

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ТАТАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГУМАНИТАРНО-  
ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Р.Х. САФАРОВ**

**ФИЗИКА  
АТОМНОГО ЯДРА  
И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ  
ЧАСТИЦ**

*(С приложениями к живым системам)*

W 010

**Казань  
2008**

УДК 539.17

ББК 22.38

С 21

*Печатается по решению учебно-методического совета физического факультета Татарского государственного гуманитарно-педагогического университета*

**Научный редактор:** *Р.М. Юльметьев* – доктор физ.-мат. наук, проф.

**Рецензенты:** *Ю.А. Нефедьев* – доктор физ.-мат. наук, проф. (КГУ);  
*А.С. Ситдиков* – кандидат физ.-мат. наук, доц. (КГЭУ).

**Сафаров Р.Х.** Физика атомного ядра и элементарных частиц:  
**С 21** учебное пособие для студентов педагогических вузов. – Казань:  
РИЦ «Школа», 2008. – 280 с.

**ISBN 5-94712-015-1**

Учебное пособие составлено на основе лекций, практических и индивидуальных занятий, проводимых проф. Сафаровым Р.Х. на кафедре теоретической физики в ТГГПУ. Пособие разбито на 3 части (модули), по которым проводится контроль знаний студентов в виде контрольной работы и компьютерного тестирования. С целью оказания помощи студенту в освоении материала каждая тема пособия завершается заданием контрольных вопросов для самоконтроля знания. Для овладения основными приемами решения задач в конце каждой темы приводится подробный разбор решения типичных задач, а затем задаются задачи для самостоятельного выполнения. В приложении приведены таблицы всех известных к настоящему времени изотопов химических элементов и элементарных частиц с их характеристиками. Эти данные могут быть использованы при проведении практических занятий.

В пособии рассматриваются некоторые проблемы биологического воздействия излучений радиоактивных изотопов на организм человека и современное состояние радиационной безопасности населения.

Пособие предназначено для студентов физического факультета педагогических вузов.

© Р.Х. Сафаров, 2008 г.

**ISBN 5-94712-015-1**

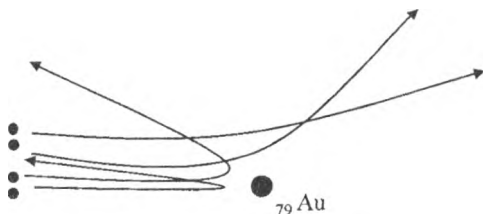
© Оформление РИЦ «Школа», 2008

# Часть I. Физика атомного ядра

## Глава 1. Свойства атомных ядер

### 1.1. Опыт Резерфорда. Открытие атомного ядра, протона и нейтрона. Гипотеза о нейтрон-протонной структуре ядра

История открытия атомного ядра начинается с опытов Резерфорда и его учеников, когда было доказано существование в атоме массивного центра, названного **ядром**. Резерфорд, изучая явление прохождения  $\alpha$ -частиц через вещество, обнаружил рассеяние  $\alpha$ -частиц на большие углы вплоть до  $180^\circ$ , т.е. рассеяние назад. Такое рассеяние возможно только от массивного центра внутри атома.



$\alpha$ - частицы

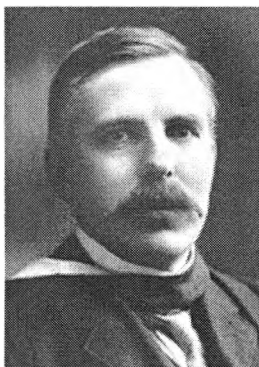
Рис.1.1. Рассеяние  $\alpha$ -частиц на ядре  ${}_{79}\text{Au}$

Для теоретического описания этих результатов он в 1911 г. формулирует **планетарную модель строения атома**, согласно которой - внутри атома имеется положительно заряженное **ядро** малых размеров, в котором сосредоточена почти вся масса атома, а вокруг ядра обращаются электроны.

В рамках этой модели Резерфорд выводит знаменитую формулу

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{z^2 Z^2 e^4}{16E_\alpha^2} \cdot \frac{1}{\sin^4 \chi/2}, \quad (1.1)$$

где  $ze$  и  $E_\alpha$  - электрический заряд и кинетическая энергия  $\alpha$ -частицы, а  $Ze$  - заряд ядра.



**Резерфорд Эрнест (1871-1937)** - основоположник ядерной физики. Родился в Новой Зеландии. Переехав Англию, работал в 1895-98 в Кавендишской лаборатории у Дж.Дж. Томсона. В 1898-1907 работая профессором в Канаде, делает фундаментальные открытия: открыл  $\alpha$ - и  $\beta$ -лучи, разработал теорию радиоактивного распада, установил закон радиоактивных превращений. Вернувшись в Англию, стал директором Кавендишской лаборатории, которая стала ведущим центром ядерной физики. Установил закон рассеяния  $\alpha$ -частиц в 1911, что привело к открытию ядра в атоме. В 1919 осуществил первую ядерную реакцию и открыл протон. Лауреат Нобелевской премии по химии за 1908.

Сотрудники Резерфорда Х. Гейгер и З. Марсден в течение двух лет, проводя трудоемкие эксперименты, подтверждают правильность формулы Резерфорда. Термин **ядро** был введен Резерфордом в 1912 г.

В 1919 г. Резерфорд осуществил первую ядерную реакцию, пропуская через азот  $\alpha$ -частицы, получаемые от радиоактивного вещества, и открыл **протон**.

В 1932 г. английский физик Дж. Чадвик открыл существование **нейтрона**, и в том же году Д.Д. Иваненко и Гейзенберг выдвинули идею **нейтрон-протонной структуры атомного ядра**, которая полностью оправдалась.

Согласно современным представлениям атомное ядро с массовым числом  $A$  состоит из  $Z$  протонов и  $N$  нейтронов так, что  $A = Z + N$  и обозначается  ${}_Z^AX_N$ , например,  ${}_{92}^{238}\text{U}_{146}$ . Уже ранние опыты Резерфорда показали, что размеры ядра очень малы  $\sim 10^{-15}$  м и слабо зависят от массового числа  $A$ . Эту зависимость можно вывести из гидродинамической модели атомного ядра, согласно которой атомное ядро рассматривается, как капля несжимаемой жидкости. Тогда объем ядра, состоящего из  $A$  протонов и нейтронов с объемом  $v$  каждый, равен



$$Av = \frac{4}{3} \pi R^3. \quad (1.2)$$

Откуда находим зависимость радиуса ядра от массового числа

$$R = r_0 A^{1/3}, \quad (1.3)$$

где  $r_0 = \sqrt[3]{3v/4\pi} = \text{const}$ . Из многочисленных экспериментов следует усредненное значение  $r_0 = 1,3 \text{ фм}$ , где  $1 \text{ ферми} = 1 \text{ фм} = 10^{-15} \text{ м}$ . Размеры самого легкого  ${}^1_1\text{H}$  и самого тяжелого  ${}^{238}_{92}\text{U}$  ядер различаются всего в 6 раз.

## 1.2. Составные части атома

Атом химического элемента с порядковым номером  $Z$  в периодической таблице Менделеева и с атомной массой  $A$  состоит из ядра с зарядом  $+Ze$  ( $e$  - элементарный заряд) и массой  $Am_{\text{H}}$  ( $m_{\text{H}}$  - масса атома водорода), и облака электронов с общим зарядом  $-Ze$ .

Атом в целом электрически нейтрален и имеет размеры  $\sim 10^{-10}$  м. Атомное ядро содержит  $Z$  протонов и  $A - Z = N$  нейтронов и имеет размеры  $\sim 10^{-15}$  м.

Электрон  $e^-$ , открытие которого приписывается Дж. Дж. Томсону (1897 г.). В действительности открытие электрона растянулось на более столетия. В его открытие принимали участие многие ученые, начиная с М. Фарадея, установившего законы электролиза. Только в опытах Р. Милликена в 1911 году было установлено точное значение заряда электрона, абсолютная величина  $e$  которого была отождествлена с элементарным зарядом

$$-q_e \equiv e = 1,6021893(\pm 46) \cdot 10^{-19} \text{ Кл}. \quad (1.4)$$

Масса электрона имеет значение

$$m_e \equiv m = 9,109534(\pm 47) \cdot 10^{-31} \text{ кг}, \quad (1.5)$$

или в энергетических единицах:

$$m = 0,5110034(\pm 14) \text{ МэВ}. \quad (1.6)$$

Электрон обладает спином  $s = 1/2\hbar$ , проекция которого может принимать только 2 значения  $s_z = \pm 1/2\hbar$ . В соответствии с этим

он подчиняется статистике Ферми-Дирака, т.е. является **фермионом**, для которого распространяется принцип запрета Паули.

Электрон не обладает электрическим дипольным моментом, но имеет собственный **магнитный момент**. Согласно релятивистской квантовой механике П. Дирака электрон должен иметь магнитный момент электрона, равный одному **магнетону Бора**

$$\mu_B \equiv \frac{e\hbar}{2m} \approx 9,3 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл.} \quad (1.7)$$

Но экспериментальное значение магнитный момент электрона оказалось незначительно отличающимся от предсказания теории Дирака

$$\mu_e / \mu_B = 1,0011596567(\pm 35). \quad (1.8)$$

Это различие квантовая электродинамика объясняет влиянием физического вакуума, в котором постоянно происходят образование электрон-позитронной пары и ее аннигиляция (поляризация вакуума).

Современная физика рассматривает электрон как истинно элементарную частицу, не обладающую структурой и размерами, по крайней мере

$$R_e < 10^{-18} \text{ м.} \quad (1.9)$$

Электрон является наилегчайшей из всех заряженных элементарных частиц и потому абсолютно стабилен  $\tau_e = \infty$ . Он участвует в электромагнитном, слабом и гравитационном взаимодействиях, но не участвует в сильном взаимодействии, т.к. относится к классу **лептонов**.

**Протон**  $p$  был открыт в 1919 г. Резерфордом. Масса протона равна

$$m_p \approx 1836,2m \approx 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 938,3 \text{ МэВ.} \quad (1.10)$$

Протон имеет положительный заряд  $e$ . Спин протона равен  $s = 1/2\hbar$ , т.е. является **фермионом**. Он обладает **магнитным моментом**:

$$\mu_p \approx 2,79\mu_N, \quad (1.11)$$

где  $\mu_N$  - ядерный магнетон, который в 2000 раз меньше магнетона Бора:

$$\mu_N \equiv \frac{e\hbar}{2m_p} \approx 5.05 \cdot 10^{-27} \text{ Дж / Тл.} \quad (1.12)$$

Согласно теории протон должен обладать магнитным моментом, равным одному ядерному магнетону, а его аномальный магнитный момент указывает на то, что протон является составной частицей. Таким образом, протон обладает внутренней структурой и размерами  $R_p \sim 10^{-15}$  м. Протон участвует во всех взаимодействиях, в том числе и сильном, и относится к классу **адронов**. Протон считается стабильной частицей, но по современной теории Великого Объединения это оспаривается. Современные эксперименты оценивают его время жизни:

$$\tau_p \geq 6,5 \cdot 10^{31} \text{ лет,} \quad (1.13)$$

что на много превосходит возраст Вселенной  $\tau \sim 10^{10}$  лет.

**Нейтрон** открыт Чадвиком в 1932 году, не обладает электрическим зарядом  $q_n = 0$ . Его масса равна

$$m_n \approx 1838,7m \approx 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 939,6 \text{ МэВ,} \quad (1.14)$$

отличаясь от массы протона всего на 0,1%:

$$\Delta m_N = m_n - m_p \approx 2,5m \approx 1,3 \text{ МэВ.} \quad (1.15)$$

Нейтрон имеет спин, равный  $s = 1/2\hbar$ , является **фермионом**. Но, несмотря на нулевой электрический заряд, он обладает магнитным моментом:

$$\mu_n = -1,91\mu_N, \quad (1.16)$$

т.е. вектора  $\vec{\mu}$  и  $\vec{s}$  направлены противоположно. Так как заряд нейтрона  $q_n = 0$ , то и магнитный момент должен быть  $\mu = 0$ . Аномальный магнитный момент указывает на то, что нейтрон является составной частицей. Отметим, что  $\mu_n / \mu_p = -2/3$ . Нейтрон так же участвует во всех видах взаимодействий и относится к классу **адронов**. Свободный нейтрон не стабилен, распадается по схеме

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e \quad (1.17)$$



**Чадвик Джеймс (1891-1974)** - английский физик-экспериментатор. Родился в Боллингтоне, окончил Манчестерский и Кембриджский ун-ты. Работал в ун-тах: Кембриджском (1923-35), Ливерпульском (1935-48), в колледжах Кембриджского ун-та (1948-58). В 1932 исследуя излучение бериллия, показал, что оно является потоком нейтральных частиц – нейтронов (Нобелевская премия за 1935). Исследовал искусственное превращение ядер под действием альфа-частиц, образование электронно-позитронных пар гамма-квантами, расщепление дейтрона под действием гамма-квантов, получение цепной реакции деления ядер, рассчитал критическую массу урана-235.

слабого взаимодействия с участием антинейтрино со средним временем жизни  $\tau_n \approx 15$  мин.

**Фотоны**  $\gamma$  не входят в состав атома, они рождаются и уничтожаются в процессе электронных переходов. Кванты света долгое время не признавали частицами, только после работ Комптона убедились, что они обладают всеми свойствами частицы. В 1926 г. Льюис удачно назвал их **фотонами**. Фотон электрически нейтрален  $q_\gamma = 0$ , его масса так же равна нулю  $m_\gamma = 0$ . Спин фотона равен  $s = 1$ , а состояние  $s_z = 0$  не реализуется. Он может находиться в состояниях с  $s_z = \pm 1$ , т.е. электромагнитная волна поперечна. Фотон в свободном состоянии стабилен  $\tau_\gamma = \infty$ . Фотон считается истинно элементарной частицей. Он участвует в электромагнитном взаимодействии, как переносчик этого взаимодействия.

### 1.3. Нуклон и его квантовые числа: изоспин и барионный заряд

Протоны и нейтроны в атомном ядре связаны ядерными силами, которые превосходят кулоновские силы отталкивания протонов. Этот тип взаимодействия назвали **ядерным или сильным взаимодействием**.

Так как силы ядерного взаимодействия этих частиц на много превосходят силы электромагнитного взаимодействия, то при изучении ядерных процессов можно пренебречь электромагнитной энергией взаимодействия протонов. Тогда нейтрон и протон становятся неразличимы, т.е. в ядерных взаимодействиях они ведут себя совершенно одинаково. Это позволяет рассматривать их как два разных состояния одной частицы – **нуклона N**.

При создании квантовой механики Паули предложил математический аппарат для описания состояний электрона со спином  $s = 1/2$ , принимающих только два значения  $s_z = \pm 1/2$ . Гейзенберг применил этот аппарат для описания двух состояний нуклона, введя новое квантовое число  $T = 1/2$ , называемое **изоспином**. Состояния протона и нейтрона различаются 3-ей компонентой изоспина  $T_3 = \pm 1/2$ . При этом протону сопоставляется значение  $T_3 = +1/2$ , а нейтрону -  $T_3 = -1/2$ . Таким образом, нуклон обретает 5 степеней свободы, и его волновая функция  $\psi(\vec{r}, s_z, T_3)$  зависит от 3 пространственных координат  $\vec{r}$ , проекции спина  $S_z$  и проекции изоспина  $T_3$ . Ядро, состоящее из  $A$  нуклонов, имеет изоспин

$$T_3 = \sum_{a=1}^A T_3^{(a)}. \quad (1.18)$$

Проекция изоспина складывается алгебраически, а изоспины нуклонов складываются как вектора. Изоспин легких ядер является хорошим квантовым числом, но тяжелые ядра, в которых много протонов и энергия кулоновского взаимодействия их уже не мала, ядра не характеризуют квантовым числом изоспина.

Нуклону приписывают еще одно квантовое число – **барионный заряд**  $B = 1$ . Частица, обладающая ненулевым барионным зарядом, называют **барионом**, Такие частицы участвуют в сильных взаимодействиях. Но электрон не обладает барионным зарядом  $B = 0$  и не участвует в сильных взаимодействиях.

Ядро, состоящее из  $A = Z + N$  нуклонов, имеет барионный заряд, равный массовому числу  $B_\gamma = \sum_a^A B_a = A$ . Квантовые числа

бариона: изоспин и барионный заряд - связаны с его электрическим зарядом соотношением

$$q = e(T_3 + B/2). \quad (1.19)$$

Проверим эту формулу - для нейтрона имеем  $0 = e(-1/2 + 1/2)$ , а для протона  $1e = e(1/2 + 1/2)$ . Соотношение (1.19) играет важную роль в физике элементарных частиц, где его обобщают на все частицы, включая соответствующие квантовые числа.

Согласно релятивистской квантовой механике каждой частице соответствует античастица, у которой изоспин, электрический и барионный заряды имеют противоположный знак, а масса, спин и время жизни совпадают. Английский физик-теоретик П. Дирак предсказал существование античастицы у электрона, и такая античастица – позитрон  $e^+$  был впервые обнаружен К. Андерсоном в космических лучах в 1932 г. Антипротон  $\bar{p}$  и антинейтрон  $\bar{n}$  были открыты в 1955-56 годы после запуска в Беркли (США) мощного беватрона – ускорителя протонов на энергию 6 ГэВ. В настоящее время античастицы открыты почти у всех частиц. Существование античастиц вытекает из свойства симметрии законов физики относительно преобразования зарядового сопряжения.

#### 1.4. Нейтрон-протонная диаграмма. Изотопы, изобары и изотоны. Магические числа

Атомное ядро химического элемента обозначается, как  ${}^A_Z X_N$ , где  $Z$  - число протонов определяет вид химического элемента  $X$ , а из  $A$  - массового числа элемента можно определить число нейтронов  $N$ , поэтому достаточно задать ядро в виде  ${}^A X$ . Иногда атомное ядро с заданными  $Z$  и  $N$  называют **нуклидом**.

Для систематизации нуклидов используется нейтрон-протонная диаграмма, в которой все известные нуклиды представляются на графике в зависимости от  $Z$  и  $N$  (рис.1.2).

