

Министерство образования и науки Украины
Одесский национальный политехнический университет

Конспект лекций
Элементы физики атомного ядра
и элементарных частиц

Одесса – 2001

Министерство образования и науки Украины
Одесский национальный политехнический университет

Конспект лекций
Элементы физики атомного ядра
и элементарных частиц

Утверждено
на заседании кафедры
физики ОНПУ

Одесса – 2001

Конспект лекций «Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц». Для студентов всех специальностей, изучающих физику / Сост.: Куценко А.Н., Анисимов В.А. – Одесса, ОНПУ, 2001 – 41 с

Составители: Куценко А.Н., проф.
Анисимов В.А., доц.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
1. ВВЕДЕНИЕ	4
1.1. Классификация физических процессов и явлений	4
1.2. Единицы физических величин	5
2. Заряд атомного ядра. Зарядовое и массовое числа. Момент импульса ядра и его магнитный момент. Взаимодействие нуклонов и понятие о природе ядерных сил	6
3. Дефект массы и энергия связи ядра	7
4. Закономерности и происхождение α -, β - и γ - излучения атомных ядер	8
4.1. Явление радиоактивности	8
4.2. Закон радиоактивного распада	10
4.3. Закон смещения К.Фаянса – Ф.Содди	11
4.4. Радиоактивные семейства. Активность радионуклида	11
4.5. α -радиоактивный распад	12
4.6. β -радиоактивный распад	13
4.7. γ -излучение (жесткое электромагнитное излучение)	14
5. Ядерные реакции	16
6. Реакция деления ядра. Цепная реакция деления. Понятие о ядерной энергетике	20
7. Реакция синтеза атомных ядер. Проблема управляемых термоядерных реакций.	23
8. Элементарные частицы. Их классификация и взаимная превращаемость. Основные типы взаимодействий.	23
8.1. Понятие элементарных частиц.	23
8.2. “Зоопарк” элементарных частиц. Типы взаимодействий.	25
8.3. Полуфеноменологическая систематика частиц.	27
8.4. Законы сохранения в физике.	27
8.5. Классификация частиц. Фундаментальные частицы.	28
8.6. Модель кварков	29
8.7. Нейтрино	31
8.8. Значение физики элементарных частиц.	32
Заключение	33

Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц

1. ВВЕДЕНИЕ

1.1. Классификация физических процессов и явлений

Основными классификационными признаками физических процессов и явлений могут служить характерные для них скорости (энергии) или масштабы. Учет динамики процесса требует рассмотрения типа взаимодействий. Каждому признаку должны отвечать свои фундаментальные константы, не выводимые на теперешнем уровне знаний ни из каких теоретических схем.

По скорости физические процессы условно классифицируются следующим образом:

- $x \sim c$ (или $E_k \geq mc^2$) – процессы относят к релятивистским;

- $x \ll c$ ($E_k \ll mc^2$) - процессы относят к нерелятивистским.

Фундаментальной константой является скорость света в вакууме $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с. В предельном случае (что реально отвечает рассмотрению медленных движений $x \ll c$) релятивистская механика содержит ньютоновскую (частное выражение принципа соответствия).

В заданной системе отсчета $x_{\min} = 0$, $x_{\max} = c$, $E_{k \min} = 0$. Максимальная энергия протонов, достигнутая в лаборатории $\sim 10^{12}$ эВ = 1 ТэВ, максимальная энергия частиц в космических лучах $\sim 10^{20}$ эВ.

Существует ли в природе предельная энергия (предельная температура), в настоящее время неизвестно, но в некоторых теоретических схемах допускается такая возможность.

По характерным масштабам R , т.е. по типичным размерам объектов или расстояниям между ними, процессы условно классифицируются следующим образом:

- $R \geq 100$ млн. св.лет – мегамир, его свойства и эволюция изучаются космологией;

- $R \sim$ “обычных” размеров – макромир – предмет макроскопической физики;

- $R \leq 10^{-8}$ м (размер типичной молекулы) – микромир – изучается квантовой физикой.

Микромир обладает “тонкой структурой”:

- $10^{-8} \div 10^{-10}$ м – мир молекулярной и атомной физики;

- 10^{-15} м – ядерная физика (физика частиц низких энергий);

- $10^{-15} \div 10^{-18}$ м – современная физика высоких энергий;

- 10^{-18} м – субмикромир (возможно здесь теряют смысл обычные пространственно-временные концепции, например, существует фундаментальная длина, а пространство и время становятся квантованными).

Данному классификационному признаку отвечает постоянная Планка

$$\hbar \approx 1 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

В предельном случае $\hbar \rightarrow 0$ квантовая теория воспроизводит результаты классической физики.

Минимальные расстояния, доступные современной физике, $R \sim 10^{-18}$ м. Максимальные расстояния, которыми оперируют астрономы, $R \sim 10^{26}$ м (10 млрд. св.лет). Таковы размеры видимой части Вселенной, если только считать, что она замкнута.

Деление характерного масштаба на характерную скорость дает характерное время.

Минимальное время $T_{\min} \sim 10^{-26}$ с. Времена жизни наименее стабильных частиц, регистрируемых в лаборатории $\sim 10^{-24}$ с. $T_{\max} \sim 10^{18}$ с (10 млрд. лет) – сопоставляется возрасту Вселенной.

1.2. Единицы физических величин

Международная система единиц может использоваться в ядерной физике, но не всегда является удобной. Поэтому используется ряд специфических единиц и систем единиц. Остановимся кратко на основных из них.

Иногда вместо электрического заряда вводится величина $q^* = q (4\pi\epsilon_0)^{-1/2}$, также называемая для краткости зарядом и удобная для проведения ряда оценочных расчетов. В этом случае элементарный заряд заменяется величиной

$$e^* \approx 1,52 \cdot 10^{-14} \text{ кг}^{1/2} \text{ м}^{3/2} \text{ с}^{-1}$$

В качестве единиц длины и площади используются:

$$1 \text{ фм} = 10^{-15} \text{ м} \quad \text{и} \quad 1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2$$

(фемто – дат. femten - пятнадцать).

За единицу энергии принят мегаэлектронвольт:

$$1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$$

Массы элементарных частиц обычно выражаются в МэВ/c² (с – скорость света). Для краткости c² опускают, измеряя массы элементарных частиц непосредственно в мегаэлектронвольтах:

$$m_e \approx 0,51 \text{ МэВ}, \quad m_p \approx 938 \text{ МэВ}$$

Импульсы элементарных частиц измеряют в МэВ/c или ГэВ/c. Разумеется, и здесь с можно опустить и измерять импульс в энергетических единицах.

При анализе превращений частиц при высоких энергиях удобной является релятивистская система единиц, в которой c=1. Переход к ней осуществляется переопределением основных величин

$$\begin{matrix} \sim & x & \sim & & \sim & & \sim \\ ct = t, & \frac{x}{c} = x, & mc^2 \approx m, & pc = p \end{matrix}$$

Время измеряется в метрах (это время, за которое свет проходит расстояние в 1м – “световой метр” - аналог “светового года” в астрономии), скорость безразмерна и всегда меньше единицы, масса и энергия измеряются в энергетических единицах. Основные формулы в этой системе принимают вид

$$E = m_0 (1-x^2)^{-1/2}, \quad p = m_0 x (1-x^2)^{-1/2}, \quad E^2 = p^2 + m^2,$$

причем для краткости письма тильда “~” над соответствующими величинами опускается.

В атомной физике иногда используется “квантовая система единиц”, в которой $\hbar = 1$. В этой системе вместо формул $E = \hbar\omega$ и $p = \hbar k$ появляются формулы $E = \omega$, $p = k$ (энергия численно совпадает с частотой и измеряется в с⁻¹, а импульс – с волновым вектором k измеряется в м⁻¹).

В физике высоких энергий общепринятой является естественная система единиц, в которой $c = \hbar = 1$.

В этой системе единицы всех физических величин выражаются через степени единицы длины

$$[m] = [E] = [p] = [l^{-1}] = [t^{-1}]$$

Элементарный заряд

$$e^* \approx (137)^{-1/2} \approx 0,085.$$

**2. Заряд атомного ядра. Зарядовое и массовое числа.
Момент импульса ядра и его магнитный момент.
Взаимодействие нуклонов и понятие о природе ядерных сил**

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

Все атомные ядра состоят из элементарных частиц протонов и нейтронов, которые считаются двумя зарядовыми состояниями одной частицы – нуклона.

(протон $1p$ гр. рсщфт - первый, нейтрон $1n$ - англ. neutron от лат. neuter - ни тот, ни другой, нуклон – лат. nucleus ядро).

Протонно-нейтронная модель была предложена в 1932г. Д.Д.Иваненко, Е.Н.Гапоном, В.Гейзенбергом.

Зарядом ядра называется величина Ze , где e - величина заряда протона, Z - зарядовое число, равное порядковому номеру химического элемента в таблице Менделеева (числу протонов в ядре).

В настоящее время известны ядра с Z от 1 до 109.

Обозначим число нейтронов через N . Для большинства ядер $N \geq Z$, для легких ядер $NZ-1 \approx 1$, для тяжелых ядер $NZ-1 \approx 1,6$.

Число нуклонов в ядре $A = N + Z$ называется массовым числом. Нуклонам приписывается массовое число, равное единице, электрону – нулю.

Ядра с одинаковыми Z , но разными A называются изотопами ($1H$, $2D$, $3T$, ...). Ядра, которые при одинаковом A имеют различные Z , называются изобарами. (изотопы – гр. Яупт - равный, фърпт - место; изобары – гр. Яупт и гр. вбсэт - тяжёлый).

Ядро химического элемента обозначается AZX , где X – символ химического элемента.

В природе встречается порядка 300 устойчивых изотопов химических элементов, около 1000 радиоактивных изотопов получены искусственно. Элементы с номерами $Z > 92$ также получены искусственно. Большинство из них названо по имени выдающихся ученых, например, $25299Es$ - эйнштейний, $257100Fm$ - фермий, $258101Md$ - менделевий, $261104Sg$ - сиборгий, $262107Bo$ - борий; $259102No$ - нобелий (жолитий).

Размер ядра характеризуется радиусом ядра, имеющим условный смысл ввиду размытости границы ядра. Он может быть оценен по следующей эмпирической формуле

$$R = R_0 A^{1/3}, \quad (1)$$

где $R_0 = (1,3 \div 1,7) \cdot 10^{-15}$ м
(гр. Эмрейспт - опытный).

Объем ядра, как это следует из (II-1), пропорционален числу нуклонов. Плотность ядерного вещества $\rho \sim 10^{17}$ кг/м³.

Нуклоны в атомных ядрах являются фермионами и имеют спин $\hbar/2$. Собственный момент импульса ядра – спин ядра равен

$$L_{яд} = \sqrt{I(I+1)} \hbar, \quad (2)$$

где I - внутреннее полное спиновое квантовое число

$$I = 0, 1/2, 1, 3/2, 2, \dots$$

Ядра с четными A имеют целочисленный спин (в единицах \hbar) и подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна (бозоны). Ядра с нечетными A имеют полуцелый спин и подчиняются статистике Ферми-Дирака (фермионы).

Ядерные частицы имеют собственные магнитные моменты, которые определяют магнитный момент ядра.

Единицей измерения магнитных моментов служит ядерный магнетон:

$$\mu_{яд} = \frac{e \hbar}{2mp}, \quad (3)$$

где m_p - масса протона.

Проекция спинового магнитного момента электрона μ_B на направление магнитного поля называется магнетоном Бора:

$$\pm \mu_B = \pm \frac{e \hbar}{2m_e} . \quad (4)$$

Сравнивая (3) и (4), получим:

$$\mu_B m_p^{-1} = m_p m_e^{-1} = 1836,5. \quad (5)$$

Следовательно, магнитные свойства атомов определяются магнитными свойствами электронов.

Ядерное взаимодействие свидетельствует о существовании особых ядерных сил, не сводящихся к гравитационным и электромагнитным. Радиус их действия (1,5÷2,2) фм, они не являются центральными. Ядерные силы обнаруживают зарядовую независимость: притяжение между двумя нуклонами одинаково и не зависит от зарядового состояния (протонного или нейтронного). Они обладают насыщенностью, которая проявляется в том, что нуклон в ядре взаимодействует лишь с ограниченным числом ближайших к нему нуклонов. Предполагается, что взаимодействие между двумя нуклонами осуществляется с помощью третьей частицы π – мезона (пиона), т.е. эти силы носят обменный характер (гр. мЭупт - средний). Существуют три типа π - мезонов: π^+ , π^- , π^0 .

Электронная оболочка атома является сравнительно “рыхлой” (энергия связи электрона в атоме ~ 10 эВ) и легко может перестраиваться. Электронная оболочка ответственна за химические и многие физические (например, оптические) свойства вещества. Исчерпывающее описание свойства электронной оболочки дала квантовая механика.

В настоящее время принципиальная правильность планетарной модели атома и протонно-нейтронной модели ядра не вызывает ни малейших сомнений.

3. Дефект массы и энергия связи ядра

Энергия, которую нужно затратить для удаления нуклона из ядра без сообщения ему кинетической энергии, называется энергией связи нуклона.

Энергия, которую нужно затратить, чтобы расщепить ядро на составляющие его нуклоны без придания им кинетической энергии, называется энергией связи ядра.

Из закона сохранения энергии следует, что при образовании ядра должна выделяться такая же энергия, какую нужно затратить при расщеплении ядра на составляющие его нуклоны.

При образовании ядра происходит уменьшение его массы. Масса ядра

$$M_{\text{яд}} < \sum_{i=1}^A M_i$$

Если ядро массой $M_{\text{яд}}$ образовано из Z протонов m_p и $(A-Z)$ нейтронов m_n , то величина

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z) m_n - M_{\text{яд}} \quad (6)$$

называется дефектом массы.

