15
3. Спин ядра и его магнитный момент	4	18. Реакции деления ядра	16
4. Свойства ядерных сил	4	19. Цепная реакция деления	17
5. Модели атомного ядра	5	20. Ядерные реакторы	17
6. Радиоактивное излучение и его виды	5	21. Реакция синтеза атомных ядер	18
7. Закон радиоактивного распада	6	<b>Дополнение</b>	19
8. Правила смещения	7	22. Фундаментальные взаимодействия	19
9. Альфа-распад	8	23. Элементарные частицы	20
10. Бета-распад	9	<b>Сводная таблица элементарных частиц</b>	21
11. Античастицы и их аннигиляция	10	<b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ</b>	22
12. Гамма-излучение	10		
13. Дозиметрические величины и единицы	11		
14. Эффект Мёссбауэра	12		

Учебное пособие «*Физика для студентов*» в восьми частях было составлено в декабре 2000 года в виде конспекта лекций по курсу физики для студентов Харьковской Академии железнодорожного транспорта. Эти «*Лекции по физике*» в формате pdf-файлов были впервые выложены в сеть в 2002 году и с тех пор несколько раз редактировались с сохранением общей структуры восьми 32-страничных брошюр-буклетов, предназначенных для распечатки на принтере (файлы *-bk*).

По просьбе студентов в 2013 году «*Физика для студентов*» была переформатирована для чтения с монитора (файлы *-disp*), а в 2016 году – для чтения с планшета или телефона (файлы *-pad*). Кроме того, в редакции 2016 года большинство иллюстраций были переоформлены с использованием цветной векторной графики.

Конечно же, «*Outline of Physics for Students*» не может заменить учебник, но опыт последних десятилетий показал, что «*Физика для студентов*» всё ещё востребована в качестве «спасательного круга» при подготовке к экзаменам по курсу общей физики любой степени сложности.

*Александр Николаевич Огурцов*  
(д.ф.-м.н., профессор)