Атомы, имеющие определенное значение  $Z$ , но различные массовые числа  $A$ , т.е. различное число нейтронов  $N$ , называются **изотопами**. Они занимают одну клетку в таблице Менделеева, а на нейтрон-протонной диаграмме они занимают клетки горизонтальной строки.

На этой диаграмме вертикальные колонки содержат нуклиды с одинаковым числом нейтронов  $N$ , но с разными  $Z$  и  $A$ , которые называют **изотонами**. Нуклиды с одинаковыми  $A$ , но разными  $Z$ , называют **изобарами**. Частным случаем изобаров являются **зеркальные ядра**, число протонов одного из которых равно числу нейтронов другого, и наоборот:

$$Z_1 = N_2, \quad N_1 = Z_2, \quad A_1 = A_2.$$

В качестве примера приведем следующие пары зеркальных ядер:

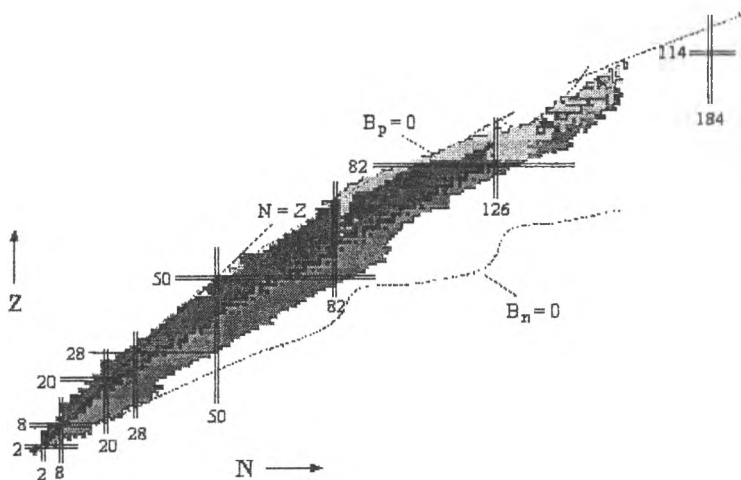
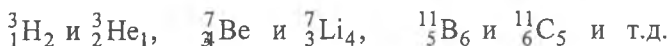


Рис. 1.2. Нейтрон-протонная диаграмма нуклидов

Черными точками на  $N - Z$  - диаграмме показаны стабильные ядра. Область, где расположены стабильные нуклиды, обычно называют **долиной стабильности**. Самыми тяжелыми стабильными изотопами являются нуклиды свинца ( $Z = 82$ ) и висмута ( $Z = 83$ ).

В природе так же нет стабильных элементов с  $Z = 43$  ( ${}_{43}\text{Tc}$ ) и  $Z = 61$  ( ${}_{61}\text{Pm}$ ).

Наиболее распространены в природе химические элементы, у которых ядра содержат число протонов или нейтронов, равное **магическому числу**: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Особенно стабильны **дважды магические ядра**. К ним относятся следующие ядра: гелий  ${}^4_2\text{He}_2$ , кислород  ${}^{16}_8\text{O}_8$ , кальций  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$  и свинец  ${}^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$ . Стабильные ядра с малым массовым числом  $A$  содержат одинаковое число протонов и нейтронов.

Узкая «дорожка» стабильности - в природе известны только 260 устойчивых изотопов. У химического элемента только 2 или 3 изотопа стабильных, т.е. при отклонении числа нейтронов  $N \pm 1$  ядро может оставаться стабильным. Например, у водорода имеется 3 изотопа:  ${}^1_1\text{H}$  - протий,  ${}^2_1\text{H}$  - дейтерий и  ${}^3_1\text{H}$  - тритий уже нестабилен. При добавлении большего числа нейтронов или его нехватке  $N \pm 2, 3, \dots$  изотоп становится нестабилен.

С левой стороны от стабильных ядер в таблице находятся ядра, перегруженные протонами (**протонноизбыточные ядра**), справа – ядра, перегруженные нейтронами (**нейтронноизбыточные ядра**). Протонноизбыточные ядра являются радиоактивными и превращаются в стабильные, в основном, в результате  $\beta^+$ -распадов, протон, входящий в состав ядра при этом превращается в нейтрон. Нейтронноизбыточные ядра также являются радиоактивными и превращаются в стабильные в результате  $\beta^-$ -распадов, с превращением нейтрона ядра в протон.

Тяжелые ядра наряду с процессами  $\beta^-$ - и  $\beta^+$ -распада подвержены также  $\alpha$ -распаду и спонтанному делению. В природе встречаются еще 70 нестабильных изотопов, т.е. такие радиоактивные ядра, как  ${}^{238}_{92}\text{U}$ ,  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  и др. В настоящее время искусственно в лабораториях получены свыше 3000 новых радиоактивных изотопов (**радионуклидов**). Теория предсказывает возможность синтеза  $\sim 7000$  изотопов, т.е. предстоит еще открыть свыше 4000 изотопов. На  $N - Z$  диаграмме пунктирная линия очерчивает область возможного существования атомных ядер. Линия  $V_p = 0$



( $B_p$  - энергия отделения протона) ограничивает область существования атомных ядер слева. Линия  $B_n = 0$  ( $B_n$  - энергия отделения нейтрона) - справа. Вне этих границ атомные ядра существовать не могут, так как распадаются за характерное ядерное время ( $\sim 10^{-23}$  с).

В настоящее время усилия физиков направлены на расширение области изученных ядер, как в сторону нейтронно-избыточных, так и в протонно-избыточных ядер. Особые усилия направлены на получение сверхтяжелых элементов. Синтезированы сверхтяжелые элементы вплоть до  $Z=118$ .

В нашей стране исследования по синтезу сверхтяжелых элементов были начаты под руководством Г. Флерова в г. Дубна и продолжаются Ю. Оганесяном. Учитывая заслуги российских физиков г. Дубны в открытии большого числа изотопов тяжелых элементов ( $Z=102-105$ ), новому элементу с  $Z = 105$  было присвоено имя Dubnium (Db).

Теория предсказывает, что наиболее устойчивым является следующее ядро с  $Z = 114$  и  $N = 184$  (остров стабильности).

### 1.5. Масса и энергия связи. Полуэмпирическая формула Вайцзеккера

Почти вся масса атома сосредоточена в ядре, а масса электронной оболочки составляет очень малую долю массы атома. В ядерной физике массу атомных ядер принято измерять в энергетических единицах  $\text{МэВ}/c^2$ , имея в виду, что энергия связана с массой выражением  $E = mc^2$ , откуда масса равна  $m = E/c^2$ , а  $c^2$  в знаменатели обычно опускают для краткости.

Масса покоя ядра всегда меньше суммы масс его протонов и нейтронов

$$M_{\text{я}} < Zm_p + Nm_n,$$

где  $m_p$  и  $m_n$  - массы протона и нейтрона, соответственно. При образовании ядра из нуклонов уменьшается его масса на величину

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}},$$

и соответственно, уменьшается энергия этой системы на величину

$$E_{\text{св}}(Z, A) = \Delta M c^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}})c^2, \quad (1.20)$$

называемую **энергией связи ядра**. Она определяет такое значение энергии, которая необходима, чтобы разложить ядро на составляющие, или, наоборот, это энергия, которая выделяется при объединении свободных нуклонов в одно связанное состояние – атомное ядро. Эта справедливо только тогда, когда  $E_{\text{св}}(Z, A) > 0$ , т.е. когда ядро устойчиво относительно развала, а не в случае  $E_{\text{св}}(Z, A) < 0$ , когда ядро абсолютно не стабильно,

В прикладной ядерной физике более употребительна **атомная единица массы** (а.е.м.):

$$1 \text{ а.е.м.} = M_{\text{а}}(^{12}\text{C}) / 12 \approx 1,6582 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 931,44 \text{ МэВ}, \quad (1.21)$$

где  $M_{\text{а}}(^{12}\text{C})$ - масса нейтрального атома углерода. Массы протона и нейтрона близки к этой единице:

$$m_p \approx 1,00728 \text{ а.е.м} \quad \text{и} \quad m_n \approx 1,00867 \text{ а.е.м.} \quad (1.22)$$

Поэтому масса ядра приблизительно равна его массовому числу. Например, масса  $\alpha$ - частицы, т.е. ядра гелия, равна

$$M(^4_2\text{He}) = M_{\alpha} \approx 4,00152 \text{ а.е.м.}$$

Вследствие этого весьма полезным понятием в ядерной физике оказался **дефект массы** ядра, который определяется разностью между массой ядра, выраженной в а.е.м. и массовым числом

$$\Delta(Z, A) = M_{\text{я}} - A. \quad (1.23)$$

Для установления зависимости между дефектом массы и энергией связи ядра подставим в формуле (1.20) выраженные в а.е.м. величины:  $M_{\text{я}} = A + \Delta(Z, A)$ ,  $m_p = 1 + \Delta_p$ ,  $m_n = 1 + \Delta_n$ . Тогда получим формулу для энергии связи ядра

$$E_{\text{св}}(Z, A) = Z\Delta_p + N\Delta_n - \Delta(Z, A). \quad (1.24)$$

Часто пользуются величиной энергии отрыва одного нуклона из ядра. В частности, для отрыва протона из ядра необходима энергия

$$E_p = E_{Z,A} - E_{Z-1,A-1} = \Delta_p + \Delta(Z-1, A-1) - \Delta(Z, A), \quad (1.25)$$

а для вырывания из ядра нейтрона требуется энергия

$$E_n = E_{Z,A} - E_{Z,A-1} = \Delta_n + \Delta(Z, A-1) - \Delta(Z, A). \quad (1.26)$$

Эксперименты указывают, что энергия отделения нуклона из четного  $Z$  или  $N$  ядра больше, чем у нечетного ядра, т.е. в ядрах существует немаловажный эффект спаривания нуклонов.

Для стабильных ядер энергия отделения нуклона имеет положительное значение. А при избытке протонов или нейтронов в ядре энергия отделения нуклона уменьшается, и в предельном случае, она может обратиться в нуль, это означает, что такие ядра не могут существовать в природе. На нейтрон-протонной диаграмме, область возможных, еще не открытых нуклидов очерчена пунктирными кривыми с такими данными  $V_p = 0$  и  $V_n = 0$ .

Проблема стабильности ядра связана с определением точного значения массы ядра и его составляющих. Один из основных методов измерения масс заряженных частиц является масс-спектроскопия, основанная на разложении в магнитном поле пучка ускоренных электрическим полем частиц. Другой метод определения масс частиц основан на использовании законов сохранения энергии и импульсов частиц в ядерных превращениях. С помощью последнего метода была установлена масса нейтрона.

Энергия связи возрастает с увеличением массового числа. Поэтому вместо нее вводят **удельную энергию связи**, т.е. энергию, приходящую на один нуклон:

$$\varepsilon = E(Z, A) / A. \quad (1.27)$$

Удельная энергия связи для многих ядер оказывается постоянной величиной, равной  $\sim 8$  МэВ. Она быстро возрастает от  $\varepsilon = 0$  при  $A = 1$  до  $\varepsilon \approx 8$  МэВ при  $A = 16$ , проходя через максимум  $\varepsilon_{\max} \approx 8,8$  МэВ при  $A \approx 60$  (в районе железа и никеля) и постепенно уменьшается до  $\varepsilon \approx 7,6$  МэВ для последнего природного элемента – урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$ . Постоянство удельной энергии указывает на то, что энергия ядра пропорциональна числу нуклонов  $E(Z, A) \approx \varepsilon A$ , т.е. ядерные силы обладают **свойством насыщения**.

Уменьшение удельной энергии связи при переходе к тяжелым ядрам объясняется кулоновским отталкиванием протонов, энергия которых пропорциональна  $Z^2$ . Поэтому реакция деления тяжелого

ядра на более легкие является экзотермической реакцией, проходящей с выделением энергии.

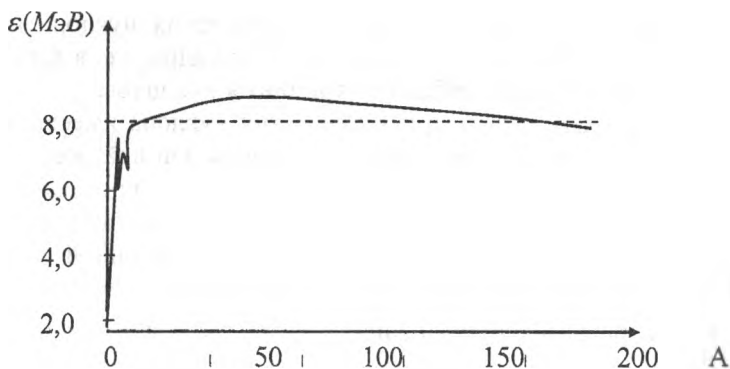


Рис.1.3. Зависимость удельной энергии связи от массового числа

Рассмотрим деление ядра  ${}^A_Z X$  на два примерно одинаковых ядра  ${}^{A'}_{Z'} X$  с  $A' \approx A/2$  и  $Z' = Z/2$ . При этом выделяется энергия:

$$Q_{\text{дел}} = 2E_{Z',A'} - E_{Z,A} = 2\varepsilon_{A'}A' - \varepsilon_A A \approx (\varepsilon_{A'} - \varepsilon_A)A. \quad (1.28)$$

Так как  $\varepsilon_{A'} > \varepsilon_A$ , то  $Q_{\text{дел}} > 0$ , т.е. выделяется энергия при делении ядра. Точно так же при малых  $A$  кривая  $\varepsilon(A)$  проявляет завал, и, следовательно, при слиянии легких ядер выделяется энергия.

Рассмотрим процесс слияния двух одинаковых ядер  ${}^{A'}_{Z'} X$  в одно ядро  ${}^A_Z X$ , для которого  $Z = 2Z'$  и  $A = 2A'$ . Тогда имеем

$$Q_{\text{синт}} = E_{Z,A} - 2E_{Z',A'} = \varepsilon_A A - 2\varepsilon_{A'}A' = (\varepsilon_A - \varepsilon_{A'})A. \quad (1.29)$$

Так как  $\varepsilon_A > \varepsilon_{A'}$ , то  $Q_{\text{синт}} > 0$ , т.е. наблюдается выделение энергии при объединении двух легких ядер в одно ядро.

Существует **полуэмпирическая формула Вайцеккера** для зависимости энергии связи ядра от массового числа:

$$E_{Z,A} = \alpha_1 A - \alpha_2 A^{2/3} - \alpha_3 Z^2 A^{-1/3} - \alpha_4 (A - 2Z)^2 / A - \alpha_5 A^{-3/4} \delta(Z,A) \quad (1.30)$$

а удельная энергия связи задается выражением:

$$\varepsilon = \alpha_1 - \alpha_2 A^{-1/3} - \alpha_3 Z^2 A^{-4/3} - \alpha_4 (A - 2Z)^2 / A^2 - \alpha_5 A^{-7/4} \delta(Z, A). \quad (1.31)$$

Неизвестные параметры  $\alpha$ , определяются из экспериментальных значений масс ядер. В настоящее время общеприняты следующие значения коэффициентов:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 15,75 \text{ МэВ}, & \alpha_2 &= 17,8 \text{ МэВ}, & \alpha_3 &= 0,71 \text{ МэВ}, \\ \alpha_4 &= 23,7 \text{ МэВ}, & \alpha_5 &= 34 \text{ МэВ}. \end{aligned} \quad (1.32)$$

Для учета эффекта спаривания вводится функция:

$$\delta(Z, N) = \begin{cases} +1 & \text{для} & \text{НН - ядер} \\ 0 & \text{для} & \text{ЧН - ядер} \\ -1 & \text{для} & \text{ЧЧ - ядер} \end{cases} \quad (1.33)$$

Объяснение этой формулы можно провести в рамках гидродинамической модели, в которой ядро представляется, как несжимаемая жидкая капля. Первое слагаемое в (1.30) выражает факт пропорциональности энергии числу нуклонов в ядре  $E_1 = \alpha_1 A$ . Обращает на себя внимание значительное отклонение  $\alpha_1$  от  $\varepsilon \approx 8$  МэВ. Такую энергию связи должна иметь ядерная материя при выключенном электромагнитном взаимодействии.

Второе слагаемое связано с **поверхностными явлениями**, аналогичными поверхностному натяжению, которое уменьшает энергию связи на величину, пропорциональную поверхности ядерной капли  $E = \sigma \cdot 4\pi R^2$ . С учетом формулы (1.3) имеем  $E_2 = -\alpha_2 A^{2/3}$ .

Третье слагаемое объясняет наличие **кулоновского отталкивания протонов** внутри ядра, энергия которого пропорциональна  $E_{\text{кул}} = kZ^2 e^2 / R$ . Поэтому вклад в энергию связи кулоновского отталкивания равна  $E_3 = -\alpha_3 Z^2 A^{-1/3}$ .

Следующая поправка обусловлена **эффектом симметрии**, т.е. приближенным равенством  $Z \approx N$  в легких ядрах. Поэтому ее можно представить в виде:

$$E_4 = \alpha_4 (N - Z)^2 / A = \alpha_4 (A - 2Z)^2 / A,$$

где  $A$  в знаменатели указывает на некоторое ослабление эффекта при переходе к тяжелым ядрам.

Наконец, последняя поправка объясняется эффектом спаривания нуклонов. Наиболее стабильными являются четно-четные (ЧЧ) ядра с четными значениями протонов и нейтронов. Наименее стабильны нечетно-нечетные (НН) ядра и в промежутке между ними по стабильности нечетно-четные (НЧ) ядра. Наилучшую подгонку к опытным данным дает зависимость  $E_s = \alpha_s A^{-3/4} \delta(Z, N)$ .

На основании формулы (1.20) имеем выражение для полной энергии ядра  ${}^A_Z X$ :

$$E = M_{\text{я}} c^2 = (Zm_p + Nm_n) c^2 - E_{\text{св}}(Z, A). \quad (1.34)$$

Формула (1.34) с коэффициентами (1.32) и (1.33) позволяет вычислить массу любого ядра  ${}^A_Z X$  с относительной погрешностью  $\sim 10^{-4}$ . С помощью полуэмпирической формулы (1.30) можно находить и многие другие характеристики ядра: энергию  $\alpha$ -распада, энергию  $\beta$ -распада, энергию вырывания протона или нейтрона, энергию деления и синтеза и др.