Удобнее величину Δm выразить через атомную массу $M_{\text{ат}}$ и массу атома водорода m_H :

$$\Delta m = Zm_H + (A - Z) m_n - M_{\text{ат}} , \quad (7)$$

$$E_{\text{св}} = \Delta m c^2 . \quad (8)$$

Удельной энергией связи называется энергия связи, приходящаяся на один нуклон

$$\Delta W_{\text{св}} = \frac{E_{\text{св}}}{A} = \frac{\Delta mc^2}{A} \quad (9)$$

При расчетах Δm массы всех частиц часто измеряется в атомных единицах массы (1/12 часть массы изотопа углерода ^{12}C)

$$1 \text{ а.е.м.} = \frac{10^{-3} \text{ кг моль}^{-1}}{6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 1,66057531(11) \cdot 10^{-27} \text{ кг} \quad (10)$$

Приведем значения масс некоторых частиц и атомов:

$$\begin{aligned} m_p &= 1,0072765 \text{ а.е.м.} \\ m_n &= 1,00867 \text{ а.е.м.} \\ m_{^1\text{H}} &= 1,00783 \text{ а.е.м.} \\ m_{^2\text{H}} &= 2,01410 \text{ а.е.м.} \\ m_{^3\text{H}} &= 3,01605 \text{ а.е.м.} \\ m_{^4\text{He}} &= 4,00260 \text{ а.е.м.} \\ m_{^7\text{Li}} &= 7,01601 \text{ а.е.м.} \end{aligned} \quad (11)$$

Одной атомной единице массы соответствует атомная единица энергии

$$1 \text{ а.е.э.} = 931,5016 \text{ МэВ}; 1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Задача 3.1. Найти удельную энергию связи $\Delta W_{\text{св}}$ в ядрах ^1H , ^4He , ^7Li , ^9Be , ^{11}B , ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O .

Решение:

Решим для лития:

$$\Delta W_{\text{свLi}} = \frac{3 m_{^1\text{H}} + 4 m_n - M_{^7\text{Li}}}{7} c^2 = \frac{3 \cdot 1,00783 + 4 \cdot 1,00867 - 7,01601}{7} \cdot 931,5 = 6,50 \text{ МэВ}$$

4. Закономерности и происхождение α -, β - и γ - излучения атомных ядер

4.1. Явление радиоактивности

Явление радиоактивности впервые наблюдалось в 1843 году французским химиком Аделем Ньепсом де Сен-Виктором (племянником изобретателя фотографии Nicéphore Niépce).

Вторично было открыто в 1896 году французским физиком Анри Беккерелем (Нобелевская премия 1903 совместно с П.Кюри и М.Складовской-Кюри), изучавшим люминесценцию солей урана. Это явление заключается в превращении неустойчивых изотопов одного химического элемента в изотопы другого элемента, сопровождающееся испусканием некоторых частиц. Радиоактивностью считается и превращение одних элементарных частиц в другие, например, нейтрона в протон. В 1898 году Пьер и Мария Кюри открыли еще два радиоактивных элемента ^{226}Ra и ^{210}Po . Радиоактивность, наблюдающаяся у существующих в природе неустойчивых изотопов, называется естественной. В природе имеются первичные радиоактивные элементы ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{235}U и вторичные радиоактивные элементы ^3H , ^{14}C .

Радиоактивность изотопов, полученных в результате ядерных реакций, называется искусственной (их более 103). Интенсивность радиоактивного излучения пропорциональная концентрации вещества и не зависит от внешних условий (Т, р, Е, Н). Анализ состава излучения производился М.Кюри, Э.Резерфордом, Дж.Ройдсом, П.У.Виллардом в 1897-1900гг.

На рис. 1 представлена схема разделения радиоактивных лучей на 3 части - α (ядра ${}^4_2\text{He}$), β (электроны) и γ (жесткое электромагнитное излучение).

Все радиоактивные излучения:

- обладают химическим действием (в частности, вызывают почернение фотопластинки);
- вызывают ионизацию газов (иногда и жидкостей);
- возбуждают флюоресцентное свечение твердых и жидких тел.

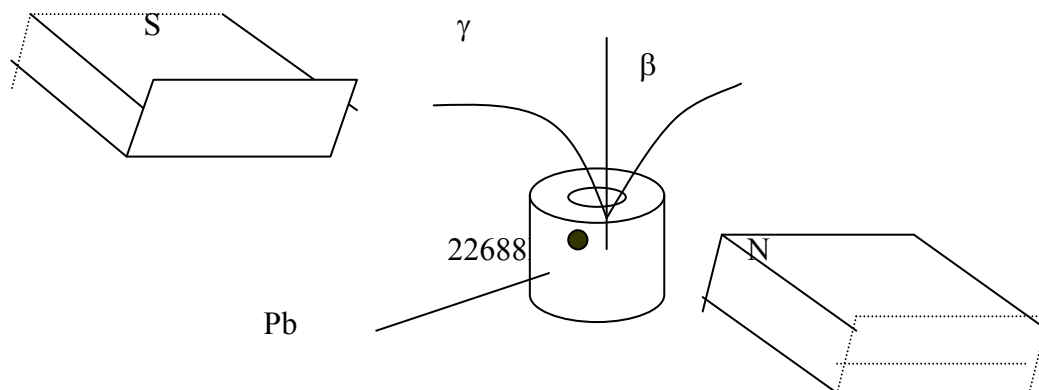


Рис. 1

Эти свойства лежат в основе методов обнаружения и исследования свойств радиоактивных излучений.

Как показали калориметрические исследования П.Кюри и А.Лаборда (рис. 2) радиоактивные излучения сопровождаются выделением энергии. Так 1г радия выделяет 102 Дж/час. Для нагревания стакана воды на 1оС необходимо ~ 1000 Дж, т.е. порядка 10 часов.

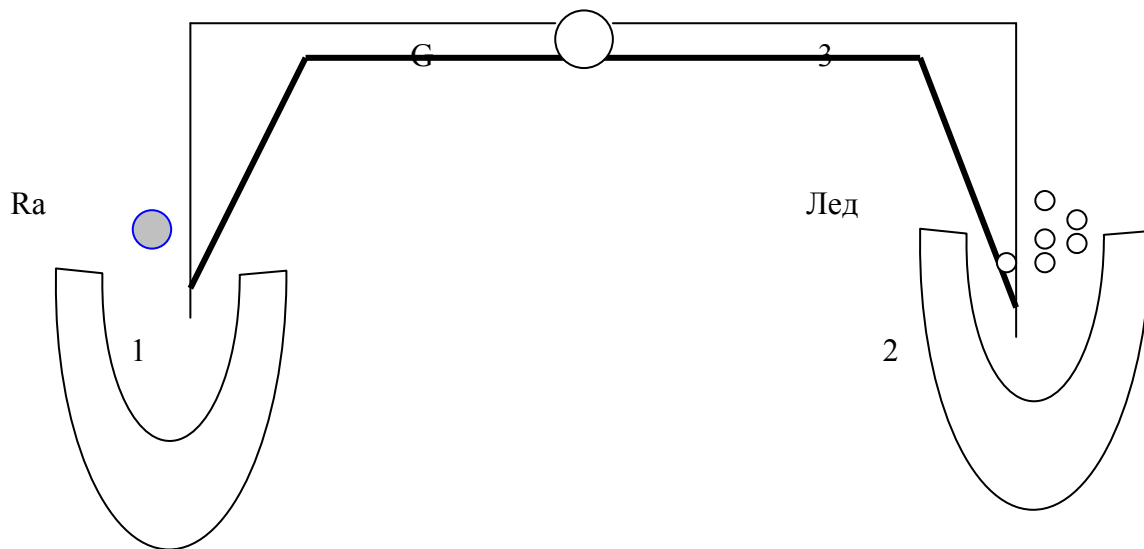


Рис. 2

1,2 – сосуды Дьюара, 3 – дифференциальная термопара, G - гальванометр.

4.2. Закон радиоактивного распада

Число ядер dN , распадающихся за промежуток времени dt пропорционально dt и числу ядер N , еще не распавшихся к моменту времени t :

$$-dN = \lambda N dt, \quad (12)$$

где λ - постоянная радиоактивного распада.

Из (12) следует, что

$$\lambda = \left| \frac{dN}{N dt} \right| \quad (13)$$

есть вероятность распада в единицу времени.

Интегрируя (12), получим

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = - \int_0^t \lambda dt \Rightarrow \ln N - \ln N_0 = -\lambda t \Rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (14)$$

где N_0 - первоначальное число ядер.

Из (14) следует способ определения λ , ясный из рис. 3

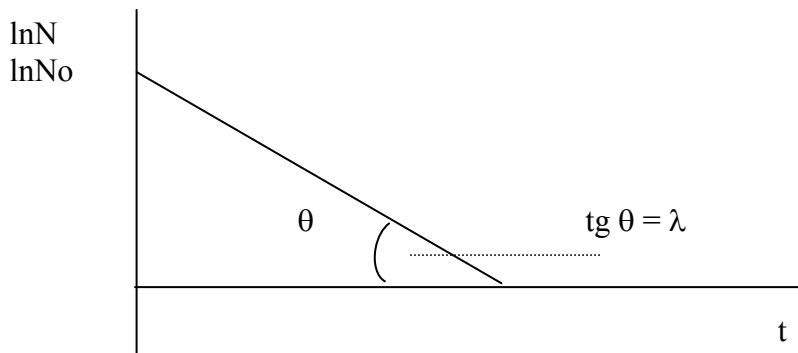


Рис. 3

Выражение (14) называется законом радиоактивного распада.

Число распавшихся к моменту t ядер равно:

$$N_p = N_0 - N = N_0 (1 - e^{-\lambda t}). \quad (15)$$

Если $\lambda t \ll 1$, то $e^{-\lambda t} \cong 1 - \lambda t$ и

$$N_p \cong N_0 \lambda t. \quad (16)$$

Промежуток времени τ , в течение которого распадается половина исходных атомов, называется периодом полураспада

$$1/2 N_0 = N_0 e^{-\lambda \tau} \Rightarrow S = e^{-\lambda \tau} \Rightarrow \ln 2 = \lambda \tau. \quad (17)$$

Подставляя λ из (17) в (14), получим:

$$N = N_0 e^{-(\ln 2/\tau)t} = N_0 e^{-0.693t/\tau}. \quad (18)$$

Типичным радиоактивным элементом является радий, распадающийся на радон и гелий:



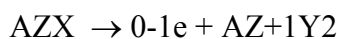
4.3. Закон смещения К.Фаянса – Ф.Содди

В 1911 году польский физик К.Фаянс и английский химик Ф.Содди сформулировали закон смещения при радиоактивных α и β - распадах:

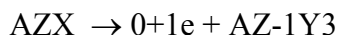
- α - распад



- β^- - распад



- β^+ - распад



Смещение дочерних элементов относительно материнского ясны из схемы рис. 4

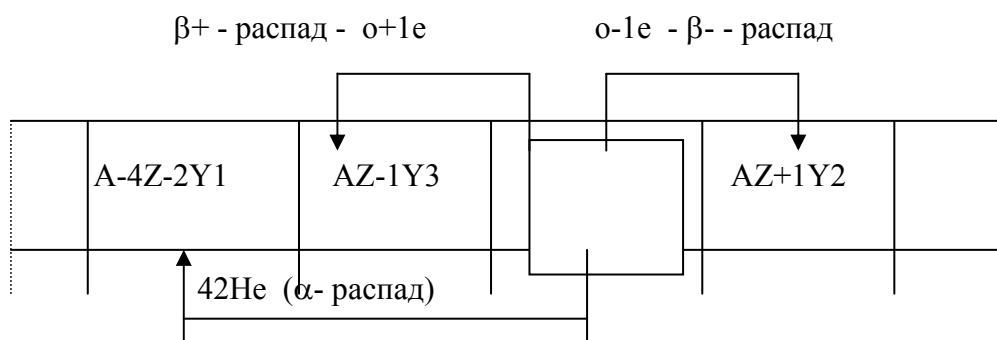


Рис. 4

4.4. Радиоактивные семейства. Активность радионуклида

Если дочернее ядро оказывается также радиоактивным, то возникает цепочка радиоактивных превращений. В естественных условиях имеется три радиоактивных семейства:

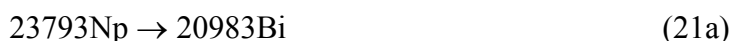
- урана $23892\text{U} \rightarrow 20682\text{Pb}$ [Uranh - родоначальник, производитель. В греческой мифологии Уран бог неба, супруг Геи (Земли), отец титанов, киклопов (циклопов) и сторуких исполинов; был свергнут своим сыном-богом Кроносом (Чсьнпт) отцом Зевса (Жээт), ему соответствует римское Сатурн.

В астрономии Уран (•) – планета (среднее расстояние от Солнца ~ 2871 млн.км.)];

- тория $23290\text{Th} \rightarrow 20882\text{Pb}$;

- актиния $23589\text{Ac} \rightarrow 20782\text{Pb}$. (21)

Искусственным путем получено семейство нептуния



В цепочке радиоактивных распадов за промежуток времени dt из общего числа N_m материнских ядер распадается $\lambda_m N_m dt$ ядер и $\lambda_d N_d dt$ дочерних. Потому общее изменение числа дочерних ядер $dN_d = \lambda_m N_m dt - \lambda_d N_d dt$, а изменение в единицу времени:

$$\frac{dN_d}{dt} = \lambda_m N_m - \lambda_d N_d \quad (22)$$

В случае динамического равновесия между материнским и дочерним веществом

$$\frac{dN_d}{dt} = 0$$

и условие равновесия имеет вид:

$$\lambda_m N_m = \lambda_d N_d, \quad (23)$$

откуда

$$\frac{N_m}{N_d} = \frac{\lambda_d}{\lambda_m} = \frac{\tau_m}{\tau_d}, \quad (24)$$

где τ_m и τ_d периоды полураспадов материнского и дочернего ядер. Величина $\lambda N = A$ называется активностью данного радиоактивного вещества (радионуклида).

Единицей активности нуклида в радиоактивном источнике является беккерель:

$$[A] = 1 \text{ с}^{-1} = 1 \text{ Бк} = 1 \text{ Вк}. \quad (25)$$

Беккерель равен активности нуклида в радиоактивном источнике, в котором за время 1 с происходит один акт распада.

4.5. α -радиоактивный распад

α -распад является свойством тяжелых ядер ($A > 200$, $Z > 82$). Внутри таких ядер происходит образование обособленных α -частиц, чему способствует насыщение ядерных сил. Образовавшаяся α -частица подвержена большому действию кулоновских сил отталкивания, чем изолированные протоны, и испытывает меньшее ядерное притяжение к нуклонам в ядре.

Для вылета из ядра α -частица должна преодолеть “потенциальный барьер” (рис. 5).