### 1.6. Квантовомеханические характеристики состояния ядра

Атомное ядро, как и атом, является квантовомеханическим объектом и характеризуется дискретными значениями энергии уровней. Но размеры атомного ядра меньше атома в  $10^{-5}$  раз, то и масштабы энергии ядра значительно отличаются от атомных энергий. Можно оценить эти энергии на основе положений квантовой механики. Частица в потенциальной яме размерами  $x \sim \Delta x$  согласно соотношениям неопределенностей  $\Delta x \Delta p \sim \hbar$  имеет импульс порядка  $p \sim \Delta p$ . Откуда энергетические масштабы нуклона в ядре

$$\begin{aligned} E &\sim \Delta E = (\Delta p)^2 / (2m_p) = (\hbar / \Delta x)^2 / (2m_p) = \\ &= (1,05 \cdot 10^{-34} / 10^{-15})^2 / (2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}) = 0,33 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = 20 \text{ МэВ} \end{aligned}$$

Напомним, что энергия электрона в атоме водорода порядка  $E \sim 10 \text{ эВ}$ , а ядерная энергия, по крайней мере, в  $10^5$  раз больше энергии, проявляемой в химических реакциях. Так как нуклоны внутри ядра обладают кинетической энергией порядка десятка

МэВ, что на много меньше собственной энергии  $m_p c^2 = 938 \text{ МэВ}$ , то движение нуклонов внутри ядра можно рассматривать с точностью  $10^{-2}$  в нерелятивистском приближении, т.е. релятивистские поправки в ядре составляют всего 1% от основного эффекта.

Атомное ядро, как квантовомеханическая система связанных нуклонов, имеет основное и возбужденные состояния с дискретным значением энергии. С увеличением энергии возбуждения время жизни ядра в этом состоянии уменьшается, и согласно соотношениям неопределенностей  $\Delta E \Delta t \sim \hbar$  уширяются энергии уровней. В пределе они перекрываются, и спектр уровней ядра становится почти сплошным.

Состояние ядра характеризуется, помимо энергии, и квантовыми числами: спином  $I$  и четностью  $\pi = \pm$ . Под спином ядра понимают

$$\vec{I} = \sum_{a=1}^A \vec{j}_a \quad (1.35)$$

сумму полных моментов отдельных нуклонов ядра  $\vec{j} = \vec{I} + \vec{S}$ . Ядра с четным  $A$  имеют целочисленные значения спинов  $I = 0, 1, 2, \dots$ , а ядра с нечетным  $A$  имеют полуцелые спины  $I = 1/2, 3/2, \dots$ . Причем спины ядра в основном и в возбужденном состояниях могут быть разными. Но если в основном состоянии — целый спин, то и в возбужденных состояниях принимают только целые значения. Спины четно-четных ядер в основном состоянии равны нулю. Это свидетельствует о существовании эффекта спаривания двух нуклонов с равными по модулю, но противоположными по направлениям полными моментами  $\vec{j}_1 = -\vec{j}_2$ . Спин является важной характеристикой ядра, которая определяет все процессы:  $\gamma$ -излучение, радиоактивный распад, ход ядерной реакции и др.

Со спином связана статистика, которой подчиняются ядра. Ядра с целочисленным спином подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна и являются бозонами, а ядра с полуцелыми спинами подчиняются статистике Ферми-Дирака, являются фермионами, на которых распространяется принцип запрета Паули, согласно

которому два тождественных фермиона не могут находиться в одном квантовом состоянии.

Состояния квантовомеханической системы, каковой является атомное ядро, характеризуется так же и четностью состояния, которая определяется поведением системы при отражении пространственных координат

$$\hat{P}\psi = \pi\psi, \quad \text{где } \pi = (-1)^l. \quad (1.36)$$

Здесь  $l$  - орбитальный момент нуклона.

Для частиц с нулевой массой, например, для фотона, не существует понятия орбитального момента  $l$ . Вместо этого вводится аналог этого понятия, называемый **мультиполем**  $L$ . Полный момент фотона может принимать значения  $L = 1, 2, 3, \dots$  и состояния называются, соответственно, дипольным, квадрупольным, октупольным и т.д. Состояние фотона с моментом  $L$  и четностью  $(-1)^L$  называется **электрическим**  $2^L$ - **полем**, а состояние с таким же моментом и четностью  $(-1)^{L+1}$  называется **магнитным**  $2^L$ - **полем**. Соответственно, существуют обозначения  $E_L$  для электрического мультиполя, и  $M_L$  для магнитного мультиполя.

### 1.7. Электромагнитные моменты ядер

Согласно классической электродинамике энергию взаимодействия заряженной системы с внешними электрическим и магнитным полями можно представить в виде разложения по мультипольным моментам:

$$E = q\phi + (\vec{p} \cdot \Delta\phi) + \frac{1}{6} \sum_{ij} Q_{ij} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_i \partial x_j} + \dots - (\vec{\mu} \cdot \vec{B}) + \dots \quad (1.37)$$

В электродинамике доказывается, что заряженная система с ненулевым зарядом  $q \neq 0$  имеет четные электрические моменты и нечетные магнитные моменты. Следовательно, атомное ядро, как электрически заряженная система с  $q = Ze$ , не имеет дипольный электрический момент  $\vec{p} = 0$ , но может иметь электрический квадрупольный момент  $Q_0 = Q_{zz}$  и магнитный дипольный момент  $\vec{\mu}$ .



**Электрический квадрупольный момент** определяется выражением

$$Q_{ij} = \sum_a^A e_a (3x_i^{(a)}x_j^{(a)} - r^2\delta_{ij}). \quad (1.38)$$

Наличие квадрупольного момента у ядра указывает на отклонение его формы от сферичности, т.е. на деформацию формы ядра. Если ввести **параметр деформации**

$$\beta = \frac{\Delta R}{R}, \quad (1.39)$$

где  $\Delta R = R_a - R_b$ , а  $R_a$  и  $R_b$  - большая и малая полуоси эллипсоида вращения. Тогда квадрупольный момент ядра можно представить в виде

$$Q_0 = \frac{4}{5}ZeR^2\beta. \quad (1.40)$$

Из экспериментального значения квадрупольного момента ядра можно определить деформацию формы ядра. Один из самых первых методов установления электромагнитных моментов и спина ядра был основан на изучении сверхтонкого расщепления оптических спектров атома. Для большинства ядер параметр деформации незначителен  $\beta \sim 0,01 \div 0,02$ , т.е. форма этих ядер почти сферическая. Но существуют ядра с большой деформацией  $\beta \sim 0,2 \div 0,3$ , которые имеют форму эллипсоида вращения. Квантовая механика утверждает, что вращение квантовой системы сферической формы не приводит к перемещению материи в пространстве из-за принципа тождественности частиц. Только несферическая система может иметь вращательную степень свободы. В энергетическом спектре четно-четных ядер существует простая зависимость энергии уровней

$$E_I = \frac{\hbar^2}{2\mathfrak{I}}I(I+1) \quad (1.41)$$

с последовательностью спинов  $I^\pi = 0^+, 2^+, 4^+, \dots$ . Такая зависимость энергии свойственна вращению системы с моментом инерции  $\mathfrak{I}$ . Наличие вращательных энергий является доказательством несферичности многих ядер.

Из электродинамики известно, что магнитный момент  $\vec{\mu}$  заряженной частицы обусловлен ее вращением и пропорционален моменту  $\vec{I}$

$$\vec{\mu} = g\vec{I}, \quad (1.42)$$

где  $g$  - фактор ядерных систем измеряется в единицах ядерного магнетона  $\mu_N$ . **Магнитный момент  $\vec{\mu}$  атомного ядра** складывается из магнитных моментов нуклонов. В него дают вклады собственные моменты протонов

$$\vec{\mu}_p = g_p\vec{s}, \quad (1.43)$$

собственные магнитные моменты нейтронов

$$\vec{\mu}_n = g_n\vec{s} \quad (1.44)$$

и магнитные моменты орбитального движения протонов

$$\mu_l = g_l\vec{I}. \quad (1.45)$$

Сложение механических моментов  $\vec{s}$  и  $\vec{l}$  в полный момент - спин ядра  $\vec{I}$  определяется правилами оболочечной модели ядра и по полному моменту определяется магнитный момент ядра. Приведем значения  $g$ -факторов:

$$g_p = 5,58 \cdot g_N, \quad g_n = -3,82 \cdot \mu_N, \quad g_l = 1 \cdot \mu_N, \quad (1.46)$$

где ядерный магнетон равен

$$\mu_N = e\hbar/2m_p = 5,05 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл}.$$

Отметим, что магнитные моменты ядер по порядку равны ядерному магнетону, т.е. они на 3 порядка меньше атомных магнитных моментов.

### 1.8\*. Распределение плотности ядерной материи

Оценка размера ядра была сделана еще во времена опытов Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц. В распоряжении экспериментаторов имелись природные источники альфа-частиц с энергией  $E \sim 5\text{МэВ}$ . Такая частица может подойти к ядру на расстояние, когда ее кинетическая энергия  $E$  сравняется с кулоновской энергией отталкивания  $E = 2Ze^2/(4\pi\epsilon_0 r_{\min})$ . Откуда имеем  $r_{\min} = 2 \cdot 10^{-14} \text{ м}$ . На этих расстояниях не наблюдались отклоне-

ния от кулоновского взаимодействия и не проявляется ядерные силы. Следовательно, размер ядра не превышает  $R < 2 \cdot 10^{-14}$  м.

Атомное ядро является протяженным образованием, имеющее определенное строение, которое характеризуется соответственным распределением массы и электрического заряда внутри ядра. Чтобы прозондировать внутреннюю структуру ядра, нужны частицы с большой энергией, у которых длина волны де-Бройля  $\lambda = h/p = h/\sqrt{2mE} < R_{\text{ядра}}$  меньше размеров ядра.

Необходимые энергии для таких экспериментов были достигнуты только в 50-ые годы прошлого столетия на ускорителях электронов. Эксперименты по рассеянию быстрых электронов на ядрах впервые провел американский физик Р. Хофштадтер.

Метод извлечения информации о структуре ядра из данных по рассеянию основан на сравнении экспериментально измеренных сечений рассеяния с теоретически вычисленными значениями. Исходным пунктом всех рассуждений является формула Резерфорда, в которой следует положить для электронов  $Z = 1$ . При релятивистских энергиях электронов  $E \gg mc^2$  в задаче о рассеянии на ядре необходимо учитывать наличие спина и магнитного момента у электрона. Такую задачу решил Н. Мотт в 1929 году, который обобщил формулу Резерфорда:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_M} = \frac{Z^2 e^4 \cos^2(\theta/2)}{4E^2 \sin^4(\theta/2)}, \quad (1.47)$$

где  $\theta$  - угол рассеяния в СЦИ. Эта формула Мотта предсказывает сечение рассеяния, на несколько порядков превышающее экспериментальное значение. Это понятно, т.к. быстрые электроны проникают внутрь ядра и рассеиваются на точечных элементах внутри ядра. Поэтому в формулу Мотта необходимо ввести поправочный множитель, учитывающий протяженность ядра

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{d\sigma}{d\Omega_M} |F(q)|^2, \quad (1.48)$$

где  $F(q) = \int \rho(r) \exp(i\vec{q}\vec{r}) d^3r$  - называется **форм-фактором ядра**, нормированным на условием  $F(0) = 1$ . Сравнивая экспериментальное значение сечения рассеяния электрона на ядре



**Хофштадтер Роберт** - американский физик, родился в 1915 в Нью-Йорке, окончил Принстонский ун-т (1938), где работал в 1946-50, с 1950 – в Станфордском ун-те, в 1967-74 – директор Лаб-рии физики высоких энергий. В 1939-40 принимал участие в создании генератора Ван-де-Граафа. Сконструировал ряд счетчиков  $\gamma$ -излучений и нейтронов. В 1955-58 в экспериментах по рассеянию электронов высокой энергии получил информацию о распределении заряда внутри ядра и нуклона (Нобелевская премия, 1961).

с теоретическим значением по формуле (1.48), определяют форм-фактор  $F(q)$ . По известному форм-фактору можно восстановить плотность электрического заряда ядра  $\rho(r)$ , совершая обратное преобразование Фурье:

$$\rho(r) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int F(q) \exp(-i\vec{q}\vec{r}) d^3q. \quad (1.49)$$

Основная цель экспериментов состоит в определении форм-факторов  $F(q)$  для различных значений переданного импульса  $q$  от нулевого значения и до максимального  $Q_{\max}$ , который в принципе должен быть бесконечным. Чем больше интервал  $Q$ , для которого определен форм-фактор, тем точнее устанавливается плотность  $\rho(r)$ . В результате этих исследований было установлена радиальная плотность электрических зарядов ядра, которая наиболее удовлетворительно описывает структуру большой совокупности средних и тяжелых ядер:

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R_{1/2}}{\delta}\right)}. \quad (1.50)$$

Такая функция известна как распределение Ферми, согласно которому во внутренней области ядра плотность почти постоянна и

приблизительно равна  $\rho_0 \sim 0,17 \cdot 10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>. Здесь  $R_{1/2}$  – радиус ядра, который определяется из условия  $\rho(R_{1/2}) = \rho_0/2$ , т.е. расстоянием от центра ядра до точки на поверхностном слое, где плотность уменьшается до половинного значения. Выяснилось, что радиус ядра зависит от массового числа  $A$  и эту зависимость можно представить формулой  $R_{1/2} \approx (1,1 - 1,2) \cdot 10^{-15} \cdot A^{1/3}$  м. Величина  $\delta$  связана с толщиной поверхностного слоя, в пределах которого плотность изменяется от  $0,1\rho_0$  до  $0,9\rho_0$ . Она почти одинакова для всех ядер. Легкие ядра не имеют области постоянной плотности. Более подходящим для них является гауссово распределение

$$\rho(r) = \left(\frac{3}{2\pi a^2}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{3}{2} \frac{r^2}{a^2}\right). \quad (1.51)$$

Из опытов по рассеянию электронов на ядрах определяется распределение плотности электрического заряда внутри ядра, которая

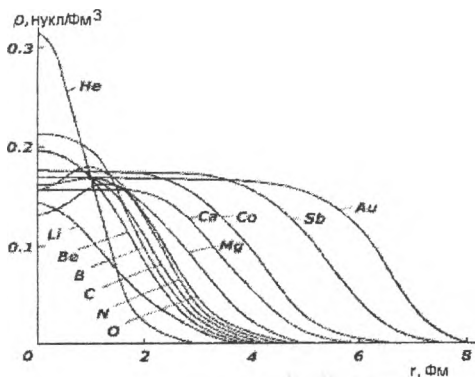


Рис. 1.4. Распределение плотности ядерной материи

создается электрически заряженными протонами, следовательно, в этих опытах фактически определяется плотность протонов, но не нейтронов, которые не обладают электрическим зарядом.

С этой целью проводилось изучение структуры ядер с помощью быстрых протонов, которые могут взаимодействовать с нейтронами внутри ядра. Анализ этих экспериментов позволяет сделать вывод, что в легких и средних ядрах распределения протонов и нейтронов в пределах точности эксперимента одинаковы.

Хофштадтер продолжал эти опыты на ускорителях с более высокой энергией электронов, которые могут зондировать уже и внутреннюю структуру протонов. Было обнаружено существование внутри нуклона точечных образований, названных **партонами**, а затем их отождествили с **кварками** и **глюонами**. За эти работы Хофштадтер удостоивается Нобелевской премии за 1961 г.

### Вопросы для закрепления знаний

1. Почему результаты опыта Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ - частиц опровергают модель атома Томсона и свидетельствуют о наличии положительно заряженного атомного ядра малых размеров, содержащего основную часть массы атома?
2. Пользуясь таблицей изотопов, перечислите стабильные изотопы селена.
3. Пользуясь таблицей изотопов, перечислите изобары ядер с  $A = 15$ .
4. Приведите стабильные изотопы с  $N = 15$ .
5. Укажите, какие из следующих ядер:  ${}^{12}_5\text{B}$ ,  ${}^{14}_6\text{C}$ ,  ${}^{14}_7\text{N}$ ,  ${}^{14}_8\text{O}$ ,  ${}^{16}_8\text{O}$  являются а) изотопами, б) изобарами, в) изотонами, г) зеркальными.
6. Сравните радиусы ядер  ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^{27}_{13}\text{Al}$  и  ${}^{216}_{88}\text{Ra}$ .
7. Рассчитайте величину атомной единицы массы в МэВ.
8. Используя зависимость, существующую между радиусом и массовым числом, оцените плотность ядра.
9. Каким был бы радиус Земли, если бы она состояла из вещества, имеющего плотность ядра?
10. Изобразите графически, как выглядит пространственная плотность ядерной материи в  ${}^1_1\text{H}$  и  ${}^{197}_{79}\text{Au}$ .

11. Изобразите, как выглядит пространственная плотность заряда в протоне, нейтроне и в атоме.

12. Получите выражение для энергии связи ядра через массы нейтральных атомов.

13. Считая, что разность энергий связи зеркальных ядер определяется разностью кулоновской энергией, и используя выражение для кулоновской энергии равномерно заряженного шара радиусом  $R$

$$E_{\text{кул}} = \frac{3 Z^2 e^2}{5 R},$$

покажите, что разность энергий связи двух зеркальных ядер с зарядами  $Z$  и  $Z+1$  равна

$$\Delta E_{\text{св}} \approx \Delta E_{\text{кул}} = \frac{3 e^2 (2Z+1)}{5 R}.$$

14. Используя экспериментальное значение для разности энергии зеркальных ядер  $^{15}\text{N}$  и  $^{15}\text{O}$ , оцените радиус этих ядер.

15. Вычислите величину ядерного магнетона.

16. Чему равны величины магнитных моментов свободных нейтрона и протона и как они направлены относительно их спинов?

17. Рассчитайте магнитный момент системы протон-нейтрон в состоянии  $^3S_1$ . Сравните результат с экспериментальным значением магнитного момента дейтрона  $\mu_d = 0,86\mu_N$ .

18. Рассчитайте отношение магнитных моментов протона и электрона. На какую идею наводит результат?