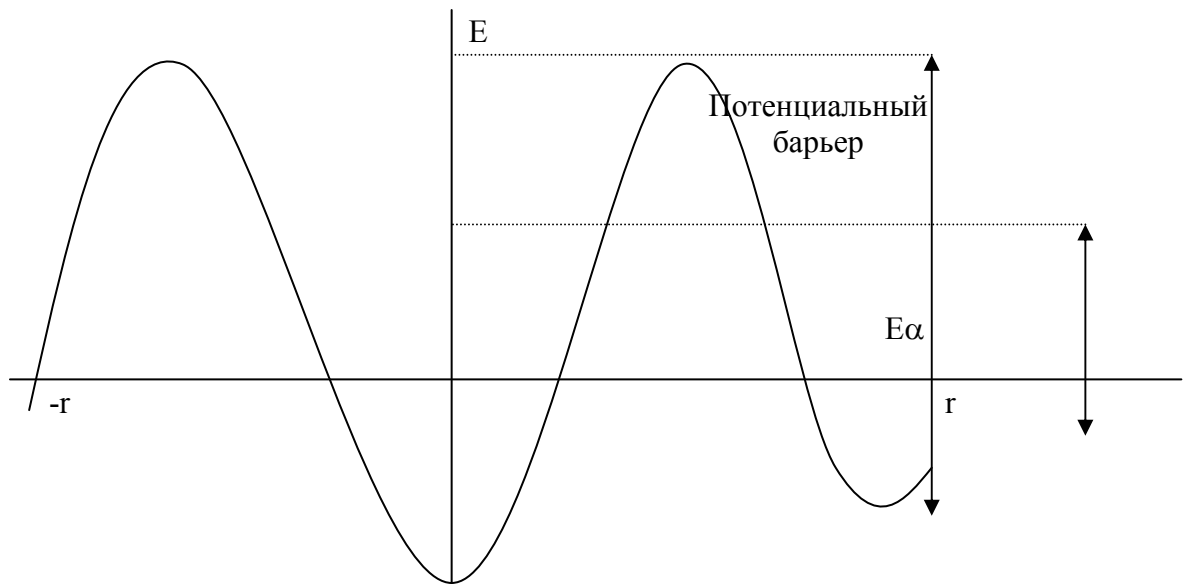


Рис. 5

Опыты по рассеянию α -частиц показали, что между ядром и α -частицей на расстояниях $r \geq 3 \cdot 10^{-12}$ см действуют кулоновские силы отталкивания. При меньших расстояниях наблюдается уменьшение кулоновских сил, обусловленное действием ядерных сил притяжения.

α -частица вылетает из ядра благодаря туннельному эффекту (процесс вероятностный).

Длина пробега R α -частиц в воздухе описывается законом П.Гейгера-Дж.Нэттола:

$$\ln R = A' \ln \lambda + B' \text{ или } R = \lambda A' e^{B'}, \quad (26)$$

где A' и B' - эмпирические постоянные, имеющие различные значения для каждого из семейств. Выбрасываемые из ядер α -частицы обладают определенным энергетическим спектром. Следовательно, атомные ядра обладают дискретными энергетическими уровнями.

Теория α -распада была создана Георгием Антоновичем Гамовым (Джорж Гамов) в 1928г. Гамов (1904-1968гг.) родился в Одессе, учился в Новороссийском, а затем Ленинградском университете. В 1933г. он был делегирован на 7-й Международный Сольвеевский конгресс по атомному ядру в Брюссель и в Советский Союз не вернулся. В дальнейшем он работал в США, участвовал в атомном проекте. Выполнил ряд работ по космологии, предсказанию существования реликтового излучения, расшифровке генетического кода, по популяризации науки. По поводу открытия Гамова известный поэт Демьян Бедный опубликовал в "Правде" стихотворение, в котором были такие строки:

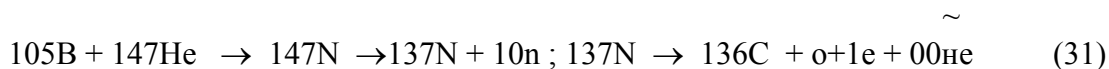
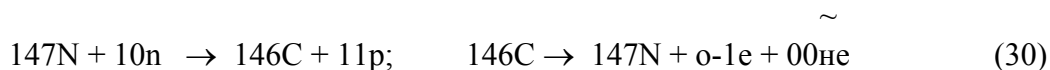
“Вот пример: советский парень Гамов
Уже до атома добрался, лиходей!
Миллионы атомов на острие иголки!
А он – ведь до чего механика хитра!
В отдельном атоме добрался до ядра!
Раз! Раз! И от ядра остались осколки!
Кошунственно решил загадку из загадок!”

4.6. β -радиоактивный распад

Этим термином обозначают три типа ядерных превращений: электронный (β^-), позитронный (β^+) - распады и электронный захват (ϵ или К-захват; в 100 раз реже L-захват). Эти процессы происходят путем превращения одного вида нуклона в другой – нейтрона в протон или протона в нейтрон – по схеме



$00\tilde{n}e$ - электронное нейтрино, $00\tilde{n}e$ - электронное антинейтрино. β^- - распад происходит как у естественно, так и у искусственно-радиоактивных ядер; β^+ - распад характерен только для последних. Например:



Американский поэт Джон Апдайк написал о нейтрино стихотворение “Космические разбойники”

Частички нейтрино,
 Капризные дети,
 Чему вы подвластны,
 Чего вы хотите?
 Заряда не нужно,
 Не нужно вам массы,
 Сквозь нашу планету идете бесстрастно.
 Что газ вам тончайший,
 Что толстые стены –
 Летите беспечно
 В просторах Вселенной.
 Как света фотоны
 Проходят сквозь стекла,
 Так вы через сталь,
 Через медь, через холку
 Коня, горделиво
 Застывшего в стойле.

Энергетический спектр испускаемых электронов непрерывный (рис. 6).

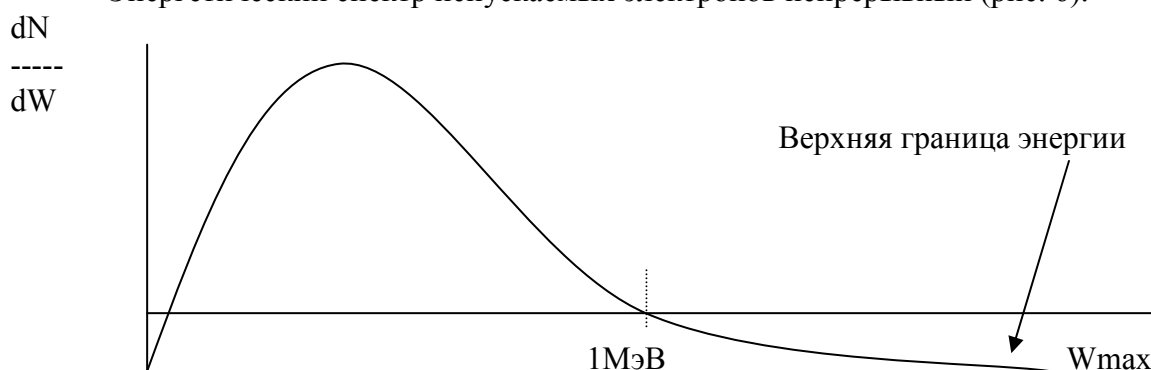


Рис. 6

Для согласования непрерывности спектра с дискретностью уровней ядер необходимо допустить, что вместе с электроном $0-1e$ из ядра вылетает еще одна

частица – электронное антинейтрино $\bar{\nu}_e$. Полная энергия, теряемая ядром при распаде, равна W_{max} , но она различным образом распределена между электроном и антинейтрино.

β -радиоактивны те ядра, у которых избыток нейтронов. К-захват был предсказан в 1935 году Х.Юкавой, С.Санатой и открыт в 1937 Л.Альваресом.

4.7. γ -излучение (жесткое электромагнитное излучение)

γ -излучение не является самостоятельным типом радиоактивности. Оно сопровождает α и β -распад и не вызывает изменения заряда и массового числа. γ -излучение испускается при переходах ядер из возбужденных энергетических состояний в основное или менее возбужденное. Длина волны не превышает 10^{-2} нм ($0,1A_0$).

γ -лучи имеют дискретный спектр и испускаются дочерним ядром. Гамма-лучи оказывают сильное воздействие на вещество, в частности, на биологические объекты. Их действие оценивается дозой излучения.

Мера энергии, переданной ионизирующим излучением заряженным частицам в данной точке облучаемого объема, называется керма (английская аббревиатура kinetic energy released in matter).

ГОСТ 15484-81 “Излучения ионизирующие и их изменения” определяет керму как отношение суммы первоначальных кинетических энергий ΔEN всех заряженных частиц, появившихся под действием косвенно ионизирующего излучения в элементарном объеме специального вещества, к массе вещества в этом объеме

$$K = \frac{\Delta EN}{\Delta m} . \quad (32)$$

Единица кермы в СИ

$$[K] = 1 \text{ Дж/кг} = 1 \text{ Гр} \text{ (1Gy)} . \quad (33)$$

Грэй (единица названа в честь английского физика Л.Грэя) равен керме, при которой сумма первоначальных кинетических энергий всех заряженных частиц, образованных косвенно ионизирующим излучением в облученном веществе массой 1 кг, равна 1 Дж.

Вероятность излучения γ -кванта зависит не от способа возбуждения, а от

$$\Delta E = E_{\text{нач}} - E_{\text{кон}} .$$

Наиболее вероятные процессы взаимодействия γ с веществом ($E \sim 0,01 \div 10$ МэВ):
фотоэлектрическое поглощение

$$\frac{m_0 c^2}{2} = h\nu - A;$$

комптоновское рассеяние;
образование электрон-позитронной пары

$$\gamma \rightarrow 0^-1e + 0^+1e . \quad (33a)$$

По поводу этой реакции акад. С.И.Вавилов заметил: “Мелодия превращается в скрипку!”

Минимальная энергия, необходимая для образования пары:

$$2m_0 c^2 = h\nu = 1,022 \text{ МэВ} . \quad (33б)$$

Явление образования электрона и позитрона из гамма-кванта было открыто Ф. и И.Жолио-Кюри, К.Андерсоном, Н.Блэккеттом, Дж.Оккиалини и объяснено в 1933г. Р.Оппенгеймером. Обратный процесс аннигиляции электронов и позитронов

$$0^-1e + 0^+1e \rightarrow 2\gamma . \quad (33в)$$

была предсказана в 1931г. П.Дираком и экспериментально доказана Ф.Жолио-Кюри и Ж.Тибо в 1933г.

5. Ядерные реакции

Превращения атомных ядер, вызванные взаимодействием их друг с другом или с элементарными частицами, называются ядерными реакциями. Как правило, в них участвуют два ядра и две частицы. Одна пара “ядро-частица A,a” называется исходной, а другая B,v – конечной. Символическая запись реакции



В ряде случаев ядерная реакция может происходить неоднозначно



Возможные схемы протекания ядерной реакции называются ее каналами. Начальный этап называется входным каналом. В конце каждого процесса соударения могут возникнуть с разными вероятностями различные группировки частиц, которые называют выходным каналом. Среди выходных каналов всегда имеется канал (a, b), называемый упругим и отвечающий упругому рассеянию



Все остальные каналы называются неупругими. Некоторым из них соответствуют процессы неупругого рассеяния.



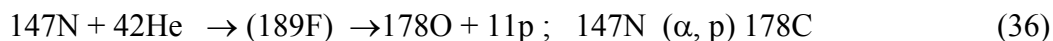
где a^* , b^* - возбужденные состояния частиц.

Если данный конкретный процесс (34) разрешен всеми законами сохранения, то он обязательно протекает и соответствующий ему выходной канал называется открытым. Когда процесс запрещен хотя бы одним законом сохранения, то он не идет, а канал называется закрытым.

Ядерная реакция характеризуется энергией ядерной реакции Q, равной разности энергии конечной и исходной пар в реакции. Если $Q < 0$, то реакция идет с поглощением энергии и называется эндотермической (гр. $e\`{n}don$ - внутри). Если $Q > 0$, то реакция идет с выделением энергии и называется экзотермической (гр. exh – вне, снаружи).

Примеры ядерных реакций:

- исторически первая ядерная реакция (Резерфорд Э., 1919):

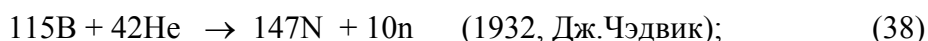


↓
составное ядро - компаунд - ядро

(англ. *compaund* - составной);

- ядерная реакция, в которой был открыт нейтрон (1930)

(гипотеза о существовании нейтрона была выдвинута в 1920 Э.Резерфордом и У.Харкинсом):



- ядерная реакция, в которой была открыта искусственная радиоактивность (1934, И.Кюри-Жолио, Ф.Жолио):



Здесь 3015P - ядро искусственно радиоактивного фосфора с периодом полураспада 2,55 мин.



Первая ядерная реакция под действием нейтронов была осуществлена в 1932г. Н.Фрезером:



Энергия ядерной реакции

$$\Delta E = c^2 (\sum M_i - \sum M_k), \quad (42)$$

где $\sum M_i$ - сумма масс частиц, вступивших в ядерную реакцию,
 $\sum M_k$ - сумма масс образующихся частиц.

Задача 34.14. Вычислить энергию реакции:



Решение: $M_{\text{Be}} = 9,01219$ а.е.м.

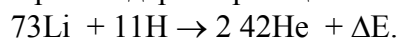
$M_{\text{H}} = 2,01410$ а.е.м.

$M_{\text{He}} = 4,00260$ а.е.м.

$M_{\text{Li}} = 7,01601$ а.е.м.

$$\Delta E = 931,5 (9,01219 + 2,01410 - 4,00260 - 7,01601) = 7,15 \text{ МэВ} .$$

Задача 5.1. Вычислить энергию ядерной реакции:



$M_{\text{Li}} = 7,01601$ а.е.м., $M_{\text{H}} = 1,00783$ а.е.м., $M_{\text{He}} = 4,00260$ а.е.м.,

$$\Delta E = 931,5 (7,01601 + 1,00783 - 4,00260 \cdot 2) = 17,35 \text{ МэВ} .$$

В ядерных реакциях выполняются законы сохранения энергии, импульса, электрического заряда и массовых чисел. Кроме того, в ядерной физике существуют особые законы сохранения, которых нет в других областях физики. Этот вопрос будет подробнее рассмотрен после изучения свойств элементарных частиц и их классификации.

Дополнение.