19. Известно, что внутренний квадрупольный момент ядра  $^{175}\text{Lu}$  равен 5,9б. Какую форму имеет это ядро? Чему равен параметр деформации этого ядра?

20. Пользуясь нейтрон-протонной диаграммой изотопов, укажите, при каких значениях  $N$  и  $Z$  ядро обладает сферической формой или деформацией формы.

21. Каковы возможные значения изоспина системы, состоящей из а) двух нейтронов, б) протона и нейтрона? Укажите значения проекции изоспина.

22. Определить значение изоспина  $T$  основного состояния ядер изотопов углерода  $^{10}\text{C}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$ .

## Примеры решения задач

**Задача 1.1.** Определите удельную энергию связи для следующих ядер:

а)  ${}^4_2\text{He}$ , б)  ${}^7_3\text{Li}$ , в)  ${}^{16}_8\text{O}$ , г)  ${}^{238}_{92}\text{U}$ .

**Решение.** Удельная энергия связи  $\varepsilon(A, Z) = E_{\text{св}}(A, Z)/A$ , где энергия связи определяется выражением

$$E_{\text{св}}(Z, A) = Z\delta(1,1) + N\delta_n - \delta(Z, A)$$

Подставив значения дефекта масс, получаем:

- а)  $\varepsilon(2,4) = (2 \cdot 7,289 + 2 \cdot 8,071 - 2,424)/4 = 7,073 \text{ МэВ/нукл}$ ,  
 б)  $\varepsilon(3,7) = 5,606 \text{ МэВ/нукл}$ ,  
 в)  $\varepsilon(8,16) = 7,976 \text{ МэВ/нукл}$ ,  
 г)  $\varepsilon(92,238) = 7,570 \text{ МэВ/нукл}$ .

**Задача 1.2.** Чему равна энергия отделения нейтрона в ядрах и удельная энергия связи  ${}^9_4\text{Be}$  и  ${}^8_4\text{Be}$ ?

**Решение:** Энергия отделения нейтрона из ядра определяется выражением

$$E_n = \delta_n + \delta(Z, A - 1) - \delta(Z, A)$$

Энергия отделения нейтрона из ядра  ${}^9_4\text{Be}$  равна

$$E_n = \delta_n + \delta(4,8) - \delta(4,9) = 8,071 + 4,941 - 11,347 = 1,665 \text{ МэВ}.$$

А энергия отделения нейтрона из ядра  ${}^8_4\text{Be}$  равна  $E_n = 18,898 \text{ МэВ}$ . Удельные энергии связи равны

$$\varepsilon(4,9) = 6,463 \text{ МэВ}, \quad \varepsilon(4,8) = 7,062 \text{ МэВ}.$$

**Задача 1.3.** Используя формулу Вайцзеккера, вычислите энергию деления ядра  ${}^{238}_{92}\text{U}$  на два равные осколка.

**Решение.** Энергия деления ядра на два равных осколка выражается формулой

$$\begin{aligned} E_f &= (2 \cdot M_a(46,119) - M_a(92,238))c^2 = \\ &= 2 \cdot \varepsilon(46,119) \cdot 119 - \varepsilon(92,238) \cdot 238. \end{aligned}$$



В задаче 1.1. была вычислена удельная энергия урана ядра  ${}_{92}^{238}\text{U}$   
 $\epsilon(92,238) = 7,57 \text{ МэВ/нуклон},$

но для ядра  ${}_{46}^{119}\text{Pd}$  удельная энергия  $\epsilon(46,119)$  не известна.  
 Вычислим ее на основе полуэмпирической формулы  
 Вайцзеккера

$$\epsilon_{Z,A} = \alpha_1 - \alpha_2 A^{-1/3} - \alpha_3 Z^2 A^{-4/3} - \alpha_4 \frac{(A-2Z)^2}{A^2} - \alpha_5 A^{-7/4} \delta(Z,N)$$

Для ядер с нечетным массовым числом  $A$  параметр  $\alpha_5 = 0$ .  
 Опуская член с  $\alpha_5$ , имеем

$$\begin{aligned} \epsilon(46,119) &= 15,75 - 17,8 \cdot 119^{-1/3} - 0,71 \cdot 46^2 \cdot 119^{-4/3} - \\ &- 23,7 \cdot (119 - 2 \cdot 46)^2 / 119^2 = 8,27 \text{ МэВ/нуклон}. \end{aligned}$$

Следовательно, в результате деления одного ядра  ${}_{92}^{238}\text{U}$  выделяется энергия

$$E_f = 2 \cdot 8,27 \cdot 119 - 7,6 \cdot 238 = 159,5 \text{ МэВ}.$$

**Задача 1.4.** Вычислите выделяемую энергию в следующих термоядерных реакциях:

- 1)  ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^3_1\text{T},$
- 2)  ${}^2_1\text{D} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^3_2\text{He},$
- 3)  ${}^2_1\text{D} + {}^3_1\text{T} \rightarrow {}^1_0\text{n} + {}^4_2\text{He},$
- 4)  ${}^3_2\text{He} + {}^2_1\text{D} \rightarrow {}^1_1\text{p} + {}^4_2\text{He}.$

Пренебрегая кинетической энергией частиц до реакции, определить, какую энергию уносит каждая частица после реакции.

**Решение:** Выделяемая энергия реакции  $Q$  определяется изменением суммарной энергии связи частиц, участвующих в реакции.

$$1) Q = 2\delta(1,2) - \delta(1,1) - \delta(1,3) = 2 \cdot 13,136 - 7,289 - 14,950 = 4,033 \text{ МэВ}$$

Т.к. кинетические энергии частиц малы, то можно пользоваться нерелятивистским приближением, и законы сохранения импульса и энергии частиц имеют вид:

$$\vec{P}_1 + \vec{P}_2 = 0 \quad \text{и} \quad \frac{P_1^2}{2m_1} + \frac{P_2^2}{2m_2} = 0.$$

После реакции частицы разлетаются в противоположные стороны, и законы сохранения имеют вид:

$$\vec{P}'_1 + \vec{P}'_2 = 0 \quad \text{и} \quad \frac{P_1'^2}{2m_1} + \frac{P_2'^2}{2m_2} = Q.$$

Откуда имеем кинетические энергии разлетающихся частиц

$$E_p = \frac{m({}^3_1\text{T})}{m_p + m({}^3_1\text{T})} Q = 3,025 \text{ МэВ},$$

$$E_T = \frac{m_p}{m_p + m({}^3_1\text{T})} Q = 1,008 \text{ МэВ}.$$

$$2) Q = 3,27 \text{ МэВ}, \quad E_n = 2,453 \text{ МэВ}, \quad E_{\text{He}} = 0,817 \text{ МэВ}.$$

$$3) Q = 17,59 \text{ МэВ}, \quad E_n = 14,07 \text{ МэВ}, \quad E_{\text{He}} = 3,52 \text{ МэВ}.$$

$$4) Q = 18,35 \text{ МэВ}, \quad E_p = 14,68 \text{ МэВ}, \quad E_{\text{He}} = 3,67 \text{ МэВ}.$$

**Задача 1.5.** Используя формулу Вайцзеккера, определите наиболее стабильный изобар при заданном массовом числе  $A$ .

**Решение:** Изобары отличаются друг от друга значениями  $Z$ . Поэтому задача сводится к определению зарядового числа  $Z$ , при котором энергия связи максимальна. Продифференцируем выражение (1.10) при постоянном  $A$  и приравняем к нулю

$$\frac{\partial E(Z, A)}{\partial Z} = 0.$$

Получаем

$$-2\alpha_3 Z A^{-1/3} + 4\alpha_4 (A - 2Z) / A = 0.$$

Откуда имеем

$$Z = \frac{A}{2 + A^{2/3} \alpha_3 / 2\alpha_4}.$$

Подставляя значения постоянных  $\alpha_3$  и  $\alpha_4$ , получаем выражение для определения  $Z$  и  $A$   $\beta$ -стабильных ядер  $Z = \frac{A}{2 + 0,015A^{2/3}}$ .

### Задания для самостоятельной работы

**Задача 1.6.** Определите удельную энергию связи для следующих ядер: а)  ${}_{20}^{40}\text{Ca}$ , б)  ${}_{29}^{63}\text{Cu}$ , в)  ${}_{80}^{200}\text{Hg}$ . Составьте график зависимости  $\varepsilon(A)$ , используя и результаты задачи 1.1.

**Ответ:** а) 8,55 МэВ/нуклон,  
б) 8,75 МэВ/нуклон,  
в) 7,93 МэВ/нуклон.

**Задача 1.7.** Чему равна удельная энергия связи и энергия отделения нейтрона и протона в ядре  ${}^{16}\text{O}$ ? Почему они различаются?

**Ответ:**  $\varepsilon(8,16) = 7,976$  МэВ,  $E_n = 15,663$  МэВ,  
 $E_p = 12,127$  МэВ.

**Задача 1.8.** Вычислите энергию, которая выделяется при синтезе  ${}^4_2\text{He}$  из двух ядер  ${}^2_1\text{H}$ .

**Ответ:**  $E_n = 23.85$  МэВ

**Задача 1.9.** Почему удельная энергия связи уменьшается для легких и тяжелых ядер?

**Задача 1.10.** Рассчитать отношение энергий связи нуклонов в ядре  ${}^{238}_{92}\text{U}$  и электронов в этом атоме.

## Глава 2. Ядерные силы и модели

### 2.1. Основные свойства ядерных сил

Как известно, атом является квантовой системой многих тел, и существующая теория структуры атома позволяет рассчитать любую характеристику атома с достаточной точностью, благодаря существованию параметра малости – отношению энергии электромагнитного взаимодействия частиц атома к собственной энергии частиц. Атомное ядро также является квантовой системой многих частиц – нуклонов. Но для ядра до сих пор не удается построить завершённую теорию ядерной структуры из-за отсутствия такого параметра малости – отношения ядерного взаимодействия нуклонов к их собственной энергии. Другой немаловажной причиной тому является то, что до сих пор не установлена аналитическая формула сил между нуклонами, несмотря на обилие экспериментальных сведений о взаимодействиях нуклонов. Многочисленные эксперименты установили, что ядерные силы обладают следующими свойствами.

1. Ядерные силы оказываются весьма **интенсивными**, поэтому их относят к **сильным взаимодействиям**. Они на 3 порядка мощнее электромагнитных сил. Ядерные силы обеспечивают устойчивое состояние ядра со средней энергией связи  $8\text{МэВ}$ , составляющей  $\sim 10^{-2}$  от энергии покоя нуклона  $m_p c^2 \approx 940\text{МэВ}$ . А электромагнитные силы приводят к образованию атом водорода, в котором энергия связи электрона составляет  $\sim 10^{-5}$  часть от энергии покоя  $m_e c^2 \sim 0,5\text{МэВ}$ . Отношение этих характерных коэффициентов даёт величину  $\sim 10^{-3}$ , т.е. электромагнитное взаимодействие на 3 порядка слабее ядерных взаимодействий.

2. В отличие от электромагнитных сил, ядерные силы имеют конечный радиус действия  $R_s \sim 10^{-15}\text{м}$ , т.е. являются **короткодействующими**. К такому заключению привели уже первые опыты Резерфорда, которое было подтверждено многочисленными экспериментальными данными.

3. Ядерное взаимодействие между нуклонами носит **притягательный** характер, но на малых расстояниях притяжение между нуклонами сменяется **отталкиванием**. Для описания это свойство ядер-

ных сил вводят отталкивающую сердцевину. Считается, что ядерный потенциал обладает сингулярным поведением, стремясь к  $+\infty$  при стремлении расстояния к  $r \rightarrow 0$  (Рис.2.1).

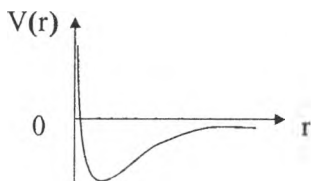


Рис. 2.1. Отталкивающая сердцевина потенциала взаимодействия нуклонов

4. Ядерные силы являются **нецентральными**, т.е. они зависят не только от расстояния между нуклонами, но и от взаимной ориентации их спинов и от ориентации спинов относительно прямой, соединяющей нуклонов. Нецентральную часть ядерного взаимодействия называют **тензорными силами**. Тензорный характер ядерных сил представляется потенциалом в следующей форме:

$$U_T = V(r)\{3(\vec{s} \cdot \vec{n}) - s^2\} \quad (2.1)$$

где  $\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$  - спин двух частиц.

В качестве примера проявления таких сил можно привести ядро дейтерия  ${}^2_1\text{H}$ , у которого спин  $S=1$ , т.е. спины нейтрона и протона параллельны. Но не существует связанного состояния нейтрона и протона с общим спином  $S=0$ . В случае центральных сил связанное состояние 2 нуклонов не зависит от направления спинов, и такое состояние с  $S=0$  должно существовать.

5. Ядерные силы обладают свойством **зарядовой независимости**. Это означает равенство ядерных сил, действующих между протоном и протоном, между нейтроном и нейтроном и между протоном и нейтроном, находящихся в одинаковых состояниях. О зарядовой симметрии говорит и равенство сечений  $p-p$ - рассеяния и  $n-p$ -рассеяния при высоких энергиях, когда вкладом кулоновского рассеяния протонов можно пренебречь. Об этом свойстве ядерных сил



**Юкава Хидэки (1907-1981)** – японский физик-теоретик, родился в Токио. Окончил ун-т в Киото (1929), там же преподавал (1932-33), в ун-те Осаке (1933-39), директор Ин-та фундаментальной физики (1939-70). В 1935 выдвинул гипотезу о существовании частиц, ответственных за перенос ядерного взаимодействия между нуклонами в ядре. Предсказанные им частицы (пимезоны) были обнаружены в 1947 экспериментально (Нобелевская премия, 1949). Совместно с С.Сакатой предсказал в 1935  $K$ -захват, в 1938 построил скалярную теорию ядерных сил. Принимал участие в движении ученых за запрещение атомного оружия.

свидетельствует то, что у легких ядер, в которых роль электромагнитного взаимодействия не велика, число  $Z$  протонов примерно равно числу  $N$  нейтронов. Но с наибольшей убедительностью свойство зарядовой симметрии подтверждает сравнение энергетических спектров зеркальных ядер (рис.2.2).

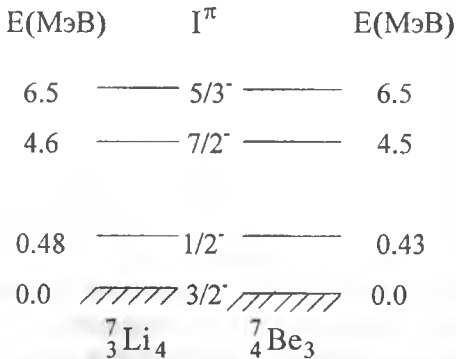


Рис. 2.2. Схема энергетических уровней пары зеркальных ядер

6. Ядерные силы обладают свойством насыщения. Это следует из того, что для ядра полная энергия, пропорциональна числу частиц  $E_{Z,A} \sim \tilde{\epsilon}A$ , в то время как электромагнитная энергия взаимодей-

вия заряженных частиц пропорциональна числу пар частиц  $A(A-1)/2$ , т.е. приблизительно  $E_{\text{кул}} \sim A^2$ . Это означает, что нуклон в ядре взаимодействует только с небольшим числом соседних нуклонов, т.е. ядерные силы обладают свойством насыщения. Таким свойством насыщения обладают и силы, действующие в химии. Например, в молекуле воды один атом кислорода может связать только два атома водорода  $\text{H}_2\text{O}$ .

7. Ядерные силы являются **обменными силами**. Как известно из химии, в молекуле водорода  $\text{H}_2$  существует ковалентная связь между атомами водорода, которая происходит за счет постоянного обмена электроном между атомами.

Исходя из аналогии с химическим взаимодействием, японский физик Юкава выдвинул в 1935 году гипотезу, что ядерное взаимодействие есть результат обмена нуклонов виртуальными мезонами. Он оценил массы этих частиц на основе соотношения неопределенностей  $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ , согласно которому закон сохранения энергии может нарушаться на величину  $\Delta E$  только в течение времени  $\Delta t \sim \hbar / \Delta E$ . Один нуклон испускает частицу, а другой нуклон ее быстро поглощает, затем он испускает ее и первый нуклон ее поглощает. Такой процесс обмена промежуточной частицей происходит постоянно между нуклонами, находящимися в связанном состоянии. Промежуточные частицы, участвующие в процессе обмена, называют **виртуальными частицами**.

Оценим массу  $m$  этой виртуальной частицы. При ее испускании и поглощении происходит нарушение закона сохранения энергии на величину  $\Delta E \sim mc^2$  на время  $\Delta t \sim \hbar / mc^2$ . За это время частица, двигаясь со скоростью, близкой к скорости света, проходит расстояние между нуклонами, равное радиусу действия ядерных сил  $R_s \sim c \Delta t$ . Откуда находим массу виртуальной частицы

$$m \sim \Delta E / c^2 = \hbar / \Delta t c^2 = \hbar / R_s c \sim (200 \div 300) m_e, \quad (2.2)$$

т.е. масса этих частиц промежуточная между массой электрона и массой нуклона. Поэтому их назвали **мезонами**. В 1937 году были открыты мюоны - частицы промежуточной массы, которых приняли за переносчиков ядерного взаимодействия. Но оказалось, что эти частицы слабо взаимодействуют с ядрами. И только в 1947 году были открыты  $\pi$ -мезоны, переносчики ядерного взаимодействия.