Схема опыта Резерфорда представлена на рис. 7

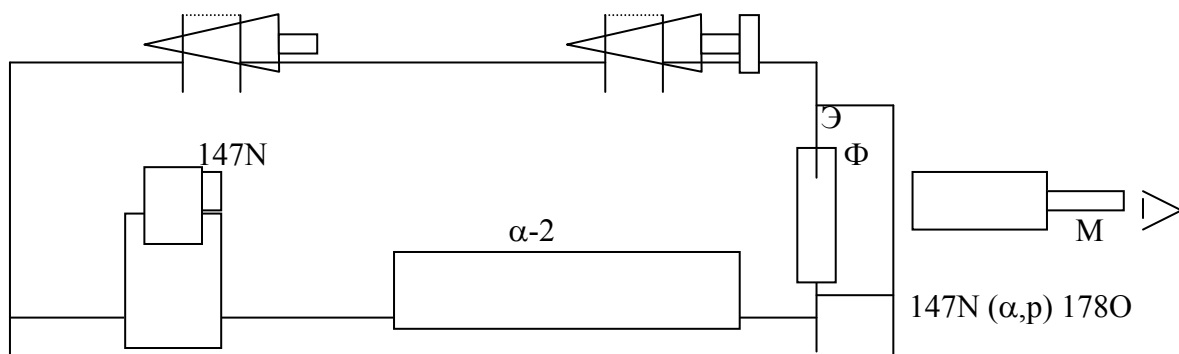
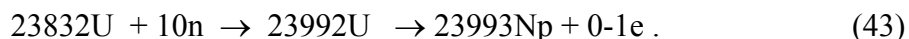


Рис. 7

α -2 - полониевый источник; Ф - алюминиевая фольга; Э - экран; М – микроскоп
 α - частицы с энергией 7,5 МэВ имели при давлениях, которые создавались в камере, такие длины пробегов, что алюминиевая фольга Ф полностью поглощала все частицы. При заполнении камеры ^{147}N в микроскопе наблюдались сцинтилляции, что объяснялось возникновением новых частиц – протонов, - обладающих достаточной проникающей способностью и достигающих экрана (лат. scintillatio - мерцание).

Нейтроны, у которых энергия ~ 100 кэВ называются медленными (до 0,5 эВ - тепловыми). При прохождении сквозь вещество они испытывают захват. При совпадении энергии нейтрона с энергией составного ядра происходит резонансный захват – этот процесс лежит в основе получения трансурановых элементов, например:



В сентябре 1997 года Международный союз чистой и прикладной химии узаконил название шести искусственных сверхтяжелых элементов:

- резерфордий 106 (Эрнст Резерфорд, (E.Retherford) 1871-1937, англ. физик);
- дубний 105 (г.Дубна, Московская обл.);
- сиборгий 104 (Глен Сиборг, G.Seaborg, 1912, ам. физик) - принимал участие в открытии Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fe, Md, ^{239}Pu , ^{233}U ;
- борий 107 (Нильс Бор, N.Bohr, 1885-1962, датский физик);
- хассий 108 (в честь Отто Гана, O.Hahn, 1879-1968 и Фрица Штрассмана, F.Strassmann, 1902 - – немецкие физики);
- мейтнерий 109 (Лизе Мейтнер, L.Meitner , 1878-1968, австрийский физик).

Названия даны, главным образом, в честь ученых, внесших большой вклад в ядерную физику, и лишь 105 элемент назван в честь г.Дубны, где находится Объединенный институт ядерных исследований.

Впервые химический элемент – сиборгий – назван в честь живущего ученого – американского физика Глена Сиборга, ему сейчас 86 лет, он продолжает работать в Лоуренсовской национальной лаборатории в г.Беркли, Калифорния. Почтовый адрес Сиборга может состоять только из названий химических элементов: Америций ^{95}Am , Калифорний ^{98}Cf , Берклий ^{97}Bk , Лоуренсий ^{103}Lr , Сиборгий ^{104}Sg , в открытии которых он принимал участие.

I	Периодическая система элементов					VII (H)	VIII 2He	Атомный номер	
	Д.И.Менделеева								
	II	III	IV	V	VI				
1	^1H 2.1 1.00794 (7) водород							4.0026 гелий	3 Li 6,941 (2) литий
2	^3Li 1.0 6.941(2)) литий	^4Be 1.5 9.0121 82(3) берил ий	^5B 2.0 10.811 (5) бор	^6C 2.5 12.011 (1) углеро д	^7N 3.0 14.006 74(7) азот	^8O 3.5 15.999 4(3) кисло род	^9F 4.0 18.998 4032(9)) фтор	^{10}Ne 20.179 7(6) неон	1.0 / Относи- Электроот- тельная рицатель-

3	11Na 0.9 22.9897 68(6) натрий	12Mg 1.2 24.305 0(6) магний	13Al 1.5 26.981 539(5) алюминий	14Si 1.8 28.085 5(3) кремний	15P 2.1 30.973 762(4) фосфор	16S 2.5 32.066 (6) сера	17Cl 3.0 35.452 7(9) хлор	18Ar 39.948 (1) аргон	атомная масса по Полингу	
	19K 0.8 39.0983 (1) калий	20Ca 1.0 40.078 (4) кальций	Sc21 1.3 44.955 910(9) скандий	Ti22 1.5 47.88 (3) титан	V23 1.6 50.941 ванадий	Cr24 1.6 51.996 1(6) хром	Mn25 1.5 54.938 05(1) марганец	Fe26 1.8 55.847 (3) железо	Co27 1.8 58.933 20(1) кобальт	Ni28 1.8 58.69 (1) никель
4	Cu29 1.9 63.546 (3) медь	Zn30 1.6 65.39 (2) цинк	31Ga 1.6 69.723 (4) галлий	32Ge 1.8 72.61 (2) германий	33As 2.0 74.921 59(2) мышьяк	34Se 2.4 78.96 (3) селен	35Br 2.8 79.904 (1) бром	36Kr 83.80 (1) криптон		
	37Rb 1.8 85.4678 (3) рубидий	38Sr 1.0 87.62 (1) стронций	Y39 1.2 88.905 85(2) иттрий	Zr40 1.4 91.224 (2) цирконий	Nb41 1.6 92.906 38(2) ниобий	Mo42 1.8 95.94 (1) молибден	Tc43 1.9 97.907 2 технеций	Ru44 1.2 101.07 (2) рутений	Rh45 1.2 102.90 550(3) родий	Pd46 1.2 106.42 (1) палладий
5	Ag47 1.9 107.868 2(2) серебро	Cd48 1.7 112.41 1(8) кадмий	49In 1.7 114.82 (1) индий	50Sn 1.8 118.71 0(7) олово	51Sb 1.9 121.75 (3) сурьма	52Te 2.1 127.60 (3) теллур	53I 2.5 126.90 447(3) йод	54Xe 131.29 (2) ксенон		
	55Cs 1.7 132.905 4333(5) цезий	56Ba 1.9 137.32 7(7) барий	57La- 71Lu* 1.1 – 1.3	Hf72 1.3 178.49 (2) гафний	Ta73 1.5 180.94 79(1) тантал	W74 1.7 183.86 (3) вольфрам	Re75 1.9 186.20 7(1) рений	Os76 2.2 190.2 (1) осмий	Ir77 2.2 192.22 (3) иридий	Pt78 2.2 195.08 (3) платина
6	Au79 1.4 196.966 54(3) золото	Hg80 1.9 200.59 (3) ртуть	81Tl 1.8 204.38 33(2) таллий	82Pb 1.8 207.2 (1) свинец	83Bi 1.9 208.98 037(3) висмут	84Po 2.0 208.98 24 полоний	85At 2.0 209.98 72 астат	86Rn 222.01 76 радон		
	87Fr 1.7 223.019 7 франций	88Ra 1.9 226.02 54 радий	89Ac- 103Lr ** 1.2 – 1.5	Sg104 [261] сигборгий	Db105 [261] дубний	Rf106 [263]p езерфордий	Bo107 [262] борий	Hn108 [265] хассий	Mt109 [266] мейтнерий	
7										

* лантаноиды														
57L a 138. 905 5(2) лан тан	58C e 140. 115(4) цер ий	59P r 140. 907 65(3) праз еод имй	60N d 144. 24(3) нео дим	61P m 144. 912 7 про мет ий	62S m 150. 36(3) сам ари й	63E u 151. 965(9) евр опи й	64G d 157. 25(3) гадо лин ий	65T b 158. 925 34(3) тер бий	66D y 162. 50(3) дис про зий	67H o 164. 930 32(3) голь мий	68E r 167. 26(3) эрб ий	69T m 168. 934 21(3) тул ий	70Y b 173. 04(3) итте рби й	71L u 174. 967(1) лют еци й
** актиноиды														
89A с 227. 027 8 акт ини й	90T h 232. 038(1) тор ий	91P a 231. 035 88(3) про такт ини й	92U 238. 028 9(1) ура н	93N p 237. 048 2 неп тун ий	94P u 244. 064 2 плу тон ий	95A m 243. 061 4 аме риц ий	96C m 247. 070 3 кюр ий	97B k 247. 070 3 бер кли й	98C f 242. 058 7 кал ифо рни й	99E s 252. 083 эйн ште йни й	100 Fm 257. 095 1 фер мий	101 Md 258. 10 мен дел еви й	102 No 259. 100 9 ноб ели й	103 Lr 260. 105 лоу рен сий

6. Реакция деления ядра. Цепная реакция деления. Понятие о ядерной энергетике.

Возможность решения задачи об использовании внутриядерной энергии выяснилась лишь после открытия нового вида ядерных превращений – деления ядер тяжелых элементов.

В настоящее время установлено, что тяжелые ядра способны к делению при выполнении условия

$$Z_2 A-1 \geq 17, \quad (44)$$

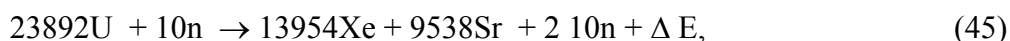
где $Z_2 A-1$ - называется параметром деления. Это условие выполняется для всех ядер, начиная с серебра $108\ 47\text{Ag}$.

Ядра, для которых $(Z_2 A-1)_{\text{крит}} \geq 49$ (критический параметр деления), совершенно неустойчивы относительно деления и не могут существовать. Например, для $261\ 104\text{Sg}$ $Z_2 A-1 \approx 41$.

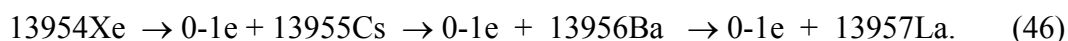
При значениях $Z_2 A-1 < (Z_2 A-1)_{\text{крит}}$ возможно спонтанное (самопроизвольное) деление ядер, происходящее аналогично α -радиоактивности путем туннельного эффекта. Период полураспада для спонтанного деления $\tau \sim 10^{16} \div 10^{17}$ лет. Это явление было открыто на изотопе урана $238\ 92\text{U}$ советскими физиками К.А.Петржаком и Г.Н.Флеровым в 1940 году. При таком делении ядро урана распадается на два осколка, представляющих собой ядра элементов, относящихся к средней части периодической системы.

В 1936 году О.Ган, Ф.Штрассман обнаружили деление ядер урана-235 под действием нейтронов, а Л.Мейтнер и О.Фриш объяснили это явление (термин “деление

ядра” введен Лизой Мейтнер). Деление ядер может происходить на два осколка и два-три свободных нейтрона, например, по схеме



13954Xe и 9538Sr характеризуются избытком нейтронов, неустойчивы и испытывают ряд последовательных β -превращений.



Деление ядра 23592U сопровождается выделением энергии $\Delta E \sim 150$ МэВ, т.е. при делении ядер, содержащихся в 1 г. выделяется энергия $\sim 8 \cdot 10^{10}$ Дж ($22 \cdot 10^3$ кВтч).

Процесс деления ядер 23592U может происходить в виде цепной (нарастающей) реакции. Нейтроны, образующиеся при делении ядра 23592U могут вызвать деление еще двух ядер и т.д. Реакция будет нарастать и при определенных условиях стать взрывной. Осуществление такой реакции (ее возможность обосновали Л.Сциллард, Э.Ферми, Ф.Жолио-Кюри, Я.Б.Зельдович, Ю.Б.Харитон и др.) затруднено двумя обстоятельствами:

- естественный уран представляет собой смесь двух изотопов 23892U (свыше 99%) и 23592U , причем большинство нейтронов захватывается 23892U ;
- деление ядер 23592U происходит преимущественно за счет медленных нейтронов, в то время как нейтроны, получающиеся при делении являются быстрыми.

Таким образом только часть нейтронов поведет к новым актам деления 23592U , число их может быть недостаточно и реакция прекратится. Для поддержания реакции необходимо либо обогатить естественный уран изотопом 23592U , либо искусственно замедлить нейтроны. Метод замедления нейтронов позволил осуществить управляемую ядерную реакцию в ядерных реакторах.

Первый реактор был запущен в США 2 декабря 1942 года Э.Ферми с сотрудниками (Ю.Вигнер, Г.Андерсон, В.Зинн).

Первый исследовательский реактор в СССР был запущен 25 декабря 1946 года И.В.Курчатовым с сотрудниками.

Схема процесса, протекающего в реакторе, представлена на рис. 8.

Нейтрон 10n , присоединяясь к ядру 23592U , вызывает его деление на два осколка $X1$ и $X2$ и ведет к образованию 2-3 быстрых нейтронов. Эти нейтроны пройдя через замедлитель (тяжелая вода D_2O , графит), частично захватываются 23892U , что ведет к возникновению изотопа 23992U , частично вызывают деление 23592U и появление новых нейтронов. Изотоп 23992U в результате ряда последовательных превращений образует новый элемент – плутоний - 23994Pu , способный делиться под влиянием нейтронов, что позволяет использовать его для получения цепных реакций.

При расщеплении макроскопических количеств тяжелых ядер высвобождается колоссальная энергия. Так при делении 2г выделяется такая же энергия, как при сгорании 4т бензина (которого хватило бы, чтобы объехать на автомобиле “Жигули” земной шар по экватору).

Для расщепления 2г урана необходимо $5 \cdot 10^{21} \approx 272$ нейтронов, и оно произойдет после смены 72 поколений, время жизни одного поколения $10^{-7} \div 10^{-8}$ с, так что выделение энергии $\sim 10^{11}$ Дж займет промежуток времени $\sim 10^{-5} \div 10^{-6}$ с.

Первая в мире атомная электростанция мощностью 5000 кВт вступила в строй 27 июня 1954 года в Обнинске под Москвой (руководители работ И.В.Курчатов, Д.И.Блохинцев), а в 1957 году в СССР опущен на воду первый в мире ледокол “Ленин” мощностью 3х90МВт. По данным Международного агентства по атомной энергии в 1985 году во всем мире действовало ~ 400 АЭС, которые будут производить $\sim 17\%$ всей электроэнергии.