Они существуют в виде  $\pi^+, \pi^-, \pi^0$ . Следовательно, изоспин  $\pi$ -мезона равен  $T=1$ , проекция которого  $T_3$  принимает три значения  $+1, 0, -1$ , соответствующие частицам  $\pi^+, \pi^0, \pi^-$ . Внутренняя четность отрицательна:  $J^P = 0^-$ . Их массы имеют следующие значения:

$$m_{\pi^+} = m_{\pi^-} \approx 139,57 \text{ МэВ} \approx 273 m_e \quad (2.3 \text{ а})$$

$$\text{и} \quad m_{\pi^0} \approx 134,97 \text{ МэВ} \approx 264 m_e. \quad (2.3 \text{ б})$$

$\pi$ -Мезоны нестабильны и обладают средним временем жизни:

$$t_{\pi^+} = t_{\pi^-} \approx 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ с}, \quad t_{\pi^0} \approx 0,8 \cdot 10^{-16} \text{ с} \quad (2.4)$$

Итак, согласно современной мезонной теории ядерных сил два нуклона, находясь на малом расстоянии  $r \leq \hbar / m_{\pi} c$ , обмениваются виртуальными пионами, что является причиной их взаимодействия. При этом возможны 4 типа обмена:

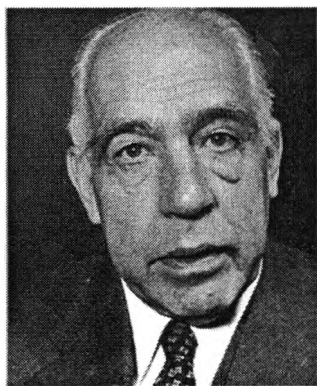
$$p \leftrightarrow p + \pi^0, \quad n \leftrightarrow n + \pi^0, \quad p \leftrightarrow n + \pi^+, \quad n \leftrightarrow p + \pi^-. \quad (2.5)$$

Если имеется один изолированный нуклон, то он находится в облаке испускаемых и поглощаемых им виртуальных пионов. При сближении другого нуклона до этого облака происходит обмен пионами, так осуществляется взаимодействие между нуклонами.

## 2.2. Коллективные модели ядра. Колебательные и вращательные возбуждения ядра

Несмотря на обилие сведений о взаимодействии нуклонов, до сих пор не удается установить аналитическое выражение ядерных сил и построить завершённую теорию атомного ядра. Поэтому для количественного описания структуры ядра прибегают к приближенным, модельным описаниям ядра. Под ядерной моделью понимают совокупность упрощающих реальность предположений, которые, не требуя точного знания ядерных сил, позволяют с некоторой точностью описать некоторые характеристики ядер. Естественно, для описания всего многообразия свойств и явлений ядра пришлось развить большое количество разных моделей ядра. Наиболее важные модели можно объединить в 3 большие группы: **коллективные модели**, описывающие коллективные возбуждения ядер,





**Нильс Бор (1885-1962)** – датский физик-теоретик, окончил ун-т в Копенгагене (Дания, 1908), работал в Кембридже у Дж.Дж. Томсона (1911-12), у Резерфорда в Манчестере (1912-13), с 1920 - директор созданного им в Копенгагене Института теоретической физики, который стал международным центром физиков-теоретиков. В 1913 создал первую квантовую теорию атома (Нобелевская премия, 1922). Он один из создателей гидродинамической модели ядра (1936), автор теории составного ядра и теории деления атомного ядра (1939).

**оболочечные модели**, описывающие одночастичные возбуждения ядер, и **обобщенные модели**, объединяющие положения коллективных и оболочечных моделей.

Первой коллективной моделью ядра была **капельная (гидродинамическая) модель**, предложенная в 1936 г. Н. Бором совместно с Дж. Уиллером и Я. Френкелем. В этой модели ядро рассматривается как сферическая капля несжимаемой заряженной жидкости.

В рамках этой модели удалось объяснить многие свойства атомного ядра и получить полуэмпирическую формулу для энергии связи атомных ядер (формула Вайцзеккера), которая позволила понять некоторые закономерности в  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадах, делении ядер и оценивать массы и энергии связи новых ядер. Капельная модель была основой для создания более совершенных моделей, которые описывали коллективные возбуждения ядра: колебательное и вращательное возбуждения. Такие модели получили обобщающее название **коллективной модели**.

В рамках такой модели колебание рассматривается как колебание поверхности ядра. При этом поверхность ядра может колебаться с различными мультипольностями  $\lambda$ . Колебание с мультипольностью  $\lambda=0$  - называют монопольным колебанием, с  $\lambda=1$  - дипольным колебанием, с  $\lambda=2$  - квадрупольным колебанием и т.д. Монопольное колебание совершает ядра, сжимаясь и расширяясь

вблизи равновесной формы (рис 2.3, а). Дипольные колебания производят нейтроны относительно протонов (рис.2.3,в). Эти колебания имеют большие энергии  $\sim 20$  МэВ и проявляются в виде гигантских резонансов в реакциях рассеяния протонов на ядрах.

Квадрупольные колебания ядра совершаются в виде нарушения сферичности ядра (рис.2.3,б). Они имеют низкие энергии  $\sim 1$  МэВ и наблюдаются во многих ядрах. Квантование таких колебаний приводит к квадрупольным фононам со спином  $I^\pi = 2^+$  и с энергией  $E = \hbar\omega_2$ . В качестве примера на рис.2.4 приводится спектр нижайших энергетических уровней четно-четного ядра  ${}^{60}_{28}\text{Ni}$ . Первый возбужденный уровень со спином  $I^\pi = 2^+$  является одно-

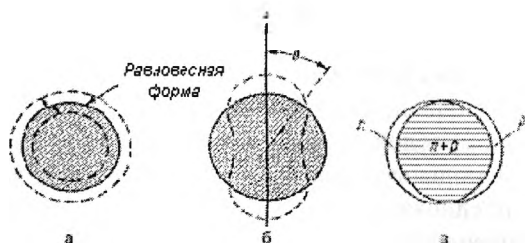
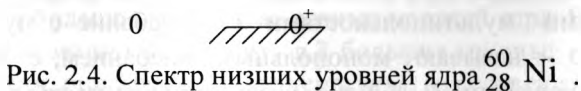
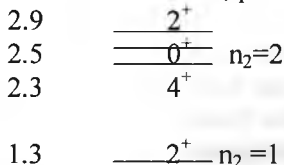


Рис.2.3. Колебания ядра: а - монопольное, б - квадрупольное, в - дипольное.

фононным уровнем с энергией  $1\hbar\omega_2 = 1,3$  МэВ. Выше по энергии наблюдается двухфононное состояние, расщепленное



из-за взаимодействия фононов на 3 уровня со спинами  $I^\pi = 0^+, 2^+, 4^+$  и центром тяжести, приблизительно равным энергии двух фононов  $\sim 2\hbar\omega_2$ .

Согласно квантовой механике сферически-симметричная система не имеет вращательные степени свободы, так как при повороте такой системы не происходит перемещение материи в пространстве из-за принципа тождественности микрочастиц. Поэтому сферические ядра не имеют вращательные возбуждения. Вращаться могут несферические (деформированные) ядра вокруг оси, перпендикулярной оси симметрии. Энергия вращательных состояний четно-четного ядра описывается в первом приближении соотношением

$$E_I = \frac{\hbar^2 I(I+1)}{2\mathfrak{I}}, \quad (2.6)$$

где  $\mathfrak{I}$  - момент инерции ядра,  $I$  - спин ядра, пробегающий целочисленные значения.

| $J^\pi$                | $E^*$ , кэВ | $E_{\text{теор}}$ |
|------------------------|-------------|-------------------|
| $(20^+)$ — — — — —     | (4413.6)    | 7000              |
| $1\varepsilon^+$ ————— | 3761.6      | 5700              |
| $1\varepsilon^+$ ————— | 3147.3      | 4500              |
| $1\varepsilon^+$ ————— | 2563.6      | 3500              |
| $1\varepsilon^+$ ————— | 2013.3      | 2600              |
| $1\varepsilon^+$ ————— | 1503.3      | 1800              |
| $\varepsilon^+$ —————  | 1041.3      | 1200              |
| $\varepsilon^+$ —————  | 641.1       | 700               |
| $\varepsilon^+$ —————  | 320.6       | 330               |
| $2^+$ —————            | 100.0       | 0                 |

Рис.2.6. Вращательный спектр сильнодеформированного ядра  $^{170}\text{Hf}$

Если определить момент инерции ядра из энергии первого уровня со спином  $J = 2$ , то теоретическое значение энергии вращения, вычисляемое по формуле (2.6), с увеличением углового момента вращения быстро расходится с экспериментальной энергией. На рис.2.5 они приведены в последнем столбце. Это указывает на то, что вращение ядра отличается от вращения твердого тела. Атомное ядро является довольно мягким образованием, проявляет центробежное растяжение формы, в нем так же проявляются силы Кориолиса, которые приводят к определенным следствиям. Поэтому исследование вращения ядра является одно из эффективных направлений изучения структуры ядра.

### 2.3. Модель оболочек. Одночастичные состояния ядер

Экспериментальные исследования выявили периодичность в изменении таких характеристик ядер, как энергия связи, спин, магнитный момент и др. Описать эту периодичность капельная модель была не способна.

Например, существует важная закономерность: особенно устойчивыми являются ядра, у которых число протонов или нейтронов равно магическому числу: 2,8,20,28,50,82,126. Такая закономерность известна и в атомах, и объясняется наличием электронных оболочек в атоме. Атомы инертных газов особенно стабильны, так как они отличаются тем, что они обладают полностью заполненными оболочками.

Существование магических ядер наводит на мысль, что оболочечная структура свойственна и атомным ядрам. По аналогии с электронами в атоме полагают, что нуклоны в ядре также движутся почти независимо в некотором самосогласованном поле. Но в отличие от атома в ядре нет выделенного силового центра, создающего поле и удерживающие электроны в этом поле. В ядре сами нуклоны создают такое поле, как результат усреднения взаимодействия всех нуклонов ядра. Но для применения к ядру приближения самосогласованного поля необходима предпосылка образования оболочек. В этом важную роль играет принцип Паули: принцип Паули препятствует потере энергии нуклоном при столкновении, так как все низколежащие одночастичные состояния заняты, то нуклоны движутся независимо друг от друга, без столкно-

вения по своим орбитам в самосогласованном поле. Это позволяет говорить об индивидуальных орбитах нуклонов.

Таким образом, оболочечная структура ядра основана на положении, что ядерные силы, действующие на отдельный нуклон, можно свести к среднему полю  $V(r)$  по аналогии с центральным полем в атоме. Малый радиус действия ядерных сил говорит о том, что форма среднего поля должна быть сходной с формой распределения плотности ядерной материи – распределением Ферми (1.50). Эта форма потенциала описывается функцией

$$V_{SW}(r) = \frac{V_0}{1 + \exp\left(\frac{r - R_{1/2}}{\delta}\right)}, \quad (2.7)$$

Здесь  $V_0$  – глубина потенциальной ямы, а другие величины схожи с величинами формулы (1.50).

Решающий шаг в становлении оболочечной модели сделали М. Гепперт-Майер и Дж. Иенсен в 1949 г., высказав идею, что в ядрах в отличие от атома значительную роль играет взаимодействие  $\bar{s}$  спина нуклона с его  $\bar{l}$  орбитальным моментом импульса. Благодаря включению в рассмотрение спин-орбитального взаимодействия

$$V_{ls}(r) = -V_{ls} \cdot \hat{s} \cdot \hat{l} \quad (2.8)$$

удалось воспроизвести наблюдаемые в эксперименте магические числа.

Таким образом, гамильтониан нуклона в соответствующем самосогласованном поле имеет вид

$$\hat{H} = \hat{T} + V_{SW}(r) + V_{ls}(r). \quad (2.9)$$

Собственные состояния нуклона в таком потенциале находят, решая уравнение Шредингера

$$\hat{H}\Psi_n = E_n\Psi_n \quad (2.9)$$

численно, разлагая искомую функцию состояний по базису собственных функций сферического осциллятора

$$\Psi_n = \sum a_{nlm} \Psi_{nlm}. \quad (2.10)$$



**Гепперт-Майер Мария** (1906 –1972) – американский физик-теоретик, родилась в Катовице. Окончила Геттингенский ун-т (1930). В 1931-39 работала в ун-те Дж Гопкинса, в 1939-46- в Колумбийском ун-те, в 1946-60 – в Аргоннской национальной лаборатории, с 1960-профессор Калифорнийского ун-та. Предсказала двухфотонное поглощение света, двойной бета-распад и разработала его теорию. Ввела представление о спин-орбитальной связи и независимо от Х. Йенсена создала оболочечную модель ядра (Нобелевская премия, 1963).

Эти состояния характеризуются квантовыми числами, которые определяют физические величины, сохраняющиеся при движении в сферическом осцилляторном поле, и описываются волновыми функциями вида:

$$\psi_{nlm} = \frac{u_{nl}(r)}{r} Y_{lm}(\theta, \varphi), \quad (2.11)$$

где сферическая функция  $Y_{lm}(\theta, \varphi)$  является собственной функцией оператора квадрата орбитального момента  $\hat{l}^2$  и проекции момента  $l$  на ось  $z$ , равной  $m$ .

На рис.2.6. приведено схематическое изображение энергетических уровней нуклона в потенциале Вудса-Саксона. Слева расположены осцилляторные оболочки  $pl\hbar\omega$ , которые расщепляются на энергетические уровни с различными значениями  $l$  орбитального квантового числа. При этом оболочка распадается на уровни с такими  $l$  орбитальными квантовыми числами, что четность  $l$  номера оболочки совпадает с четностью  $l$  орбитального квантового числа.

Также отметим, что вместо обозначения последовательности уровней с квантовыми числами  $nl = 00, 11, 20, 22, 31, 33, 40, 42, 44, \dots$  используются спектроскопическое обозначение:

$$1s, 1p, 2s, 1d, 2p, 1f, 3s, 2d,$$

где главное квантовое число  $n$  заменено числом, определяющим, который раз в этой последовательности встречается уровень с данным орбитальным квантовым числом  $l$ , т.е. вместо значения орбитального квантового числа  $l = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$  пользуются буквенными обозначениями:  $s, p, d, f, g, \dots$

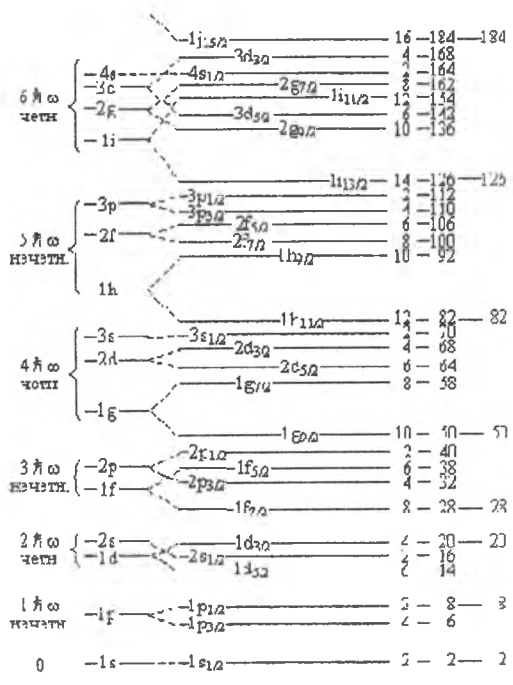


Рис.2.6. Одночастичные уровни в оболочечном потенциале.

Учет спин-орбитального взаимодействия приводит к дополнительному расщеплению уровня с  $l$  орбитальным квантовым числом на два подуровня с полным угловым моментом  $j = l \pm s$ . Вектор полного момента  $\vec{j}$  имеет  $2j+1$  значений проекции, и соответственно  $j$ - подуровень имеет  $2j+1$  состояний, которые имеют одну и ту же энергию. В этом случае говорят, что  $j$ - подуровень вырожден  $2j+1$  кратно. Принцип Паули позволяет на этом подуровне за-

селиться  $2j+1$  нейтронов или протонов отдельно. На рис.2.6 против каждого  $j$ - подуровня указано число вакантных мест. Далее указано полное число нуклонов одного сорта при последовательном заполнении всех нижних уровней, т.е. число нейтронов или протонов в ядре. Последнее число, приведенное на рис.2.6, – это магическое число, при котором заполняется оболочка.

Как видно из рис.5.6, что магические числа 28, 50, 82, 126 получаются благодаря учету спин-орбитального взаимодействия. Подуровни с наибольшим моментом  $1f_{7/2}$ ,  $1g_{9/2}$ ,  $1h_{11/2}$ ,  $1i_{13/2}$  оказываются энергетически более выгодными, и они опускаются в нижнюю осцилляторную оболочку.

В соответствии с принципом Паули все нижние по энергии уровни в ядре последовательно заполняются нейтронами и протонами раздельно. Наличие спаривательного взаимодействия между нуклонами приводит к тому, что суммарный угловой момент нуклонов заполненного  $j$ - подуровня равен нулю. Т.е. два нуклона с одинаковым квантовым числом  $j$ , но с противоположными по знаку магнитными квантовыми числами  $m$  и  $-m$  спариваются так, что их полный момент равен нулю. Поэтому все нуклоны четно-четного ядра спарены и спин такого ядра в основном состоянии равен нулю. А спин соседнего нечетного ядра определяется угловым моментом того нуклона, который находится сверх заполненного  $j$ - подуровня.

Возбуждение нечетного ядра происходит перескоком нечетного нуклона на более высокий подуровень. А для возбуждения четно-четного ядра необходима дополнительная энергия, чтобы разорвать пару, а затем неспаренный нуклон заселить на более высокий уровень. Его место остается пустым, или иначе, дыркой. Таким образом, возбуждение четно-четного ядра определяется состоянием неспаренной частицы и дырки и называют частично-дырочным возбуждением. Тем не менее, такие возбуждения нечетного ядра и четно-четного ядра называют **одночастичными** возбуждениями, в противоположность коллективным возбуждениям, в которых участвует большое количество нуклонов.

Оболочечная модель во многих случаях хорошо воспроизводит экспериментальные значения энергии, спинов и четностей низко-возбужденных состояний ядра, электрических квадрупольных и



магнитных моментов атомных ядер, средние времена жизни  $\beta$ -активных ядер, объясняет распределение ядер-изомеров. Наилучшие предсказания оболочечная модель дает для ядер вблизи заполненных оболочек.

В качестве примера применения оболочечной модели рассмотрим спины основных состояний легких ядер. Изотоп гелия  ${}^3_2\text{He}_1$  имеет ядро, состоящий из  $N=1$  нейтрона и  $Z=2$  протона. Два нейтрона с конфигурацией  $1s_{1/2}$  спарены и их суммарный момент равен нулю. Спин этого ядра определяется неспаренным протоном  $1s_{1/2}$  и равен  $I^\pi = 1/2^+$ .

Ядро бериллия  ${}^9_4\text{Be}_5$  имеет  $N=5$  нейтронов и  $Z=4$  протонов. Протоны спарены, поэтому вклад в спин определяется состоянием нечетного нейтрона в конфигурации  $1P_{3/2}$ . Для заполнения этой подоболочки не хватает одного нейтрона, т.е. при добавлении одного нейтрона с  $1P_{3/2}$  заполняется подоболочка, у которой полный момент равен нулю. Следовательно, здесь мы имеем дырку с конфигурацией  $1P_{3/2}$ , и спин ядра определяется этой дыркой и равен  $I^\pi = 3/2^-$ .

Рассмотрим магнитный дипольный момент ядра в одночастичной модели оболочек. Оператор магнитного момента ядра состоит из двух частей, одна из которых обусловлена током, создаваемым орбитальным движением заряда, другая – спиновым магнитным моментом нуклона:

$$\hat{\mu} = \mu_N (g_l \cdot \hat{l} + g_s \cdot \hat{s}), \quad (2.12)$$

где  $\mu_N$  - ядерный магнетон,  $g_l$  и  $g_s$  - орбитальное и спиновое гиромагнитные отношения, значения которых приведены в (1.46).

Магнитный момент ядра определяется как среднее значение  $z$ -той компоненты оператора (2.12) в состоянии с  $j_z = m = j$ :

$$\mu = \int \psi_{j,m=j}^* \hat{\mu} \psi_{j,m=j} dr \quad (2.13)$$

Вычисление магнитного момента нечетного ядра в одночастичной оболочечной модели дается выражением

$$\mu = \{(j-1/2)g_l + g_s/2\}\mu_N \quad \text{при } j=1+1/2, \quad (2.14)$$

$$\mu = \frac{j}{j+1} \{(j+3/2)g_l - g_s/2\}\mu_N \quad \text{при } j=1-1/2. \quad (2.15)$$

Теоретические значения магнитного момента, вычисленные по формулам (2.14) и (2.15), приведены на рис.2.7 в виде кривых для ядер с нечетным нейтроном. Эти кривые называют **линиями Шмидта**. Экспериментальные значения магнитных моментов этих ядер приведены кружочками. Видно из рис.2.7, что экспериментальные значения магнитных моментов лежат не на линиях Шмидта, а между линиями Шмидта.

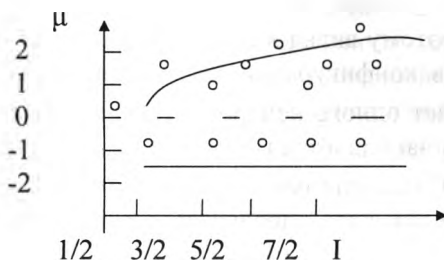


Рис. 2.7. Магнитные моменты ядер с нечетным нейтроном (кружочки) и теоретические линии Шмидта

А в большинстве случаев экспериментальные значения магнитных моментов лежат заметно ближе к одной из линий. Таким образом, модель оболочек дает качественное описание магнитных моментов. Для получения более точного совпадения теории с опытом необходим учет дополнительных взаимодействий между нуклонами.

Теперь рассмотрим вопрос, как оболочечная модель описывает электрический квадрупольный момент ядра. Согласно модели оболочек теоретическое значение квадрупольного момента нечетного ядра определяется квадрупольным моментом последнего нечетного протона и выражается формулой

$$Q = -e r^2 \frac{2j-1}{2j+1}, \quad (2.16)$$

где  $r^2$  - средний квадрат расстояния неспаренного протона от центра ядра.

Вычисленные по формуле (2.16) значения квадрупольного момента ядра согласуются с экспериментом только для ядер вблизи замкнутых оболочек. Но вдали от замкнутых оболочек величины квадрупольных моментов ядер во много раз превосходят теоретическое значение. Отсюда следует, что квадрупольные моменты ядер имеют не одночастичное, а коллективное происхождение. Такие ядра с большим квадрупольным значением встречаются в областях с массовыми числами  $150 \leq A \leq 180$  (область редких земель) и  $A > 220$  (заурановая область). Эти области ядер называют областями сильнодеформированных ядер.

Как видим, что одночастичная оболочечная модель имеет ограниченное применение. Но она служит основой для построения более правильных моделей, которые строятся, усложняя и расширяя одночастичную оболочечную модель.

#### 2.4. Обобщенная модель

Атомные ядра проявляют как одночастичные возбуждения, так и коллективные возбуждения, для описания которых приходилось пользоваться различными моделями. Д. Рейнатором, О. Бором и Б. Моттelsonом была разработана обобщенная модель ядра, в которой описываются коллективные и одночастичные степени свободы ядра. В этой модели предполагается сильная связь внешних по отношению к заполненным оболочкам нуклонов с остовом, что может приводить к устойчивой равновесной деформации ядра. Движение остова описывается в гидродинамической модели. Одночастичные состояния рассчитываются в деформированном потенциале.

Для существования вращательных возбуждений ядра необходимо допустить, что форма ядра может деформироваться. Как известно, что при полном заполнении нуклонами оболочки ядро приобретает сферическую форму, угловые моменты нуклонов полностью взаимно компенсируются, и спин ядра равняется нулю. Если же в ядре имеются нуклоны сверх остова, то взаимодействие этих нуклонов между собой и с нуклонами остова приводит к отклонению формы ядра от сферичности. Таким образом, в ядрах с числом нуклонов, сильно отличающихся от магических чисел, возникает



**Оге Бор** (1922-) – датский физик-теоретик, сын Н. Бора. Окончил Копенгагенский ун-т (1946), работал в Лос-Аламосской лаб-рии (1944-45), в Ин-те теоретической физики в Копенгагене (с 1946), профессор Копенгагенского ун-та (с 1956) директор Ин-та им. Н. Бора (1962-70), в Ин-те теоретической физики (с 1975). Разработал совместно с Б. Моттельсоном коллективную модель ядра (Нобелевская премия, 1975). Построил модель переходного состояния делящегося ядра и каналов деления ядер. В 1958 с Б. Моттельсоном и Д. Пайнсом выдвинул идею сверхтекучей модели ядра.

**устойчивая равновесная деформация ядра.** При этом считается, что эта деформация имеет форму эллипсоида вращения.

Потенциал самосогласованного поля деформированного ядра получает отклонения от сферичности при замене в формуле (2.7) постоянного радиуса ядра  $R_{1/2} = \text{const}$  на выражение поверхности жидкой капли

$$R_{1/2}(\theta, \varphi) = \sum_{\lambda\mu} \alpha_{\lambda\mu} Y_{\lambda\mu}(\theta, \varphi). \quad (2.17)$$

Если положить в этой формуле, например, мультипольность  $\lambda = 2$ , то получим квадрупольную форму эллипсоида вращения. Задавая коэффициентам разложения при сферической функции  $Y_{\lambda\mu}(\theta, \varphi)$  возможность гармонически меняться со временем  $\alpha_{2\mu}(t)$ , описывают квадрупольные колебания поверхности эллипсоида.

Следующим важным положением модели является - это выполнение условия адиабатичности (медленности) коллективных движений (колебания и вращения) деформированного ядра по отношению к характерным скоростям внутреннего движения, связанного с одночастичным возбуждением:

$$\omega_{\text{колл}} \ll \omega_{\text{внутр}} \quad (2.18)$$

Выполнение этого условия позволяет отдельно рассматривать внутреннее движение нуклона в деформированном самосогласованном поле от коллективного движения ядра в целом. В связи с этим рассматриваются две системы координат: лабораторная система координат  $(x, y, z)$ , относительно которой вращается ядро, и связанная с ядром вращающаяся система координат  $(1, 2, 3)$ , в которой рассматривается одночастичное движение нуклонов. Принято направлять ось 3 вращающейся системы вдоль большой оси симметрии эллипсоидального ядра.

Полный момент количества движения ядра – спин ядра  $\vec{I}$  складывается из коллективного вращательного момента ядра  $\vec{R}$  и внутреннего момента нуклонов  $\vec{J} = \sum \vec{j}_a$ :

$$\vec{I} = \vec{R} + \vec{J}. \quad (2.19)$$

Моменты  $\vec{J}$  и  $\vec{R}$  прецессируют вокруг направления  $\vec{I}$  – полного момента количества движения. Так как аксиально-симметричное эллипсоидальное ядро может вращаться только вокруг оси перпендикулярной к оси симметрии 3, то из этого вытекает (см. рис.2.8), что вектор  $\vec{R}$  перпендикулярен оси 3, и проекции полного и внутреннего угловых моментов на ось симметрии должны быть равны между собой:

$$I_3 = J_3 = \hbar K \quad (2.20)$$

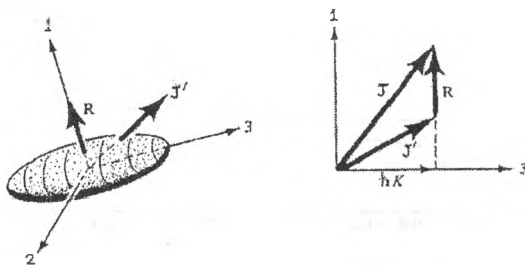


Рис. 2.8. Сложение угловых моментов в сфероидальном ядре

Из-за прецессии вектор  $\vec{J}$  не имеет фиксированного направления, но имеет определенное значение проекции одновременно -  $M$  на неподвижную ось  $z$  и  $K$  - на вращающуюся ось симметрии.

3. Итак, состояние движения аксиально-симметричного ядра можно характеризовать набором квантовых чисел  $|\alpha IMK\rangle$ , где  $\alpha$  - дополнительные квантовые числа, определяющие внутреннее состояние нуклонной системы.

Решая уравнения Шредингера в таком деформированном поле, получают собственные энергии и собственные функции нуклона, часть которых приведена на рис.2.9. Как видно из рисунка, что энергетический спектр одночастичных состояний нуклона меняется в зависимости от величины параметра деформации  $\epsilon$ . При  $\epsilon = 0$  картина уровней такая же, как в сферическом оболочечном потенциале. Появление аксиально-симметричной деформации приводит к расщеплению каждой  $nlj$  орбиты на  $(2j + 1)/2$  энергетических уровней со значениями квантового числа  $m = K = j, j - 1, \dots, 1/2 > 0$ .

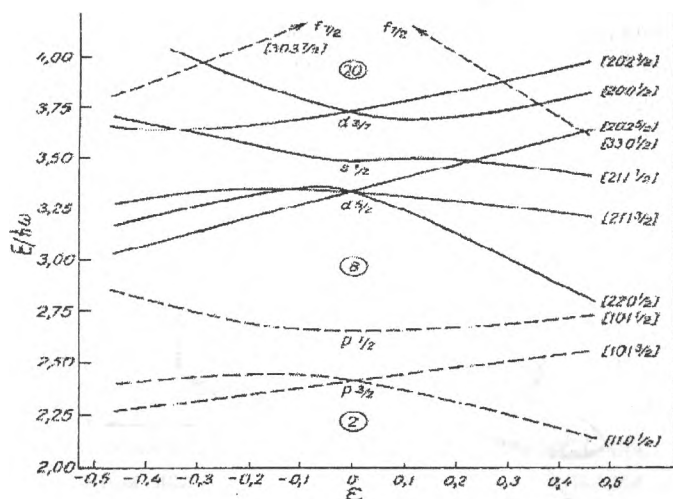


Рис. 2.9. Одночастичные уровни энергии в сфероидальном потенциале при  $2 < N, Z < 20$ . В квадратных скобках указаны асимптотические квантовые числа  $N, n_3, \Lambda$  и  $K$ .

Каждый расщепленный уровень остается дважды вырожденным по знаку проекции ( $\pm K$ ) так, что на каждом таком уровне могут находиться не более двух нуклонов одного сорта, отличающихся знаком проекции углового момента на ось симметрии  $Z$ .

В аксиально-симметричном поле сохраняются проекции квантовых чисел одночастичного состояния нуклона:  $n_z$  главного квантового числа  $n$ ,  $L$  - орбитального момента  $l$  и  $\Sigma$  - спинового момента нуклона. Одночастичные состояния нуклона определяются заданием этих квантовых чисел. Полную энергию деформированного ядра можно представить в виде суммы энергии вращения относительно внешней системы координат и энергии движения нуклонов относительно внутренней системы координат:

$$E = \frac{\bar{R}^2}{2\mathfrak{J}} + E_{\text{одн}} = E_{\text{вращ}} + E_{\text{внутр}} + E_{\text{взаим}}, \quad (2.21)$$

где  $E_{\text{вр}} = \frac{I(I+1) - K^2}{2\mathfrak{J}}$  - собственно вращательная энергия, зависящая только от коллективных переменных,

$E_{\text{внутр}} = E_{\text{одн}} + \frac{J_1^2 + J_2^2}{2\mathfrak{J}}$  - внутренняя энергия ядра, зависящая от внутренних переменных,

$E_{\text{взаим}} = -\frac{2(I_1 J_1 + I_2 J_2)}{2\mathfrak{J}}$  - взаимодействие внутренних и коллективных степеней свободы (так называемое взаимодействие Кориолиса).

В выражении (2.21) рассмотрено только вращательное коллективное движение. В общем случае, при наличии и колебательных степеней свободы, необходимо добавить и энергии колебания ядра соответствующей мультипольности

$$E_{\text{колеб}} = n_\lambda \hbar \omega_\lambda. \quad (2.22)$$

Обобщенная модель основана на адиабатическом приближении, в соответствии с которым каждое внутреннее состояние не искажается при вращении ядра. Поэтому каждому внутреннему состоянию

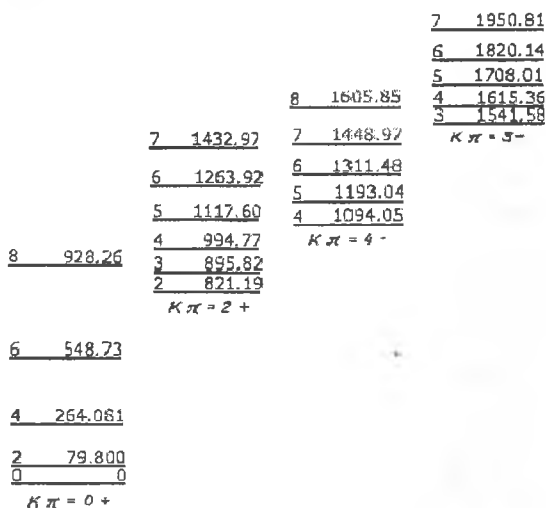


Рис. 2.10. Энергетические уровни ядра  $^{168}\text{Er}$ .

с энергией  $E_{\text{внутр}}$  и проекцией  $K$  соответствует вращательная полоса (см. рис. 2.10). Вращательная полоса имеет последовательность уровней со спинами  $I = K, K + 1, K + 2, \dots$ . Если внутреннее состояние ядра характеризуется квантовым числом  $K = 0$ , то из-за аксиальной симметрии ротатора возможны только четные значения угловых моментов вращательных состояний:  $I = 0, 2, 4, 6, \dots$

Более совершенные варианты обобщенной модели рассматривают взаимодействие между разными вращательными полосами, вызываемое силами Кориолиса.

## 2.5. Учет остаточных взаимодействий нуклонов. Микроскопические теории структуры ядра

В дальнейшем модели ядра совершенствовались, главным образом, на основе учета остаточных взаимодействий, которые оставались не учтенными в среднем самосогласованном потенциале, и на более строгом теоретическом описании рассматриваемых физических явлений.



Многочисленные экспериментальные факты давно указывали на существовании спаривательного взаимодействия между нуклонами в ядре, но первоначальные ядерные модели не могли теоретически описать спаривание нуклонов. Это стало возможным после того, как академик Н.Н. Боголюбов разработал теорию явлений сверхтекучести и сверхпроводимости. Идею о существовании в ядре сверхтекучих взаимодействий нуклонов впервые высказали О. Бор, Б.Моттelson и Н.Н. Боголюбов. С.Т. Беляев и независимо от него В.Г. Соловьев применили этот изящный математический аппарат к ядру и получили новую модель, получившую название сверхтекучей модели ядра. Основное положение этой модели основано на том факте, что между двумя нуклонами одного сорта в одинаковых энергетических состояниях и с равными, но с противоположными угловыми моментами, сильное спаривательное взаимодействие.

Эта модель решила ряд проблем, которые оставались не объяснимыми. Одна из проблем была связана с теоретическим описанием момента инерции ядра, т.е. с вопросом о том, как вращается ядерная материя. Оказалось, что вращается она совсем не как жидкая капля, не как твердое тело, а как совершенно новое образование, как сверхтекучая жидкость.

Следующим шагом в развитии ядерных моделей было математическое описание колебания как коллективного движения, в котором непосредственно участвуют пары нуклонов с общим угловым моментом, равным соответствующей мультипольности колебательного возбуждения ядра. Как известно, капельная модель рассматривала колебание, как колебание поверхности жидкой капли. Такое феноменологическое описание колебания оставалось и после квантования колебания. На смену феноменологическому описанию колебания пришла микроскопическая теория колебательных возбуждений. Согласно этой теории нуклоны, движущиеся по своим индивидуальным орбитам, вследствие определенного дальнего действия взаимодействия принимают участие в дополнительном синхронном движении. Такое синхронное движение наблюдается в плазме, когда ионы, движущиеся по своим орбитам, начинают согласованное движение, которое проявляется как колебание. Такое описание ядра называют теперь не моделью, а скорее, как микроскопическая теория структуры ядра. Соответствующая математика

этой теории довольно сложна, поэтому на этом ограничимся наше знакомство с моделями ядра.