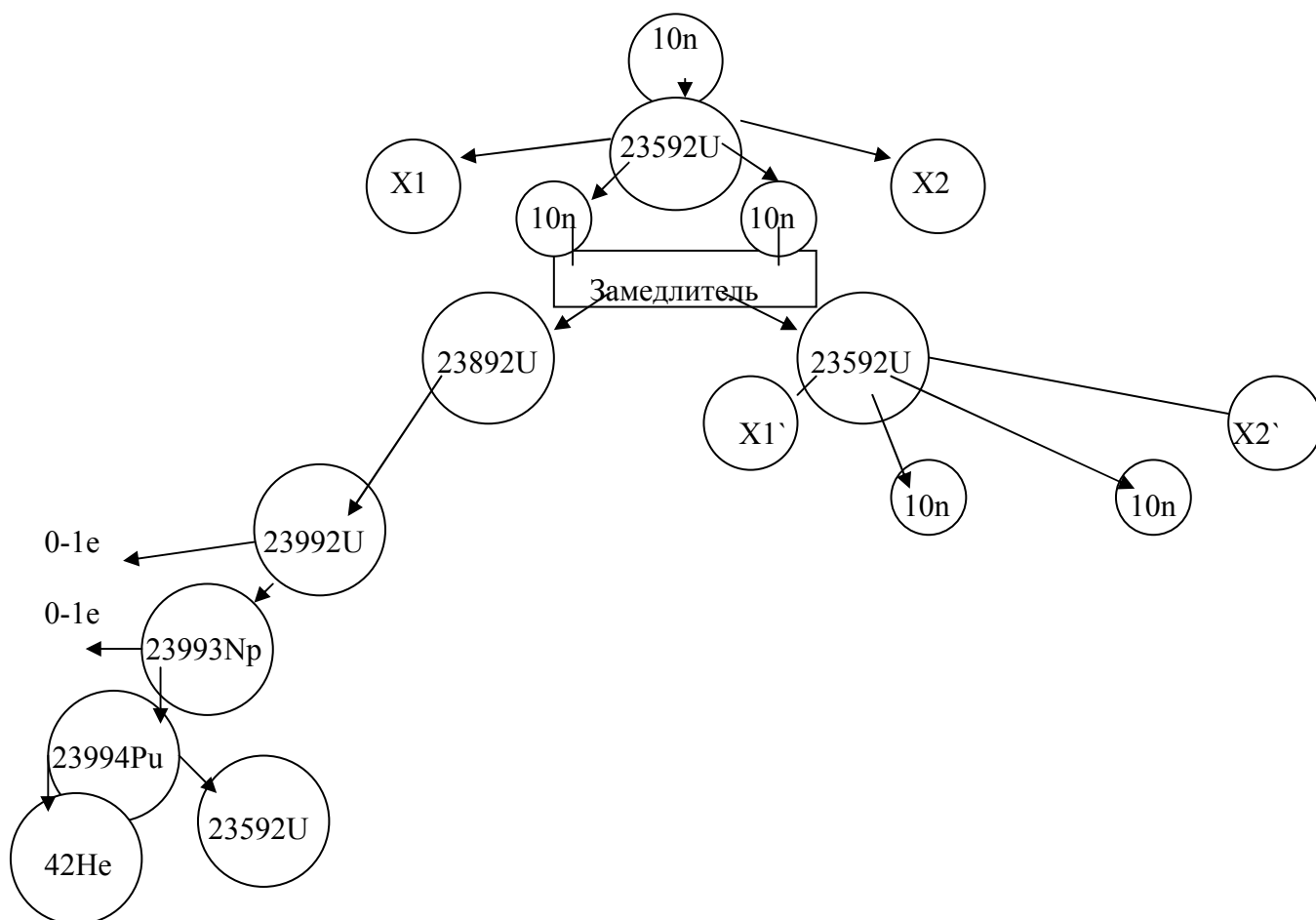


Рис. 8.

Особым реактором на быстрых нейтронах, в котором осуществляется быстрая, неуправляемая цепная реакция взрывного типа, является атомная бомба. Ядерным горючим в них служат чистые изотопы ^{235}U , ^{239}Pu . Критическая масса вещества $10 \div 50\text{ кг}$ (при плотности вещества $\sim 18 \div 19\text{ г/см}^3$ это шар радиусом 4-9 см).

Первый экспериментальный взрыв атомной бомбы был осуществлен в США, в пустыне Аламогордо 16 июля 1945 года (руководитель работ Р.Оппенгеймер). В августе две такие бомбы были сброшены на японские города Хиросима (6.08.45) и Нагасаки (9.08.45). Эти бомбы назывались “мальш” (3м x 0,7м, 4100 кг) и “толстяк” (3,25м x 1,5м, 4500 кг). В Хиросиме погибло 140 тыс. (В 1951-52гг. создан архитектурно-парковый ансамбль Парк Мира), в Нагасаки погибло 75 тыс. жителей.

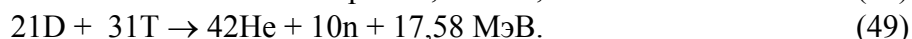
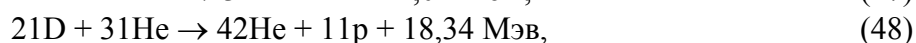
Первая советская атомная бомба была испытана 29 августа 1949г. (И.В.Курчатов). Вот как написал о первой в истории человечества атомной бомбардировке поэт Роберт Рождественский:

“... В восемь пятнадцать,
над миром взлетев,
взвыл торжествующе
дымный клубок!
Солнце зажмурилось, похолодев,
Вздрыгнули оба:
И “боинг” и бог!..
Штурман воскликнул:
“Ой, как красиво!..”

В эту секунду
в расплавленной мгле
рухнули все представления о зле.
Люди узнали, что на Земле
есть Хиросима.
И нет Хиросимы”.

7. Реакция синтеза атомных ядер. Проблема управляемых термоядерных реакций.

Второй путь получения внутриядерной энергии – синтез из легких ядер (изотопов водорода) более тяжелых ядер, например ${}^{42}\text{He}$. Эти реакции могут происходить различным образом, например, по схеме



В этих реакциях выделение энергии, рассчитанной на один нуклон, в несколько раз превышает выделение энергии на одну частицу при реакциях деления тяжелых ядер. Реакции (47) - (49) называются термоядерными реакциями синтеза. Они могут эффективно протекать при температурах $\sim 10^8 \div 10^9 \text{ К}$, когда вещество находится в плазменном состоянии. Такие условия осуществлены в водородной бомбе, где необходимая температура получается за счет взрыва атомной бомбы.

Первые водородные бомбы были испытаны в 1953 году в СССР и 1954 году в США.

Практическое осуществление управляемых термоядерных реакций является в настоящее время одной из наиболее актуальных задач физики и техники.

8. Элементарные частицы. Их классификация и взаимная превращаемость. Основные типы взаимодействий.

8.1. Понятие элементарных частиц.

Первые представления о прерывистом, зернистом строении материи и представления о существовании предела делимости вещества восходит к древним грекам Левкиппу, Демокриту, Эпикуру, Лукрецию Кару (V - IV в. до н.э. - I в.н.э.). Приведем три отрывка из поэмы Лукреция Кара “О природе вещей” (De Rerum Natura):

1. Ныне внимателен будь, достоверному внимля ученью:
Новый предмет до ушей твоих бурно стремится достигнуть,
В новом обличи предстать пред тобой должно мирозданье.
Нет, однако, вещей достоверных, чтоб невероятны
Не показались они нам с первого взгляда, а также
Ни удивительных нет, ни настолько великих явлений,
Чтоб не внушали они удивленья все меньше и меньше.

2. ... далее, так как есть предельная некая точка
Тела того, что уже недостаточно для нашего чувства,
То, несомненно, она совсем неделима на части,
Будучи меньше всего по природе своей, и отдельно,

Самостоятельной быть не могла никогда и не сможет,
 Ибо другого она единая первая доля,
 Вслед за которой еще подобные ей, по порядку
 Сомкнутым строем сплотясь, образуют телесную сущность,
 Так как самим по себе им быть невозможно, то, значит,
 Держатся вместе они, и ничто их не сможет расторгнуть,
 Первоначала вещей, таким образом, просты и плотны.

3. ... потому что, хотя никакого
 Нет у Вселенной конца, но ведь даже мельчайшие вещи
 Из бесконечных частей состоять одинаково будут.
 Здравый, однако же, смысл отрицает, что этому верить
 Может наш ум, и тебе остается признать неизбежно
 Существование того, что совсем неделимо, являясь
 По существу наименьшим.

Элементарными называют такие частицы, которым нельзя приписать внутренней структуры, являющейся простым соединением других стабильных частиц. При взаимодействии с другими частицами и полями элементарная частица ведет себя как единое целое. Термин элементарная имеет в сущности условный характер.

К “элементарным” частицам относят обычно все мельчайшие частицы материи за исключением атомных ядер с массовым числом $A \geq 2$. Их иногда называют субъядерными частицами или просто частицами.

В настоящее время считается, что истинно элементарные частицы, называемые также фундаментальными или субчастицами, все же имеются. Термин “элементарные частицы” сохраняется скорее по традиции для обозначения всех субъядерных частиц, даже тех из них, которые заведомо являются составными.

В области энергии $\sim 2 \text{ мос}^2$ структура элементарных частиц не влияет на взаимодействие между ними и другими частицами и полями и они рассматриваются как бесструктурные материальные точные, обладающие рядом свойств: массой покоя, электрическим зарядом, спином, преобладающей схемой распада и др. Однако, в целом такие представления противоречат экспериментальным данным. Наличие магнитного момента, электрическая и магнитная поляризуемость свидетельствует в пользу структуры элементарных частиц. Под структурой понимают, прежде всего, геометрические свойства частицы, связанные с ее протяженностью в пространстве-времени. Кроме того, частица может иметь структуру, обусловленную инвариантностью ее взаимодействия с различными полями. Структура частицы имеет динамический характер и проявляет свои различные стороны в зависимости от взаимодействия, в котором участвуют частицы.

Из соотношения неопределенностей Гейзенберга следует, что для изучения структуры элементарных частиц, необходимо изучать процессы, происходящие на малых расстояниях Δx , которым соответствует неопределенность импульса

$$\Delta p \geq \frac{\hbar}{\Delta x} . \quad (50)$$

Чем меньше Δx , тем больше должен быть импульс. Следовательно, выяснение структуры элементарных частиц возможно только в области высоких энергий!

В начале 30 годов XX века были известны четыре частицы: электрон $0-1e$, протон $11p$, нейтрон $10n$, γ -квант (фотон, $h\nu$).

В настоящее время число частиц, которые все еще продолжают называть элементарными, ~ 500 .

Большое число может означать следующее:

- некоторые из них на самом деле не элементарны, а являются производными от ограниченного числа элементарных частиц;
- концепция элементарности в обычном ее понимании неприменима к миру мельчайших частиц материи.

Естественным источником элементарных частиц являются космические лучи. В лабораториях элементарные частицы высоких энергий получают с помощью ускорителей заряженных частиц.

В основе классификации частиц лежат их различия по массам покоя: различаются лептоны (легкие частицы), мезоны (средние, промежуточные частицы) и барионы (тяжелые частицы), которые подразделяются на нуклоны и гипероны.

По наличию у элементарных частиц электрического заряда, измеренного в единицах элементарного заряда e , различают положительные, отрицательные и нейтральные частицы. Теоретически предсказаны частицы – кварки – с зарядом $\pm 1/3 e, \pm 2/3 e$.

По значениям спина подразделяются на частицы с полуцелым или нулевым спином (в единицах \hbar).

По времени жизни подразделяются на стабильные и нестабильные.

8.2. “Зоопарк” элементарных частиц. Типы взаимодействий.

Раз в два года специальная комиссия физиков публикует Particle Data Group - таблицу “элементарных частиц”.

Главная особенность частиц состоит в их способности к взаимопревращениям. Все многообразие этих превращений управляется четырьмя (а фактически тремя) типами фундаментальных взаимодействий.

1. Сильное взаимодействие свойственно частицам, которые именуется адронами (гр. *adron* - сильный, термин введен советским физиком Л.Б.Окунем). К их числу относятся, например, $11p$ и $10n$. Наиболее известное проявление сильного взаимодействия – ядерные силы. Частицы, которые не участвуют в сильном взаимодействии называются аденонами (гр. *adenon* - слабый, термин введен Л.Б.Окунем, но не прижился).

2. Электромагнитное взаимодействие присуще электрически заряженным частицам и фотонам. Опосредствованно в нем могут участвовать и нейтральные частицы. Электромагнитное взаимодействие является самым известным и наиболее изученным.

3. Слабое взаимодействие свойственно почти всем частицам. Наиболее известное проявление - β -распады атомных ядер.

4. Гравитационное взаимодействие универсально, в нем участвуют все частицы и все тела Вселенной.

Всякое фундаментальное взаимодействие можно охарактеризовать интенсивностью, радиусом и временем, в течение которого осуществляется его элементарный акт, и степенью симметрии, то есть набором свойственных ему законов сохранения.

Интенсивность электромагнитного взаимодействия связывают с элементарным зарядом $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Однако, эта величина является неудобной, так как она размерна. Поэтому используется безразмерный комплекс, называемый постоянной тонкой структуры (эта величина входит в формулу для тонкого расщепления энергетических уровней атомов):

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \equiv \frac{e^2}{\hbar c} \approx (137,03)^{-1}. \quad (50a)$$

Интенсивность слабого взаимодействия связывают со “слабым” зарядом GF , называемым константой Ферми:

$$GF \approx 1,43 \cdot 10^{-62} \text{ Дж}\cdot\text{м}^3 \quad (50б)$$

Соответствующая ей безразмерная комбинация должна включать массу некоторой частицы (обычно m_p)

$$\gamma \equiv \frac{GF_2 (\hbar - 4)}{\hbar c \quad m_p c} \approx 1,0 \cdot 10^{-10}. \quad (50в)$$

Интенсивность гравитационного взаимодействия характеризуется безразмерной комбинацией

$$\delta \equiv \frac{G m_p^2}{\hbar c} \sim 10^{-38}, \quad (50г)$$

$$\frac{\alpha}{\delta} = \frac{E_{эл}}{E_{гр}}, \quad (50д)$$

где $E_{эл}$, $E_{гр}$ - энергии электромагнитного и гравитационного взаимодействия двух протонов при фиксированном расстоянии между ними.

Интенсивность сильного взаимодействия равна по порядку величины единице (точнее $\sim 14 \div 0,08$ в зависимости от величины “сильного заряда” g или f):

$$\frac{g^2}{\hbar c} \approx 14, \quad \beta = \frac{f^2}{\hbar c} \approx 0,08.$$

Основные параметры взаимодействий приведены в таблице 1.

Таблица 1

№ п/п	Взаимодействие	Механизмы	Интенсивность	Радиус, м	Характерное время, с
1.	Сильное (СВ)	Обмен глюонами	1 - 10 ⁻¹	10-15	10-23
2.	Электромагнитное (ЭМВ)	Обмен фотонами	1/137	∞	10-20
3.	Слабое (СлВ)	Обмен промежуточными бозонами	10-10	10-18	10-13
4.	Гравитационное (Гв)	Обмен гравитонами	10-38	∞	?

В 1967 году С.Вейнберг и А.Салам создали единую теорию СлВ и ЭлВ, получившую название теории электрослабого взаимодействия (ЭСлВ). Сейчас создается единая теория СлВ, ЭМВ и СВ, которые рассматриваются как проявление электроядерного взаимодействия. Соответствующие объединения называются великим объединением (великим синтезом). Недавно начаты работы по созданию единой теории всех четырех типов взаимодействий (расширенная супергравитация). Однако, введение четырех разных взаимодействий не потеряет смысла, подобно тому как не потеряло смысл разделение электромагнитного поля в заданной системе отсчета на электрическую и магнитную составляющие.

8.3. Полуфеноменологическая систематика частиц.

Предварительная систематика частиц проводится по нескольким признакам и носит так называемый полуфеноменологический характер, так как не принимает во внимание особенностей механизма фундаментальных взаимодействий и наличие структуры у частиц. В основе этой систематики лежат следующие положения:

Имеется царство частиц (рис. 9)

Оно содержит подцарства адронов и аденонов.

Адроны подразделяются на стабильные и резонансы.

Подключение статистики расщепляет адроны на мезоны (стабильные адроны - бозоны), барионы (стабильные адроны - фермионы), мезонные резонансы (резонансы – бозоны) и барионные резонансы (резонансы - фермионы).

Фермионы, не участвующие в сильном взаимодействии, составляют класс лептонов.

Бозоны, не участвующие в сильном взаимодействии и имеющие нулевую массу, являются квантами в классических полях.

Каждому виду отвечает свой антивид – античастица.

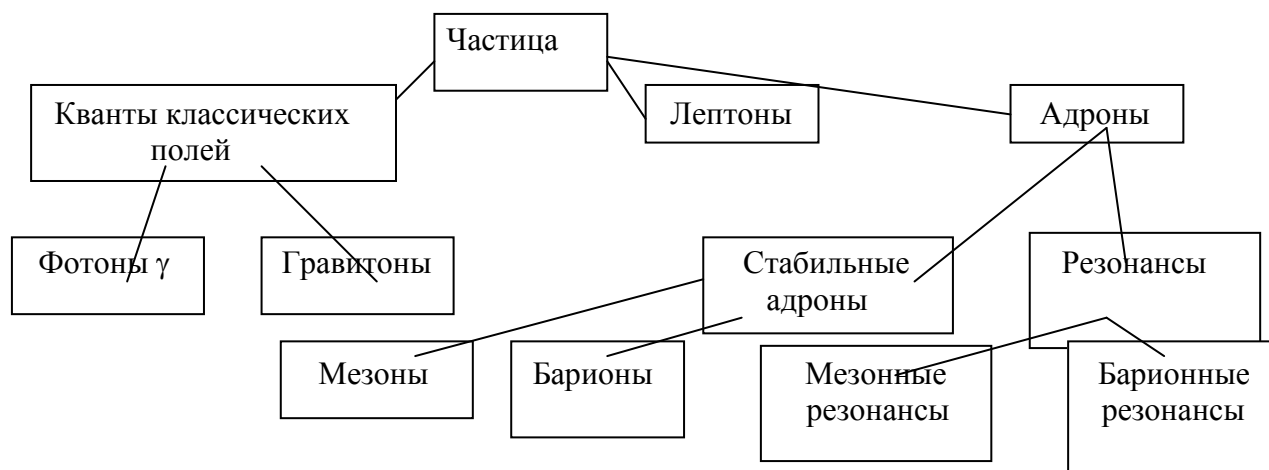


Рис. 9

8.4. Законы сохранения в физике.

Законы сохранения устанавливают равенства между определенными комбинациями величин, характеризующих начальное и конечное состояния. При этом для выполнимости закона детали поведения системы в промежуточные моменты времени совершенно несущественны.

Согласно теореме Э.Нётер (1918) законы сохранения связаны с принципами инвариантности. В последних находят свое выражение геометрические симметрии (свойства пространства - времени) или внутренние симметрии (общие свойства взаимодействия). Поэтому законы сохранения имеют как практическое, так и мировоззренческое значение.

Рассмотрим вначале законы сохранения в классической физике.

1. Законы сохранения непосредственно вытекают из динамических уравнений, определяющих эволюцию системы, играют подчиненную роль и служат для упрощения динамических уравнений.

2. Законы сохранения выступают, как правило, в качестве “законов разрешения”, определяя, что в принципе может происходить с системой.

3. Число законов сохранения в классической физике строго ограничено (например, в механике – энергии, импульса, момента импульса). Они связаны со свойствами симметрии только пространства – времени.

4. В классической физике оперируют точными свойствами симметрии пространства – времени и, как следствие, соответствующими им строгими законами сохранения.

В квантовой физике, особенно в физике высоких энергий, ситуация может быть существенно иной.

1. Исходные динамические уравнения зачастую неизвестны. Поэтому законы сохранения, которые формулируются вне связи с какими-либо динамическими уравнениями или моделями, являются по существу единственным источником информации о свойствах и поведении частиц.

2. Законы сохранения в квантовой механике играют как правило роль принципов запрета. Они определяют, что не может происходить с системой.

3. Арсенал законов сохранения в квантовой физике богаче, чем в классической.

4. В середине 50-х годов было установлено, что некоторые величины сохраняются не во всех взаимодействиях, а только во вполне определенных. Поэтому в микромире имеет место большое число приближенных по своей сути законов сохранения.

8.5. Классификация частиц. Фундаментальные частицы.

Все реально наблюдаемые частицы разбиваются на два класса – лептоны и адроны (особый класс составляют переносчики фундаментальных взаимодействий – глюоны, фотоны, промежуточные бозоны, гравитоны).

Лептоны – претенденты на роль истинно элементарных частиц. Во-первых, их всего 6 (если не считать античастицы), во-вторых, они стабильны, в-третьих, они ведут себя как точечные объекты, не обнаруживая никаких размеров и внутренней структуры.

Иначе обстоит дело с адронами. Одну из классификационных схем адронов предложили в 1961 году М.Гелл-Манн и Ю.Нееман. Она получила название восьмеричного пути, поскольку она оперирует восемью квантовыми числами.

Название “восьмеричный путь” позаимствовано из буддийской религии: “И вот, о братья, благородная истина, которая ведет к прекращению страданий, вот благородный восьмеричный путь: правильные взгляды намерения, речь, действия, правильная жизнь, правильные усилия, правильное расположение ума, правильное сосредоточение”.

Все адроны распределяются по семействам – так называемым унитарным мультиплетам.

Классификация фундаментальных частиц представлена на рис. 10.

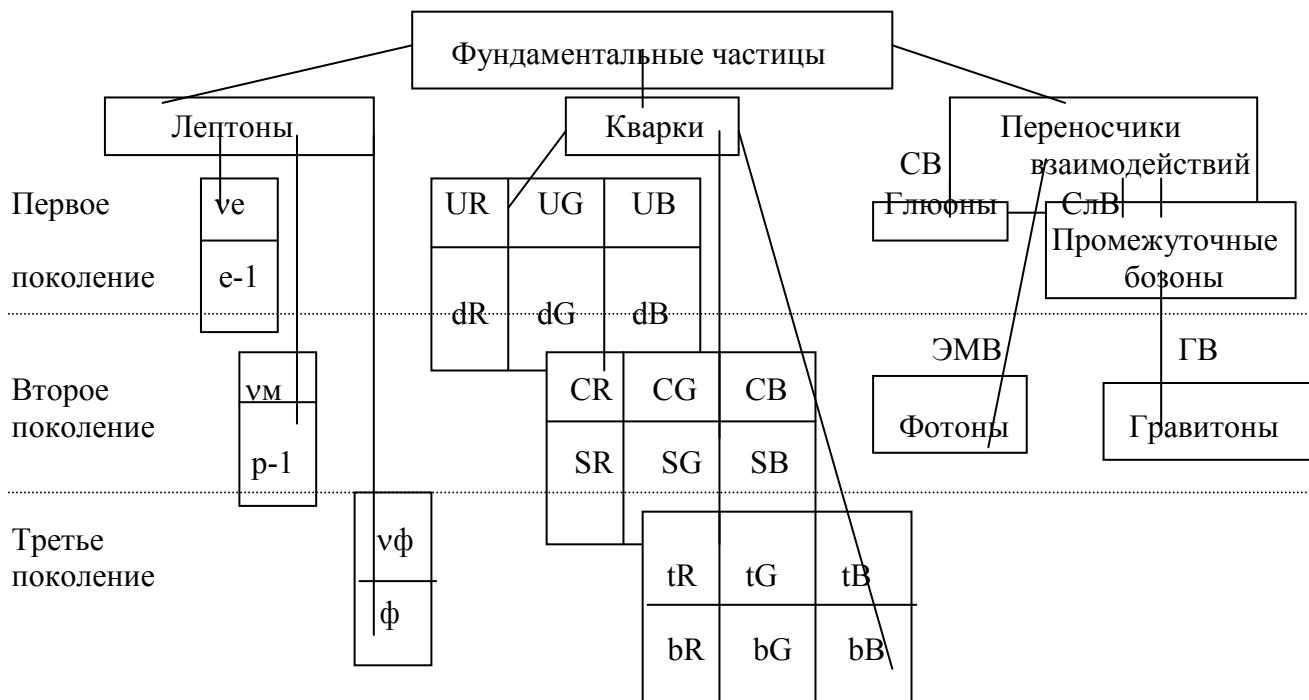


Рис. 10

“Ароматы” кварков: u - верхний (up), d - нижний (down), s - странный (strange), c - очарованный (charmed), t - истинный (truth), b - красивый (beauty), /или дно bottom/.
 “Цвета” кварков: R - красный (red), G - зеленый (green), B - синий (blue).
 Глюон (glue) – клей.

8.6. Модель кварков

Многообразие адронов вызвало потребность не только в их классификации, но и в построении минимальных моделей, в которых все известные частицы можно было бы сконструировать из небольшого числа каких-то фундаментальных частиц или субчастиц. Подобные модели именуется составными.

В качестве таких частиц М.Гелл-Манн и Дж.Цвейг предложили в 1964 году частицы, названные ими соответственно кварками или тузами.

В романе английского писателя Дж.Джойса “Поминки по Финнегану” герою снится сон, в котором чайки кричат “Три кварка для мистера Марка!”

Роман Джойса полон трудной для понимания игры слов. Многое здесь до сего дня не разгадано. В нем описывается биография господина Финна (иногда он появляется в образе господина Марка, хотя зовут его Хэмфри Чимпден Эрвинер). Три кварка – дети господина Финна – его сыновья Шем и Шаун и дочь Изольда. Иногда они выступают в роли самого Финна. Отсюда ясна ассоциация с физикой элементарных частиц. Господин Финн – представляет протон. В определенных ситуациях протон ведет себя так, будто он состоит из трех кварков.

В немецком языке слово “кварк” означает “творог”, а в разговорной речи имеет смысл “чепуха, ерунда”. Гете употребил это слово, вложив его в уста Мефистофеля в первой части Фауста.

Основная особенность кварков – дробный электрический заряд
 $- 2/3 e, - 1/3 e, + 1/3 e$

В дальнейшем были введены также и антикварки.

В рассматриваемой модели барионы конструируются из трех кварков. Например, нейтрон и протон:

$$n = udd, p = uud \quad (51)$$

Антикваркам приписывают антицвета $\bar{R}, \bar{G}, \bar{B}$, называемые иногда Т (turquoise) – бирюзовыми, М (magenta) – пурпурными, Y (yellow) – желтым. R, G, B - основные цвета, дающие при смешивании белый цвет (каждый антицвет является дополнительным к своему цвету). Добавочное правило может быть сформулировано следующим образом: все реально наблюдаемые адроны обязаны быть белыми.

Подведем некоторые итоги:

1. Имеются, по крайней мере, две группы истинно элементарных частиц – лептоны, непосредственно регистрируемые на опыте, и кварки, составляющие адроны.
2. Как адроны, так и кварки выступают в шести разновидностях, называемых ароматами.
3. По ароматам лептоны и кварки разбиваются на три пары, именуемые поколениями. В каждом поколении имеются “верхние” и “нижние” частицы.
4. Лептоны считаются белыми, а каждый кварк имеет три цвета.
5. Мезоны конструируются из кварка и антикварка с дополнительными цветами, а барионы из 3 кварков с разными основными цветами, так что наблюдаемые адроны оказываются белыми, как и лептоны.

Таким образом, число истинно элементарных частиц (не считая переносчиков фундаментальных взаимодействий) равно в настоящее время

$$48 = (6 + 6 \times 3) \times 2.$$

Сейчас делаются попытки построения составных моделей лептонов и кварков. Фигурирующие в них частицы именуются по разному – преоны, ришоны.

В одной из преонных моделей кварки конструируются из трех “хромонов” R, G, B (chromatic - цветной), двух “флэйвонов” α и χ (flavour - аромат, α vo - верх, χ to - низ) и трех “фамилионов” fI, fII, fIII (family - семья, поколение).

Современная теория сильного взаимодействия называется квантовой хромодинамикой. Одним из важнейших является вопрос, почему кварки и глюоны до сих пор не зарегистрированы в свободном состоянии.

Кроме того, в теории элементарных частиц имеется еще ряд проблем – обнаружение распада протона (эксперимент века), обнаружение монополя Дирака.

По современным оценкам $\tau_p \sim 1030 \pm 3$ лет. В начале 1954 года был установлен экспериментальный предел

$$\tau_{\text{рэсп.}} > 6,5 \cdot 10^{31} \text{ лет} \quad (52)$$

Подобные измерения сложны, так как нужно убедиться, что за месяц не распадается ни один из 1033 нуклонов, содержащихся примерно в 2000т воды. Соответствующие опыты проводились в СССР (долина р.Баксан, соляная шахта в г.Артемовске), США, Западной Европе, Индии, Японии. Результат (52) получен в США в соляной шахте размерами 23x17x18м³, которую заполняют 8000т воды с рабочей массой 3300т. Она находится на глубине 600м и на шести ее стенках размещены 2048 фотоэлементов. С помощью этой установки надеются найти или исключить нестабильность протонов на уровне $\tau_p \sim 1033$ лет.