### **Вопросы для закрепления знаний**

- 2.1. Перечислите экспериментально установленные свойства ядерных сил и объясните их физический смысл.
- 2.2. Выпишите 4 типа взаимодействия нуклонов через обмен пи-мезонами.
- 2.3. Представляя атомное ядро, как капля несжимаемой жидкости, получите соотношение между радиусом ядра и его массовым числом  $R = r_0 A^{1/3}$ .
- 2.4. Какие члены в формуле Вайцзеккера для энергии связи ядер следуют из капельной модели?
- 2.5. Выпишите формулу, описывающую колебания поверхности сферической капли, и схематично представьте на рисунке  $2^\lambda$ -польные колебания:  $\lambda = 1$  - дипольные,  $\lambda = 2$  - квадрупольные,  $\lambda = 3$  - октупольные,  $\lambda = 4$  - гексадекапольные колебания.
- 2.6. Схематично представьте на рисунке спектр энергии уровней квадрупольных колебаний ядра.
- 2.7. Схематично представьте на рисунке спектр энергии вращательных уровней ядра.
- 2.8. Почему квантовые объекты сферической формы (атомы, молекулы, ядра) не могут иметь вращательный спектр.
- 2.9. Выпишите гамильтониан одночастичной оболочечной модели и поясните необходимость каждого члена гамильтониана.
- 2.10. Перечислите магические числа нейтронов и протонов, и чем отличаются магические ядра?
- 2.11. Какую роль играет принцип Паули в обосновании модели оболочек?
- 2.12. Какими квантовыми числами описываются ядерные состояния в модели оболочек?

2.13. На основе одночастичной модели оболочек установите спины и четности основных состояний следующих ядер:  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^5\text{He}$ ,  ${}^{11}\text{B}$ ,  ${}^{13}\text{C}$ ,  ${}^{15}\text{N}$ ,  ${}^{17}\text{O}$ .

2.14. Изобразите схему заполнения энергетических уровней оболочек нуклонами в ядрах  ${}^{11}\text{B}$ ,  ${}^{17}\text{O}$ .

2.15. Изложите основы обобщенной модели ядра.

2.16. Что такое остаточные взаимодействия и какова роль остаточных взаимодействий сверхтекучего типа в атомном ядре?

### Примеры решения задач

**Задача 2.1.** В опытах Резерфорда было установлено, что ядерные силы действуют на расстояниях порядка  $R_s \approx 10^{-15}$  м. Японский ученый Юкава выдвинул идею, что переносчиками ядерных взаимодействий являются пионы. На основе соотношений неопределенностей оцените массу пионов.

**Решение:** Из соотношений неопределенностей  $\Delta E \Delta t \approx \hbar$  имеем, что закон сохранения энергии может нарушаться на  $\Delta E$  в течение времени  $\Delta t \approx \hbar / \Delta E$ . За это время испускаемая частица удаляется на расстояние  $c \Delta t \approx R_s$ . Так как  $\Delta E = mc^2$ , то масса пионов

$$m = \hbar / R_s c = 1,05 \cdot 10^{-34} / 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8 = 0,3 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \approx 300 \cdot m_e.$$

**Задача 2.2.** На рис.2.2 показан энергетический спектр ядра  ${}^{106}\text{Pd}$ . Оценить энергию первого возбужденного состояния  $I^\pi = 2^+$ .

**Решение:** На рис.2.2 приведен типичный колебательный спектр ядра, имеющего в основном состоянии спин и четность  $I^\pi = 0^+$ .

При энергиях, вдвое превышающих энергию первого возбужденного состояния, находятся три состояния примерно с одинаковой энергией и имеющих квантовые характеристики  $I^\pi = 0^+, 2^+, 4^+$ , что соответствует сумме двух квадрупольных фононов  $\lambda = 2$ . Вычислим среднюю энергию 2 фононов

$$E_{2\phi} = (1,229 + 1,133 + 1,127) / 3 = 1,163 \text{ МэВ}.$$

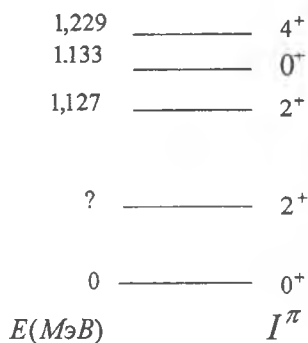


Рис.2.2. Спектр  $^{106}_{46}\text{Pd}$

Тогда энергия однофононного состояния с  $I^\pi = 2$  равна  

$$E_{1\phi} = 1,163 / 2 = 0,582 \text{ МэВ}.$$

**Задача 2.3.** Показать, что низкоэнергетические возбужденные состояния деформированного ядра  $^{180}\text{Hf}$ , представленные на рис. 2.3, представляют собой вращательный спектр. Вычислить изменение момента инерции с ростом спина вращательных уровней.

**Решение:** Энергия вращательных состояний четно-четных

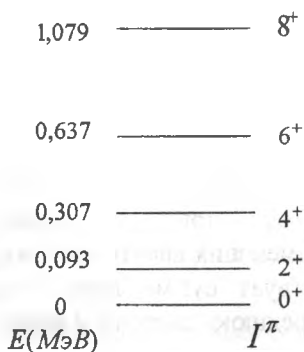


Рис.2.3. Спектр  $^{180}\text{Hf}$

деформированных ядер описывается формулой  $\bar{E}_I = \frac{\hbar^2 I(I+1)}{2J}$ , согласно которой отношение энергии уровней со спином  $I=4$  и  $I=2$  равно  $E_4/E_2 = 3,3$ . Вычислим отношение экспериментальных энергий этих уровней для ядра  $^{180}\text{Hf}$

$$E_4/E_2 = 0,307/0,093 = 3,3.$$

Полученное значение отношения, а также отсутствие в спектре ядра состояний со спином  $I=1,3,5,\dots$  указывает, что это вращательная полоса. Экспериментальное значение момента инерции в единицах  $\hbar^2/\text{МэВ}$  определяется следующим выражением

$$J_I = I(I+1)/(2E_I).$$

Вычислим момент инерции ядра в следующих состояниях:

$$E_2 = 6/(2 \cdot 0,093) = 32,26 \hbar^2/\text{МэВ}$$

$$E_4 = 20/(2 \cdot 0,307) = 32,57 \hbar^2/\text{МэВ},$$

$$E_6 = 42/(2 \cdot 0,637) = 32,97 \hbar^2/\text{МэВ},$$

$$E_8 = 72/(2 \cdot 1,079) = 33,36 \hbar^2/\text{МэВ}.$$

Следовательно, момент инерции ядра возрастает с увеличением скорости вращения ядра, что указывает на появление центробежных сил.

**Задача 2.4.** На основании одночастичной модели оболочек определить значения спинов и четностей  $I^\pi$  основных состояний изотопов кислорода -  $^{15}\text{O}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ .

**Решение:** Четно-четные изотопы  $^{16}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$  имеют в основном состоянии спин и четность  $I^\pi = 0^+$ . Спин и четность ядра  $^{17}\text{O}$  определяется одним нейтроном в состоянии  $1d_{5/2}$  сверх четно-четного остова ядра  $^{16}\text{O}$ . Следовательно, для ядра  $^{17}\text{O}$  спин основного состояния равен  $I^\pi = 5/2^+$ . А спин и четность ядра  $^{15}\text{O}$  определяются "нейтронной дыркой" (по отношению к четно-

четному ядру  $^{16}\text{O}$ ) в состоянии  $1p_{1/2}$ . Спин ядра  $^{15}\text{O}$  равен полному моменту "нейтронной дырки" в этом состоянии  $I=1/2$ , а четность определяется орбитальным моментом  $l$  нуклона в данном состоянии  $\pi = (-1)^l = (-1)^1 = -1$ , то есть  $I^\pi = 1/2^-$ .

**Задача 2.5.** Сравните экспериментальное значение магнитного мента ядер

$$\begin{aligned} \mu(^3_1\text{H}) &= 2,97\mu_N, & \mu(^7_3\text{Li}) &= 3,26\mu_N, \\ \mu(^9_4\text{Be}) &= -1,18\mu_N, & \mu(^{17}_8\text{O}) &= -1,89\mu_N \end{aligned}$$

с теоретическим предсказанием одночастичной оболочечной модели.

**Решение:** Ядро  $^3_1\text{H}$  имеет протонную конфигурацию  $1s_{1/2}$  с полным моментом  $j=l+s=0+1/2=1/2$ . Следовательно, расчеты магнитного момента дают значение

$$\mu = (1/2 - 1/2) \cdot 1 + 5,586/2 = 2,79 \mu_N,$$

которое согласуется с экспериментальным значением. Ядро  $^7_4\text{Li}$  имеет протонную конфигурацию  $1p_{3/2}$  с  $j=1+1/2=3/2$ . Модельное значение магнитного момента

$$\mu = (3/2 - 1/2) \cdot 1 + 5,586/2 = 3,79 \mu_N$$

несколько отличается от экспериментального значения. Ядро  $^9_4\text{Be}$  имеет нейтронную конфигурацию  $1p_{3/2}$  и теоретическое значение магнитного момента

$$\mu = (3/2 - 1/2) \cdot 0 - 3,826/2 = -1,91 \mu_N,$$

которое так же несколько отличается от эксперимента. Ядро  $^{17}_8\text{O}$  имеет нейтронную конфигурацию  $1d_{5/2}$  и его магнитный момент имеет значение

$$\mu = (5/2 - 1/2) \cdot 0 - 3,826/2 = -1,91 \mu_N,$$

согласующееся с экспериментом.

**Задача 2.6.** Сравнить экспериментально измеренное значение магнитного момента дейтрона  $\mu = 0,86\mu_N$  с магнитным моментом системы нейтрон-протон в состоянии с  $J=1$  и относительным орби-

тальным моментом  $L = 0$  ( $S_1$ -состояние), оценить вклад компоненты с  $J = 1$  и  $L = 2$  ( $D_1$ -состояние) в волновую функцию дейтрона.

**Решение:** Состояние дейтрона с  $J = 1$  может быть представлено суперпозицией  $S_1$  и  $D_1$  состояний с относительными орбитальными моментами  $L = 0$  и  $L = 2$ . В случае  $L = 0$  спины протона и нейтрона параллельны, а в случае  $L = 2$  их векторы направлены противоположно вектору орбитального момента. В случае  $L = 0$  имеем

$$\vec{\mu} = (g_1\vec{1} + g_p\vec{s} + g_n\vec{s})\mu_N = (1 \cdot 0 + 0 \cdot 0 + 5,586 \cdot 1/2 - 3,826 \cdot 1/2)\mu_N = 0,88\mu_N.$$

В случае  $L = 2$  орбитальный момент каждого нуклона  $l = L/2 = 1$ . Тогда

$$\vec{\mu} = (g_1\vec{1} + g_p\vec{s} + g_n\vec{s})\mu_N = (1 \cdot 1 + 1 \cdot 0 - 5,586 \cdot 1/2 + 3,826 \cdot 1/2)\mu_N = 0,12\mu_N.$$

Обозначим вклад состояния с  $L = 2$  как  $x$ . Тогда

$$x \cdot 0,12\mu_N + (1 - x) \cdot 0,88\mu_N = 0,86\mu_N.$$

Получаем  $x = 0,026$ . То есть вклад состояния с  $L = 2$  в волновую функцию дейтрона составляет 2,6%.

### Задания для самостоятельной работы

**Задача 2.7.** Пионы являются переносчиками ядерных взаимодействий, масса которых  $m \approx 200 m_e$ . На основе соотношений неопределенностей оцените радиус действия ядерных сил и сравните с радиусом действия электромагнитных взаимодействий, которые переносятся фотонами.

**Задача 2.8.** Спектр низших уровней ядра  ${}_{92}^{238}\text{U}$  имеет следующие энергии:

$$\begin{aligned} E_0 = 0 & \quad \text{при } I^\pi = 0^+, & E_2 = 0,047 \text{ МэВ} & \quad \text{при } I^\pi = 2^+, \\ E_4 = 0,148 \text{ МэВ} & \quad \text{при } I^\pi = 4^+, & E_6 = 0,308 \text{ МэВ} & \quad \text{при } I^\pi = 6^+, \\ E_8 = 0,519 \text{ МэВ} & \quad \text{при } I^\pi = 8^+, & E_{10} = 0,777 \text{ МэВ} & \quad \text{при } I^\pi = 10^+. \end{aligned}$$

Определите, как изменяется момент инерции этого ядра с увеличением спина возбужденного состояния  $I$ .

**Задача 2.9.** На основе одночастичной модели оболочек определите спин и четность  $I^\pi$  основного состояния изотопов бериллия -  ${}^7_4\text{Be}$ ,  ${}^8_4\text{Be}$ ,  ${}^9_4\text{Be}$ .

**Задача 2.10.** Сравните экспериментальное значение магнитного момента ядер:

$$\begin{aligned}\mu({}^1_1\text{H}) &= 2,79\mu_N, & \mu({}^3_2\text{He}) &= -2,13\mu_N, \\ \mu({}^{13}_6\text{C}) &= 0,70\mu_N, & \mu({}^{15}_7\text{N}) &= -0,28\mu_N\end{aligned}$$

с теоретическим предсказанием одночастичной оболочечной модели.

**Ответ:**

$$\begin{aligned}\mu({}^1_1\text{H}) &= 2,79\mu_N, & \mu({}^3_2\text{He}) &= -1,91\mu_N, \\ \mu({}^{13}_6\text{C}) &= 0,64\mu_N, & \mu({}^{15}_7\text{N}) &= -0,26\mu_N.\end{aligned}$$



## Глава 3. Радиоактивные превращения ядер

### 3.1. Радиоактивность. Основной закон распада, постоянная распада. Единицы активности источника. Фундаментальные взаимодействия

Под словом **радиоактивность** понимают всякий стабилизированный (устоявшийся) процесс спонтанного (самопроизвольного) распада ядра с превращением в другие ядра и частицы:



где  $X$  - материальное ядро,  $Y$  - дочернее ядро,  $a_n$  - частицы распада. Частицей распада ядра может быть любая частица, например: при испускании  $\gamma$ -частиц, когда  $a_n = \gamma$ , такой процесс называется  **$\gamma$ -излучением**, при  $a_n = \beta$  процесс называют  **$\beta$ -распадом**, при  $a_n = \alpha$  -  **$\alpha$ -распадом**, а при  $a_n = {}^A''_Z'' Y$ , т.е. при испускании осколка ядра распад называют **делением ядра**.

Исторически радиоактивность является первым ядерным процессом, обнаруженным человеком. В 1896 г. французский ученый А.Беккерель, изучая явление фотолюминесценции солей урана, открыл излучение, которое вначале называли лучами Беккереля. В последующем французская ученоя польского происхождения Мария Склодовская вместе с мужем П.Кюри открыли новые элементы: полоний  ${}_{84}\text{Po}$  и радий  ${}_{88}\text{Ra}$ , более активные, чем уран. Они предложили термин **радиоактивность**.

Ядра, подверженные радиоактивному распаду, называются **радиоактивными**. Ядра, не испытывающие распад, называют стабильными. В природе в естественном виде существует  $\sim 260$  стабильных изотопов и  $\sim 60$  радиоактивных ядер. Радиоактивные ядра возникли: одни в процессе первичного синтеза химических элементов, другие возникают за счет распада первичных радиоактивных ядер, или под действием потока космических лучей, падающих на Землю.

Очевидно, что необходимым, но не всегда достаточным условием радиоактивного распада является его энергетическая выгодность – масса радиоактивного ядра должна превышать сумму масс осколка и частиц, вылетающих при распаде:



**Беккерель Антуан Анри** (1852-1908)- французский физик, родился в Париже, окончил Политехническую школу (1874), в которой работал с 1876 профессором, зав. кафедрой. Работы посвящены оптике и радиоактивности. В 1896 г. изучая действие люминесцирующих веществ на фотопленку, открыл самопроизвольной излучение солей урана, названное радиоактивностью (Нобелевская премия, 1903). Впервые установил, что отношение заряда к массе бета-частиц такое же, как у частиц катодных лучей. Изучал физиологическое воздействие радиоактивного излучения.

$$m_x > m_y + \sum_i m_i, \quad (3.1)$$

иначе с выделением энергии

$$Q = (m_x - m_y) - \sum_i m_i > 0. \quad (3.2)$$

Таким образом, всякий радиоактивный распад происходит с выделением энергии  $Q > 0$ . Такой процесс называют экзотермическим.

Как показывают наблюдения, что радиоактивный распад ядра – явление статистическое. Нельзя предсказать, когда именно распадется данное ядро. Даже одинаковые ядра распадаются за разное время. Но среднее время жизни данного сорта ядер, определенное за большой промежуток времени, величина постоянная для этих ядер и не зависит от внешних воздействий - ни от температуры, ни от давления и т.д. Поэтому среднее время жизни является физической характеристикой распада ядер.

Выведем основной закон распада радиоактивных ядер. Если в момент времени  $t$  имеется большое число ядер  $N$ , то за промежуток времени  $dt$  количество распавшихся ядер в среднем пропорционально исходному числу ядер и времени

$$dN = -\lambda N dt, \quad (3.3)$$



**Склодовская-Кюри Мария** (1867-1934) – польский и французский физик и химик. Родилась в Варшаве, окончила Парижский ун-т по физике (1893) и по математике (1894). В 1895 г. вышла замуж за физика П. Кюри и работала в его лаборатории. С 1906 г. профессор и зав. кафедрой Парижского ун-та, с 1914 также директор Института радия. Выделила новые радиоактивные элементы: полоний (1898) и радий (1899) (Нобелевские премии по физике (1903) и по химии (1911)). Разработала методы измерения радиоактивности, изучала наведенную радиоактивность, установила влияние излучения на живую клетку. Умерла от лейкемии.

где коэффициент пропорциональности  $\lambda$  называют **постоянной распада**. Знак минус в (3.3) указывает на уменьшение общего числа ядер со временем. Результатом интегрирования является **основной закон радиоактивного распада**

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (3.4)$$

Здесь  $N$  - количество нераспавшихся ядер,  $N_0$  – количество ядер в начальный момент времени  $t = 0$ . Отметим, что этот закон относится к статистическим средним и справедлив только при большом количестве ядер.