В 1931 году П.Дирак высказал гипотезу о существовании элементарной частицы магнетизма – монополя, заряд которого

$$g \approx 68,5 en \quad (53)$$

Если $n = 1$, то $g = 68,5e$. Сила взаимодействия между двумя монополями \sim в $4,7 \cdot 10^3$ раз больше, чем между двумя электронами. Интерес к этим частицам возрос после 1974 года, когда А.М.Поляков и независимо Г.Хофт нашли решение типа монополей.

8.7. Нейтрино

В 1930-31гг. Вольфганг Паули, анализируя энергетические спектры атомных распадов, обнаружил отклонения от закона сохранения энергии. Он предположил, что часть энергии уносится нейтральной элементарной частицей, практически не имеющей массы. В 1934г. Энрико Ферми назвал ее нейтрино (нейтрончик). Первые сообщения об экспериментальном открытии нейтрино появились в 1942, а окончательное признание пришло в середине пятидесятых годов после экспериментальных исследований Фреда Райнса и Клайда Коуэна. В настоящее время известно три типа нейтрино и антинейтрино: электронные ν_e , $\bar{\nu}_e$, мюонные ν_μ , $\bar{\nu}_\mu$ и тау-нейтрино ν_τ , $\bar{\nu}_\tau$. Теория предсказывает существование четвертого типа так называемых стерильных нейтрино.

Нейтрино обладают чрезвычайно высокой проникающей способностью, поэтому их очень трудно регистрировать. Нейтрино может пройти расстояние ~ 100 световых лет в веществе с плотностью воды, не взаимодействуя с ним. Они возникают в результате вполне определенных ядерных реакций. По некоторым оценкам нейтрино во Вселенной не меньше, чем фотонов. Так мощный поток нейтрино испускает Солнце. Расчет в рамках Стандартной модели дает $1,8 \cdot 10^{38}$ нейтрино/с. Однако, измерения дают $\sim 0,6 \cdot 10^{38}$ нейтрино/с.

Такие расхождения можно объяснить следующими причинами:

- на Солнце идут процессы, не отвечающие Стандартной модели;
- нейтрино на своем пути испытывают распад или периодические превращения из одного типа нейтрино в другой (так называемые осцилляции)

Основоположником физики нейтрино высоких энергий был акад. Бруно Понтекорво. В Японии построен детектор нейтрино “Суперкамаиаканде” - емкость высотой 40м и диаметром 39м, заполненная дистиллированной водой и установленная в шахте, глубиной ~ 1 км. Нейтрино, реагируя с веществом, порождают ливни вторичных частиц высоких энергий, вызывающих черенковское свечение, которое регистрируется 13 тыс. фотодетекторов. За 450 дней непрерывной работы детектора было зарегистрировано и обработано на ЭВМ 47 тысяч следов. Оказалось, что число нейтрино, которые пронизывают Землю, почти в два раза отличается от числа нейтрино, приходящих из атмосферы (рис. 11).

На пути примерно в 13 тыс.км. сквозь толщину Земли часть электронных и мюонных нейтрино превращается в нейтрино другого типа, возможно, стерильные, что можно объяснить только наличием у нейтрино массы. Этот факт, по-видимому, позволит разрешить загадку скрытой массы Вселенной. Дело в том, что массы галактик, вычисленные по светимости звезд, оказались в несколько раз меньше масс, измеренных по гравитационному взаимодействию. Может оказаться, что тяжелые нейтрино составляют до 96% массы всей Вселенной.

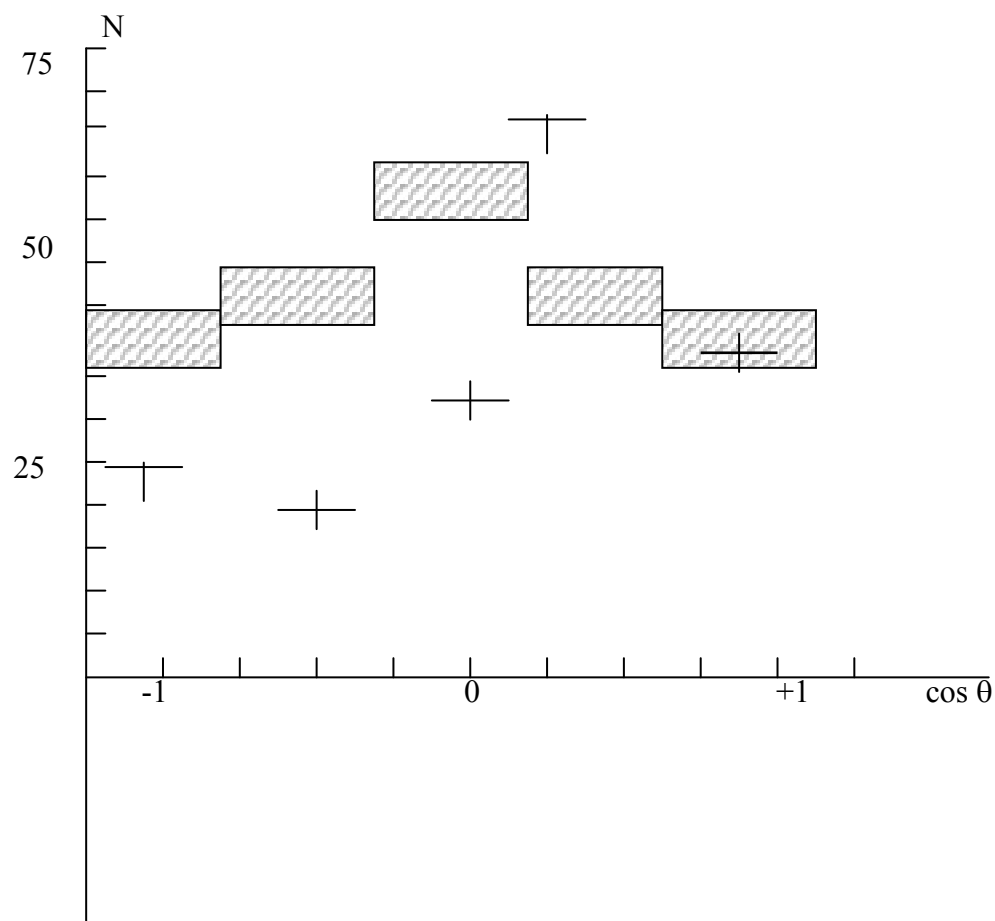


Рис. 11. Результаты измерений количества N нейтрино, прилетевших из атмосферы ($\cos \theta = 1$) и прошедших сквозь Землю ($\cos \theta = -1$)

—+— - экспериментальные данные;

 - теоретический расчет.

8.8. Значение физики элементарных частиц.

Студенты часто задают вопросы: “зачем это нам нужно?”, “Оправданы ли затраты на исследования?”. На первый вопрос можно ответить: “Подождите!”. Не было ни одного открытия в физике в прошлом, которое не оказало бы влияния на другие науки. Поэтому не следует сейчас говорить о пользе физики элементарных частиц в практическом смысле. Ведь физика не только прикладная, но и мировоззренческая наука. Прогресс в области физики элементарных частиц как ни в какой другой области, содействует общему прогрессу в познании природы. Ответ на второй вопрос дал акад. Л.Окунь: “В некотором смысле затраты на физику высоких энергий напоминает затраты на детей. Без детей невысказано будущее человечества, без физики элементарных частиц невысказано будущее науки”.

Возникает еще один вопрос: может ли появиться окончательная физическая теория, после которой уже не будут нужны новые теории, то есть не будут ли исчерпаны одной теорией все законы природы?

Для создания любой теории необходимы два условия:

- наличие новой информации – экспериментальной (в частности, относящиеся к ядерной и субъядерной материи);
- наличие соответствующего математического аппарата.

По последнему поводу П.Дирак писал:

“Наши математические усилия позволяют пока понять во Вселенной лишь немного. Но развивая все более совершенные математические методы, мы можем надеяться на лучшее понимание Вселенной”.

Существуют две точки зрения на развитие физической науки. Так, А.Эйнштейн считал, что “наши представления о физической реальности никогда не могут быть окончательными”.

Р.Фейнман придерживается иных взглядов: “... трудно рассчитывать на постоянную смену старого новым, скажем, в течение ближайших 1000 лет. Не может быть, чтобы это движение вперед продолжалось вечно и чтобы мы могли открывать все новые и новые законы. Ведь если это было бы так, то нам быстро надоело бы все это бесконечное наложение знаний. Мне кажется, что в будущем произойдет одно из двух. Либо мы узнаем все законы, т.е. будем знать достаточно законов для того, чтобы делать все необходимые выводы, а они всегда будут согласовываться с экспериментом, на чем наше движение вперед закончится. Либо окажется, что проводить новые эксперименты все труднее и дороже, так что мы будем знать о 99,9% всех явлений, но всегда будут такие явления, которые только что открыты, которые трудно наблюдать и которые расходятся с существующими теориями, а как только вам удалось объяснить одно из них возникает новое, и весь этот процесс становится все более медленным и все менее интересным. Так выглядит второй вариант конца. Но мне кажется, что так или иначе, но конец должен быть”.

По моему мнению представить себе “конец” физической науки так же трудно как и возможность ее “бесконечного” развития. Не следует при этом забывать, что развитие физики связано с развитием других наук, общества, экологии. А потому уместно закончить формулировкой 4 законов экологии по Б.Коммонеру:

Все связано со всем.

Все куда-нибудь должно деваться.

За все надо платить.

Природа знает лучше!

Заключение

В заключении курса остановимся на 3 вопросах:

1. Нужна ли физика вообще,
2. Какие задачи предстоит ей решать в ближайшем будущем,
3. Взаимоотношение физики и религии.

1. Ответ на первый вопрос очевиден. Великий английский физик Резерфорд Э. предложил следующую классификацию наук:

“Все науки делятся на физику и коллекционирование марок.”

Достаточно перечислить такие термины как астрофизика, биофизика, химическая физика, прикладная (техническая) физика, радиотехника, электротехника, сопротивление материалов и т.д. и т.п. Незнание физики губительно не только для инженера, но и для государственного деятеля, ибо такие законы как принцип Ле-Шателье – Брауна (III закон Ньютона), законы сохранения (принцип запрета), II начало термодинамики (все портится) являются универсальными. Именно физики первыми предсказали неизбежный распад Советского Союза, используя модель системы с отрицательной температурой, которая может существовать сколь угодно долго пока является изолированной (пока существует “железный занавес”) и разваливается при наличии контакта с другими системами, имеющими положительную температуру.

Если перефразировать М.В.Ломоносова, то можно сказать: “Широко простирает физика свои руки во все науки”.

В качестве примера важности физики для техники приведем использование ее методов для неразрушающей диагностики технических систем, медицины, техники.

Неразрушающая диагностика – это прикладная наука, с помощью которой проверяется соблюдение качества материалов, надежность деталей и узлов, безопасность работы технических систем в целом в процессе изготовления, эксплуатации, регламентных работ. Одной из главных причин, снижающих качество продукции являются скрытые дефекты, не установленные при контрольных испытаниях в процессе изготовления. При этом под дефектом понимаются любые отклонения от заданных физических или других свойств изделия в целом или каких-либо его частей.

Непрерывное совершенствование стандартов и технических условий на выпускаемые изделия обнаружило несоответствие между выдвигаемыми к изделиям требованиями и методами неразрушающего контроля, а также недостаточное понимание принципов, на которых основаны эти методы.

“- Неразрушающие испытания дают сигналы, которые богаты информацией, но многие из них воспринимаются как бы выраженными на иностранном языке, словарь которого неизвестен.”

Общие принципы

Дефект может быть обнаружен, если является локальной неоднородностью среды, т.е. если он по своим физическим свойствам – плотность, импеданс, акустическое сопротивление, показатели преломления, поглощения, отражения и т.д. – отличается от окружающей среды.

Методы диагностики можно условно разделить на две категории – активные и пассивные. В первом случае объект подвергается внешнему воздействию (электромагнитному, акустическому, температурному, механическому) и исследуется его отклик на это воздействие. Во втором случае источником информации служит собственное “излучение” объекта.

Требования к методам

Достоверность контроля.

Оперативность.

Реализуемость в производственных условиях.

Экономичность.

Возможность автоматизации процесса контроля.

Безопасность для персонала.

Экологическая чистота.

В практике широко используются различные методы НК качество материалов, основанные на использовании проникающих излучений (рентгеновских и γ -лучей), ультразвуковых и звуковых колебаний, магнитных и электромагнитных полей, оптических спектров, явлений капиллярности и т.д. Краткая характеристика некоторых из них приведена в таблице 1.

Таблица 1

№№	Сущность метода	Достоинства	Недостатки
1	2	3	4
1.	Оптовизуальный метод. Основан на различном отражении света от неоднородностей поверхности контролируемого объекта. Используется для внешнего осмотра на всех этапах изготовления и эксплуатации.	Простота, несложное оборудование, небольшая трудоемкость.	Малая чувствительность, недостаточная надежность.
2.	Радиационные методы - основаны на зависимости параметров проникающего ионизирующего излучения (рентгеновского, γ - и β -лучей, потока нейтронов), взаимодействующего с контролируемым объектом, от наличия или отсутствия дефектов. Наиболее распространенным является рентгеновский метод.	Используется для обнаружения объектов. Высокая точность и надежность результатов	Сложность оборудования, необходимость соблюдения особых мер и средств техники безопасности, экологическая опасность.
3.	Магнитные методы основаны на регистрации магнитных полей рассеяния над объектами. К ним относятся: Магнитопорошковый, магнитографический, магнитоиндукционный, феррозондовый и др.	Обнаружение поверхностных и подповерхностных дефектов в деталях различной формы. Надежность при выявлении поверхностных трещин, контроля сварных швов, измерения толщины листов и стенок сосудов при двустороннем доступе	Ограниченный круг материалов – ферромагнетики. Необходимость использования магнитных порошков и суспензий.
4.	Метод вихревых токов основан на регистрации распределения вихревых токов, наводимых электромагнитным преобразователем в контролируемом объекте.	Возможность обнаружения поверхностных дефектов в магнитных и немагнитных материалах, измерения толщины листов, диаметров проволоки.	Малая глубина контроля.

Таблица 1 – Продолжение

5.	Методы проникающих жидкостей основаны на регистрации поверхностных дефектов с помощью явлений капиллярности, сорбции (поглощении твердым телом или жидкостью какого-либо вещества из окружающей среды). На очищенную поверхность детали наносят проникающую жидкость, которая заполняет полости поверхностных дефектов. Затем жидкость удаляют, а оставшуюся в полостях дефектов обнаруживают с помощью так называемого проявителя. Различают: цветной, люминисцентный, люминисцентно-цветной, фильтрующихся частиц, радиоактивных жидкостей и др.	Высокая чувствительность, простота контроля, наглядность результатов, возможность использования в широком диапазоне температур.	Малая глубина контроля, необходимость использования в совокупности с другими методами контроля.
6.	Методы оптической голографии и когерентной оптики. Голография – это метод регистрации произвольного колебательного процесса, позволяющий зафиксировать как амплитуду, так и фазу колебания, а затем воспроизвести их в любой удобный момент. Основан на сравнении произвольных малых изменений формы реального объекта с его первоначальным состоянием, записанным на первоначальной голограмме – трехмерном шаблоне.	Возможность точного измерения деформаций произвольных структур при воздействии механических нагрузок или температурных градиентов, исследования характера вибраций поверхности объекта, оперативной регистрации структурных изменений.	Сложная техника и аппаратура, используемая пока только в лабораторных условиях. Малая глубина контроля.
7.	Радиотехнические СВЧ-методы основаны на использовании взаимодействия радиоизлучения СВЧ-диапазона (1 мм – 1 м) с материалом контролируемого объекта. В длинноволновой части он граничит с областью, в которой используются вихревые токи, а в коротковолновой – с инфракрасным излучением.	Биологическая безопасность, высокая разрешающая способность.	Возможность использования только для контроля внутренней структуры диэлектриков или поверхности проводников.

Таблица 1 – Продолжение

8.	<p>Акустические методы основаны на зависимости параметров упругих колебаний, возбуждаемых в контролируемом объекте.</p> <p>8.1. Импедансный метод Основан на использовании зависимости полного механического сопротивления (импеданса) контролируемого изделия от качества соединения отдельных его элементов между собой.</p>	<p>Относительная простота и доступность, высокая точность, биологическая и экологическая безопасность. Возможность контроля по всему объему изделия. Позволяет обнаружить зоны нарушения жесткой связи между элементами слоистых конструкций.</p>	
	8.2. Метод свободных колебаний основан на анализе частотного спектра свободных колебаний в системе, возбужденной ударом.	Возможность контроля слоистых конструкций.	Неуниверсальность метода.
	8.3. Импульсный эхо-метод основан на посылке в контролируемое изделие коротких импульсов высокочастотных колебаний и регистрации интенсивности и времени прихода эхо-сигнала, отраженных от дефектов или границ объекта контроля.	Необходимость доступа к контролируемому объекту с одной стороны.	
	8.4. Теневой метод основан на эффекте акустической тени, образующейся за дефектом вследствие отражения и рассеяния упругих колебаний.	Возможность использования для контроля качества листового проката плит, профилей и т.д.	Необходимость доступа к контролируемому объекту с обеих сторон.
	8.5. Резонансный метод основан на использовании зависимости параметров упругих колебаний в условиях резонанса от наличия дефекта в контролируемом объекте.	Использование для измерения толщины изделия при одностороннем доступе, выявления зон коррозионного поражения, непропая и непроклея.	Сравнительно небольшой диапазон толщин контролируемых изделий.
	8.6. Акустическая эмиссия. Метод основан на регистрации и обработке акустических сигналов, излучаемых объектом контроля при его деформации и разрушении.	Возможность отсутствия контакта измерительных преобразователей с объектом контроля, прогнозирования динамики дефектов	Сложность регистрации полезных сигналов и их выделения на фоне разнообразных помех.

	<p>8.7. Акустоупругость Основной метод акустической тензометрии, основанный на зависимости параметров акустической волны, в первую очередь, скорости распространения и поляризации от величины механических напряжений.</p>	<p>Принципиальная возможность определения всех компонент тензора напряжений и визуализации картины напряженно-деформируемого состояния по всему объему контролируемого объекта.</p>	
--	---	---	--

Таким образом для контроля качества элементов и деталей конструкций существуют многочисленные методы дефектоскопии – неразрушающего контроля.

Естественно ни один из них не является универсальным, не в состоянии удовлетворить всем требованиям. Каждый имеет свою эффективную область применения, вследствие чего в ряде случаев целесообразно комплексное использование различных методов.

Выбор того или иного метода неразрушающего контроля определяется конкретными требованиями практики и зависит от следующих факторов:

- материала и конструкции (формы, размеров) контролируемого объекта;
- состояния его поверхности;
- характера дефектов, подлежащих определению;
- условий контроля;
- технико-экономических показателей.

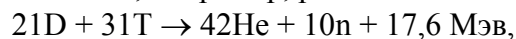
В каждом случае должен быть составлен алгоритм и разработаны частные методики контроля.

2. Укажем на некоторые проблемы, которые потребуют своего решения в недалеком будущем.

2.1. Макрофизика

2.1.1. Управляемый синтез

Проблема будет считаться решенной, если удастся использовать для нужд энергетики ядерные реакции синтеза, например, реакции



Усилия, затрачиваемые на решение данной проблемы, оказываются плодотворными в более широком плане – они стимулируют многочисленные исследования, порождают новые методы и подходы.

2.1.2. Высокотемпературная проводимость

Сверхпроводимость была открыта в 1911г. и долгие годы оставалась не только самым загадочным явлением, но и не находила почти никакого применения, что объясняется тем, что она наблюдалась вплоть до последнего десятилетия только при очень низких температурах (у первого проводника – ртути – критическая температура $T_c = 4,15K$).

В последние годы ситуация радикально изменилась – открыты сверхпроводники с критической температурой в интервале $-20 \div +20^\circ\text{C}$.

2.1.3. Новые вещества (проблема создания металлического водорода и некоторых других экзотических материалов).

В обычных условиях водород состоит из молекул, кипит при $T_k = 20,3\text{K}$ и затвердевает при температуре $T_p = 14\text{K}$. Плотность такого водорода 76 кг/м^3 и он является диэлектриком. При сильном сжатии внешние оболочки оказываются “раздавленными”, все вещества должны переходить в металлическое состояние. Возможно, металлический водород является сверхпроводящим, причем с высоким значением T_c , достигающим $100 \div 300\text{K}$.

2.1.4. Разработка физических основ теории разрушения материалов.

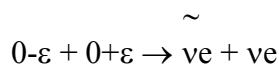
2.1.5. Получение далеких трансурановых элементов (в частности 294110Z , 298114Z).

2.2. Микрофизика. Жизнь была прекрасна до 1932г., когда были известны лишь три “элементарные” частицы – электрон, протон, фотон.

В настоящее время “зоопарк” частиц насчитывает, по-видимому несколько сотен, и понятие элементарности теряет смысл.

2.2.1. Поиск фундаментальных частиц (кварки, глюоны, монополю Дирака).

2.2.2. Поиск гипотетических частиц. В 1993г. А.Б.Озолиньш (Латвия, Рига) и А.Н.Куценко в совместной неопубликованной работе “L`hypothese d`electrino” высказали предположение о существовании двух элементарных частиц, которые они называли “электрино $0-\varepsilon$ ” (маленький электрон, электрончик) и “позитрино $0+\varepsilon$ ” (маленький позитрон, позитрончик), с электрическим зарядом и спиновым числом, равным соответствующим характеристикам электрона и позитрона и массой электронного нейтрино m_ν . Они предложили возможную схему аннигиляции этих частиц



и высказал предположение, что “электрино так же неисчерпаемо: как и электрон” (шутка!).

Недостаточное знакомство с современными теориями элементарных частиц и физикой высоких энергий не позволило упомянутым авторам описать свойства электрино и позитрино, указать способы их возможной регистрации. По оценкам профессора Голопупенко Б.А. эксперименты по обнаружению этих частиц могут обойтись в 200 млрд. долларов, что отодвигает их поиск на конец XXI века.

3. Вопрос о взаимоотношениях физики и религии является очень сложным и вплотную примыкает к решению основных задач физики:

из чего состоят колеса (мироздания),
почему они крутятся?

Проще всего его решает вульгарный атеизм: “Бога нет – это медицинский факт” (Остап Бендер). Если говорить серьезно, то имеются несколько проблем, решить которые трудно.

3.1. Есть ли в мироздании что-либо кроме материи?

Естествоиспытатели утверждают, что в мире существует только движущаяся материя (вещество, поле), важнейшими характеристиками которых являются энергия и энтропия.

Возражения христианской религии: ни вещество ни энергия не обладают возможностью самоорганизации. Если бы из нашего существующего и организованного мира исчезло бы некое управляющее и упорядочивающее начало, то за очень короткий срок все пришло бы к полному хаосу: о чем говорит II начало термодинамики. Любые признаки

порядка или же диктующие такой порядок явления во Вселенной еще говорят о том, что отдаленные на расстояния, большие, чем примерно 12 млрд. световых лет.

В 1929г. Г.Э.Хаббл обнаружил, что в космосе “все разбегаются”: галактики разбегаются со скоростями, пропорциональными расстояниям до них, что напоминает скорости разлета осколков при взрыве бомбы. Этим образом подсказан термин “большой взрыв” (The Big Bang).

Один из ведущих астрономов нашего времени Роберт Джастроу в книге “Бог и астрономы” пишет:

“... как обнаружили астрономы ВСЕЛЕННАЯ ИМЕЛА НАЧАЛО. То есть, во времени был какой-то момент, до которого Вселенной еще не существовало... Исследования показывают, что Вселенная образовалась в результате взрыва. Богословы, как обычно, были в восторге, получив очередное доказательство того, что Вселенная имела начало, астрономы же, как это ни странно, огорчилось... Это обыкновенная реакция научного мышления (якобы абсолютно объективного) на новые данные, которые расходятся с фундаментальными положениями, когда новые данные не вписываются в уже готовую картину их мировоззрения. Они начинают нервничать, пытаются делать вид, что никакого противоречия вовсе нет, или стараются прикрыть его глубокомысленными, но бессмысленными заявлениями.

Богословы утверждают: “нечто”, сотворившее Вселенную, должно обладать силой большей, чем все силы во Вселенной, а также, что “оно” не только разумно, но способно мыслить на уровне, во много раз превышающем наш собственный. Следствие не может быть больше причины, иначе какая-то часть появилась беспричинно, произошла из ничего. Но поскольку ничего не возникает из ничего, постольку следствие не может быть больше причины. Материя не обладает возможностью самоорганизации. Без упорядочивающего влияния она стремится к состоянию максимального беспорядка. Для того, чтобы принести в наш материальный мир порядок, нужен РАЗУМ. Если Вселенная не могла создать себя сама, то ее могло создать нематериальное, обладающее интеллектом, превосходящим тот, который существует где-то внутри Вселенной.

Возражения естествоиспытателей: предположим Вселенная имеет Творца. Но откуда же взялся Он сам?

Богословы отвечают: для образования Вселенной должна быть какая-то причина; ведь когда-то ее не было, а потом она появилась. Если у всего существующего есть причина, то должно быть что-то не вся Вселенная тяготеет к самоорганизации. Она не способна создавать порядок и, значит, причина упорядоченности должна лежать за пределами Вселенной.

Кроме того, если вещество и энергия стремятся к максимальному беспорядку, а Вселенная в настоящее время вполне организована, то это означает, что “стремление к беспорядку” существовало не всегда и не вечно. Это, в свою очередь, приводит нас к заключению, что материя не существовала всегда, и был такой момент, когда ее не было вовсе. Если материя не вечна, то должно быть что-то иное, существующее вечно, потому, что ничто не происходит из ничего, и если нет ничего, кроме материи, то до ее возникновения должно было существовать какое-то “нечто”.

Возражения физиков: мы ничего не знаем об этом “нечто”: а наши утверждения только тогда имеют смысл, когда мы опытным путем можем доказать их истинность, поскольку физика – наука опытная”.

Согласно бельгийскому физiku Илье Пригожину существование жизни на Земле является одним из примеров, когда энтропия может уменьшаться в ограниченной области ценой заметного увеличения ее в другом месте. При этом И.Пригожин ссылается на пример так называемой неустойчивости Бернара. Если слить вместе холодную и горячую воду, температура ее начнет выравниваться. Если же нагревать сосуд с водой, то можно вызвать непрерывный подъем горячей жидкости, тогда как более “тяжелая” холодная вода будет спускаться вниз. Кроме того, наблюдается выделенное движение конвективных потоков,

препятствующих встрече горячей воды с холодной. Таким образом, происходит разделение горячей и холодной воды и появление локальной упорядоченности. Это происходит за счет энергии нагревателя, которая рассеивается в окружающее пространство, проходя через сосуд и вызывая рост энтропии. Заменяв нагреватель Солнцем, а сосуд Землей с ее поразительным богатством химических соединений, мы можем получить удивительным образом организованные структуры. Таким образом согласно Пригожину жизнь есть следствие энтропического разбазаривания энергии Солнца или какой-либо другой Звезды.

3.2. Происхождение Вселенной. Теория большого взрыва.

Ограниченному человеческому мозгу невозможно представить бесконечную в пространстве и времени Вселенную. Не менее трудно представить себе ограниченную Вселенную, имевшую начало. Каковы же размеры Вселенной? Согласно представлениям современной космологии и имеющимся наблюдательным данным, невозможно увидеть объекты, не имеющие причины, независимые. Должна быть ПЕРВОПРИЧИНА. Если допустить, что причинно-следственная цепь существует, то у нее должно быть начало, то, что Платон и Аристотель называли “беспричинной причиной”. Когда христиане говорят о Боге, они имеют в виду именно “беспричинную причину”, хотя подразумевают нечто большее – личность мудрую, добрую, справедливую и полную любви. Хотя высказывания Библии о природе не носят научного характера, все же они не противоречат научным открытиям последних лет.

И все-таки, каково мнение физиков: можно ли доверять теории большого взрыва? Многие физики считают ее “ЗАХВАТЫВАЮЩЕЙ РАБОЧЕЙ ГИПОТЕЗОЙ”.

Подробнее с затронутыми проблемами можно ознакомиться в книгах:

1. В.Л.Гинзбург “О физике и астрофизике”, М. “Наука”, 1985г.
2. И.Д.Новиков “Эволюция Вселенной”, М. “Наука”, 1983г.
3. Т.Редже “Этюды о Вселенной”, “Мир”, 1985г.
4. И.Л.Герловин “Основы единой теории всех взаимодействий в веществе”. Л., Энергоатомиздат, 1990г.