Количество распавшихся  $N_p$  ядер определим прямым вычитанием из начального количества ядер количество нераспавшихся ядер

$$N_p = N_0(1 - e^{-\lambda t}) \quad (3.5)$$

Постоянную распада  $\lambda$  можно связать с другими величинами, характеризующими интенсивность процесса распада ядер: с **периодом полураспада**  $T_{1/2}$  и **средним временем жизни**  $\tau$ . Периодом полураспада называют время, за которое число радиоактивных ядер уменьшается вдвое:

$$N(T_{1/2}) = \frac{1}{2} N_0$$

Подставив это в (3.4)

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}},$$

получим период полураспада

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,69}{\lambda}. \quad (3.6)$$

Среднее время жизни определяется как статистическое усреднение

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t dN(t) = -\frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N(t) dt = -\int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (3.7)$$

Следовательно, между этими величинами существуют соотношения

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} = \frac{T_{1/2}}{0,69}, \quad (3.8)$$

$$T_{1/2} = 0,69 \tau. \quad (3.9)$$

Естественной величиной, описывающей радиоактивный распад, является постоянная распада  $\lambda$ . Физический смысл этой величины выражает вероятность распада ядра за единицу времени. Если взять большое число  $N$  ядер, то за единицу времени в среднем распадается  $\lambda N$  ядер. Эта величина характеризует скорость распада данного количества ядер в целом, т.е. активность источника излучений. Таким образом, устанавливают определение **активности радиоактивного источника излучений**

$$I_0 = -\frac{dN}{dt} = \lambda N. \quad (3.10)$$

В международной системе единиц СИ активность источника измеряется в **беккерели**, равной скорости распада в 1 распад за 1 секунду:

$$1\text{Бк} = \frac{1\text{распад}}{1\text{с}}. \quad (3.11)$$

Старейшей и до сих пор наиболее употребительной является внесистемная единица активности источника - **кюри**:

$$1\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ распад/с}. \quad (3.12)$$

Активность в 1 Ки равна активности 1г радиоактивного препарата  $^{226}\text{Ra}$ . Такое количество радия было впервые добыто Марией Кюри-Склодовской из рудных отвалов в результате титанического труда. Она ввела понятие **активности** элементов и метод измерения ее по

ионизации воздуха, который становится проводником электрического тока.

При бомбардировке ядер ускоренными частицами происходит ядерная реакция с излучением новых частиц, т.е. в ядерных реакциях также наблюдается распад ядер. Никакой физической границы между радиоактивностью и распадом ядер в ядерных реакциях не существует. Тем не менее, радиоактивность выделяют в самостоятельный раздел ядерной физики. Под радиоактивностью понимают установившийся распад ядер, т.е. длительный во времени процесс. Время протекания ядерной реакции определяется временем, характерного для сильного взаимодействия  $\sim 10^{-23}$  с, такое время не возможно измерить обычными методами. На практике к радиоактивным ядрам относят ядра, время жизни которых можно измерить радиотехническими методами. Этими средствами удается измерить времена от  $10^{-12}$  с и до  $10^{22}$  лет.

Самым удивительным в явлении радиоактивности является колоссальное различие времен жизни ядер. Очевидно, что должны существовать какие-то физические причины, которые препятствуют распаду в течение гигантского времени, а потом все-таки происходит распад ядра.

Одной из главных причин является тип взаимодействия, под действием которых происходит распад. Существуют 4 типа **фундаментальных взаимодействий**, которые отличаются интенсивностью взаимодействия  $I$ , радиусом действия  $R$  и характерным временем протекания процессов  $\tau$ .

За единицу интенсивности взаимодействия принята интенсивность сильного взаимодействия. В этих единицах интенсивность гравитационного взаимодействия для микрочастиц столь мала, что в ядерных процессах оно не проявляется. Электромагнитное и слабое взаимодействия отличаются по времени от сильного взаимодействия. Поэтому происходит процесс стабилизации (задержки) распадов ядер, если распад происходит не за счет сильного взаимодействия, а за счет электромагнитного или слабого взаимодействий, время протекания которых на много порядков больше.

Существует множество других причин стабилизирующих распад ядер, увеличивая среднюю жизнь ядер. Например, в случае  $\alpha$ -распада, который происходит за счет туннельного проникновения сквозь кулоновский барьер. Такой туннельный эффект запрещен по

классическим законам, но в микромире частица может просочиться сквозь барьер, и вероятность такого процесса сильно зависит от энергии частицы, поэтому время распада варьирует в больших пределах.

| N | Тип взаимодействия              | I-интенсивность | R-радиус действия    | $\tau$ -характерное время |
|---|---------------------------------|-----------------|----------------------|---------------------------|
| 1 | Сильное взаимодействие          | 1               | $10^{-15} \text{ м}$ | $10^{-23} \text{ с}$      |
| 2 | Электромагнитное взаимодействие | 1/137           | $\infty$             | $10^{-18} \text{ с}$      |
| 3 | Слабое взаимодействие           | $10^{-10}$      | $10^{-10} \text{ м}$ | $10^{-13} \text{ с}$      |
| 4 | Гравитационное взаимодействие   | $10^{-38}$      | $\infty$             | ?                         |

Отметим, что, в принципе, любая частица может участвовать в распаде ядер. Но нейтронной радиоактивности не существует, а протонная радиоактивность обнаружена позже всех других видов распада ядер. Дело в том, что для нейтрона нет кулоновского барьера, который бы задерживал излучение нейтрона. Поэтому время излучения нейтрона очень мало, меньше времени, характерного радиоактивным распадам. Что касается протонной радиоактивности, то она наблюдается в протонно-избыточных ядра, и распад таких ядер сильно конкурирует с  $\beta^+$ -распадом, который чаще наблюдается.

### 3.2. Типы радиоактивных превращений. Правила сдвигов

В природе в естественных условиях встречаются основные виды радиоактивных превращений ядер:  $\alpha$ -распад,  $\beta$ -превращения и  $\gamma$ -излучение. Позже были открыты и другие типы распадов. В следующей таблице представлены известные типы радиоактивных распадов. Здесь использованы обозначения для фундаментальных взаимодействий, через которые происходит распад ядра: S – сильное взаимодействие, E – электромагнитное взаимодействие и W – слабое взаимодействие. В табл.3.1. приведен конкретный вид процессов распада.

Табл. 3.1. Типы радиоактивных превращений

| Тип превращения               | $\Delta Z$ | $\Delta A$ | Процесс   | Взаимодействие |
|-------------------------------|------------|------------|---|----------------|
| $\alpha$ -распад              | -2         | -4         | ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$                  | S+E            |
| $\beta$ -превращения:         | $\pm 1$    | 0          |   | W              |
| $\beta^-$ -распад             | +1         | 0          | ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- + \tilde{\nu}_e$                   | W              |
| $\beta^+$ -распад             | -1         | 0          | ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + e^+ + \nu_e$                           | W              |
| K-захват                      | -1         | 0          | ${}^A_Z X + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + \nu_e$                           | W              |
| $\gamma$ -излучение           | 0          | 0          | ${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z X + \gamma$                                  | E              |
| Спонтанное деление            | $\sim Z/2$ | $\sim A/2$ | ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A'}_{Z'} Y + {}^{A-A'}_{Z-Z'} \tilde{Y}$          | S+E            |
| Протонная радиоактивность     | -1         | -1         | ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-1}_{Z-1} Y + {}^1_1 \text{H}$                   | S+E            |
| Двухпротонная радиоактивность | -2         | -2         | ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-2}_{Z-2} Y + {}^1_1 \text{H} + {}^1_1 \text{H}$ | S+E            |

В случае  $\gamma$ -излучения  ${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z X + \gamma$  звездочкой обозначено возбужденное состояние ядра  ${}^A_Z X^*$ . К  $\beta$ -превращениям относится и K-захват  ${}^A_Z X + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + \nu_e$ , который происходит с участием нейтрино. Этот тип распада происходит путем захвата ядром электрона из ближайшей K-оболочки и излучением нейтрино.

Протонная и двухпротонная радиоактивности открыты сравнительно позже. В настоящее время открыт новый тип радиоактивного распада – так называемый **кластерный распад**, когда ядро испускает ядра, тяжелее  ${}^4_2 \text{He}$ , такие ядра, как  ${}^{12}_6 \text{C}$  и др. Таким образом, этот тип распада является промежуточным между  $\alpha$ -распадом и спонтанным делением ядра, объединяя физическую картину распадов.

В таблице указаны изменения числа протонов  $\Delta Z$  и массового числа  $\Delta A$ , происходящие при каждом распаде. Эти правила, известные как **правила сдвигов**, определяют сдвиг на соответствующее число клеток в периодической таблице Менделеева. Если указано  $\Delta Z = +1$ , то это означает, что в результате распада образуется элемент, который в таблице Менделеева находится на одну клетку пра-

вее исходного, материнского элемента, а в случае  $\Delta Z = -1$ , то левее на одну клетку. А  $\Delta A$  показывает изменение соответствующего массового числа. Эти правила сдвига являются простыми следствиями законов сохранения электрического заряда и барионного заряда (массового числа).

### 3.3. Радиоактивные ряды. Трансурановые элементы

Все тяжелые ядра с массовым числом  $A > 209$  оказываются нестабильными относительно  $\alpha$ -распада из-за возрастания роли кулоновской энергии в этих ядрах. Если массовое число ядра намного превышает граничное значение  $A = 209$ , то такое ядро переходит в стабильное ядро через ряд последовательных  $\alpha$ -превращений. И промежуточные ядра испытывают  $\beta^-$ -распады и  $\gamma$ -излучения.

Дело в том, что в тяжелых ядрах процентное содержание нейтронов больше, чем в легких ядрах. При  $\alpha$ -распаде изменение числа протонов и нейтронов одинаковое  $\Delta Z = 2$  и  $\Delta N = 2$ , и образуется более легкое ядро, в котором нарушено это соотношение нейтронов и протонов. Поэтому при избытке нейтронов более выгодным становится  $\beta^-$ -распад, в котором нейтрон превращается в протон, и восстанавливается нарушенное соотношение нейтронов и протонов в ядре. При этих распадах промежуточное ядро может образоваться в возбужденном состоянии и излишек энергии уносится  $\gamma$ -излучением.

Массовое число  $A$  при  $\beta^-$ -распаде и  $\gamma$ -излучении не меняется, а при  $\alpha$ -распаде уменьшается на  $\Delta A = -4$ . Поэтому остаток от деления массового числа на 4 единицы остается одинаковым для всех ядер одной цепи распада. Таким образом, все естественные радиоактивные элементы можно сгруппировать в 4 семейства (ряда) с таким остатком:  $4n+0$ ,  $4n+1$ ,  $4n+2$ ,  $4n+3$ . В табл. 3.2. приведены наиболее долгоживущие изотопы и их периоды полураспада для каждого из 4 рядов.

Каждый ряд характеризуется изотопом, имеющим наибольший период полураспада, все остальные изотопы этого ряда имеют меньшие периоды полураспада. Поэтому в силу установившегося векового равновесия содержание этого изотопа в ряду больше, и название ряда определяется этим изотопом.

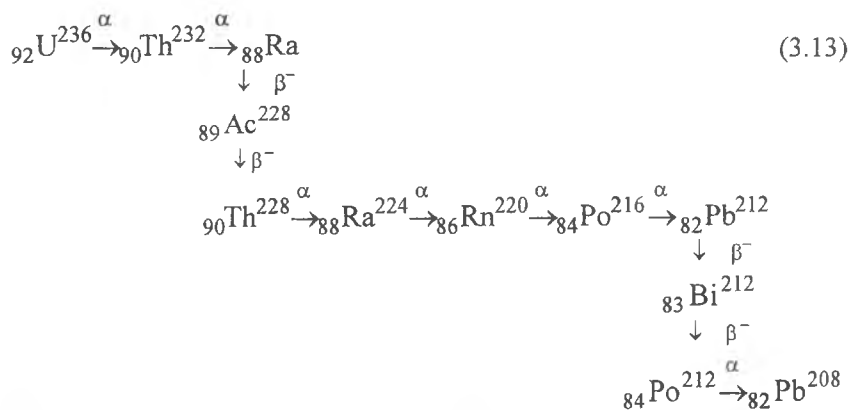


Табл.3.2. Четыре семейства радиоактивных элементов

| Ряд     | $A$    | Долгоживущий изотоп      | $T_{1/2}$ лет       | Число превращений | Конечное ядро            |
|---------|--------|--------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------|
| Торий   | $4n$   | ${}^{232}_{90}\text{Th}$ | $1,4 \cdot 10^{10}$ | 12                | ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ |
| Нептун  | $4n+1$ | ${}^{237}_{93}\text{Np}$ | $2,2 \cdot 10^6$    | 13                | ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ |
| Уран    | $4n+2$ | ${}^{238}_{92}\text{U}$  | $4,5 \cdot 10^9$    | 18                | ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ |
| Актиний | $4n+3$ | ${}^{235}_{92}\text{U}$  | $7 \cdot 10^8$      | 16                | ${}^{207}_{82}\text{Pb}$ |

Но последний ряд в табл.3.2 получил свое название потому, что предшествующие актинию  ${}^{227}_{89}\text{Ac}$  члены с ураном  ${}^{235}_{92}\text{U}$  были открыты позже.

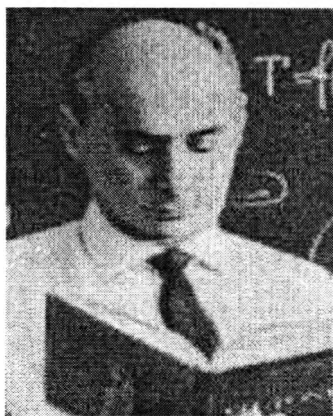
В качестве примера приведем последовательность превращений радиоактивного ряда  $4n$ :



В результате радиоактивного распада этих рядов образуется конечный продукт – стабильный дважды магический изотоп  ${}_{82}\text{Pb}^{206}$  или околomagические изотопы  ${}_{82}\text{Pb}^{207,208}$  и  ${}_{83}\text{Bi}^{209}$ .

Табл.3.3. Синтезированные трансурановые элементы

| Z   | Символ    | Название    | A   | $T_{1/2}$          | Год открытия | Лаборатория, автор                     |
|-----|-----------|-------------|-----|--------------------|--------------|--|
| 93  | <i>Np</i> | Нептуний    | 237 | $2,2 \cdot 10^6$ г | 1939         | Калифорнийский ун-т. Э. Макмиллан      |
| 94  | <i>Pu</i> | Плутоний    | 244 | $8,3 \cdot 10^7$ г | 1940         | Чикаго, Арагоннская лаб-я Г. Сиборг,   |
| 95  | <i>Am</i> | Америций    | 243 | $7,4 \cdot 10^3$ г | 1945         | Г. Сиборг, Чикаго, Аргоннская лаб-я    |
| 96  | <i>Cm</i> | Кюрий       | 247 | $1,6 \cdot 10^7$ г | 1944         | Г. Сиборг, Чикаго, Аргоннская лаб-я    |
| 97  | <i>Bk</i> | Берклий     | 247 | $1,4 \cdot 10^3$ г | 1949         | Г. Сиборг, Беркли, Калифорнийский ун.  |
| 98  | <i>Cf</i> | Калифорний  | 251 | 900 г              | 1950         | Г. Сиборг, Чикаго, Арагоннская лаб-я   |
| 99  | <i>Es</i> | Эйнштейний  | 254 | 250 д              | 1952         | Из почвы после взрыва водородной бомбы |
| 100 | <i>Fm</i> | Фермий      | 257 | 79 д               | 1953         | Из почвы после взрыва водородной бомбы |
| 101 | <i>Md</i> | Менделевий  | 258 | 54 д               | 1955         | Из почвы после взрыва водородной бомбы |
| 102 | <i>No</i> | Нобелий     | 259 | 1,5 ч              | 1957-67      | ОИЯИ (Дубна, СССР), Г.Н.Флеров         |
| 103 | <i>Lr</i> | Лоуренсий   | 260 | 3 м                | 1965         | ОИЯИ (Дубна, СССР), Г.Н.Флеров         |
| 104 | <i>Rf</i> | Резерфордий | 260 | 0,1 с              | 1964         | ОИЯИ (Дубна, СССР), Г.Н.Флеров         |
| 105 | <i>Db</i> | Дубний      | 260 | 40 с               | 1970         | ОИЯИ (Дубна, СССР), Г.Н.Флеров         |
| 106 | <i>Sg</i> | Сиборгий    | 266 | 21 с               |              |  |
| 107 | <i>Bh</i> | Борий       | 264 | 0,44 с             |              |  |
| 108 | <i>Hs</i> | Хассий      | 277 | 16,5 мин           |              |  |
| 109 | <i>Mt</i> | Мейтнерий   | 266 | 0,8 мс             |              |  |



**Флеров Георгий Николаевич**  
(1913-90) – советский физик-экспериментатор, академик, родился в Ростове-на-Дону, окончил Ленинградский политехн. ин-т (1938), работал у И. В. Курчатова в Ленинградском ФТИ, руководитель сектора ИАЭ им. И.В.Курчатова (1943-60), директор Лаборатории ядерных реакций (ОИЯИ, г. Дубна, с 1960). Совместно с К.А.Петржаком открыл но-

В природе существуют элементы до  $Z = 92$  ( ${}_{92}\text{U}$ ), а элементы с  $Z > 92$  называются **трансурановыми элементами**. Они не встречаются в природе, а синтезированы искусственно в научных лабораториях. Последовательное получение их началось в 40-х годах американскими учеными во главе с Г.Сиборгом, у нас с конца 50-х годов в лаборатории ОИЯИ (г. Дубна), возглавляемой Г.Н.Флеровым, а после его смерти Ю.Ц.Оганесяном. В табл.3.3 приведены синтезированные элементы с указанием года и лаборатории получения их. Учитывая заслуги физиков Дубны в открытии большого числа изотопов тяжелых элементов (102-105), в 1997 году решением Генеральной Ассамблеи чистой и прикладной химии элементу с  $Z = 105$  было присвоено имя Dubnium (Db).

В настоящее время исследования сверхтяжелых ядер продолжаются. Уже существенно повышена эффективность регистрации сверхтяжелых ядер и усовершенствована методика их наблюдения. В результате многолетней и интенсивной работы физиками-ядерщиками были синтезированы новые элементы вплоть до 118-го. С увеличением атомного номера элемента его время жизни резко падает. Так, если уран, имеющий атомный номер 92, живет около 1 миллиарда лет, то 110-й элемент - только доли секунды. Поэтому представляют большие трудности идентификация новых элементов, живущих столь короткое время. Но теоретические ис-

следования предсказывают существование повышенной стабильности ядер с магическими числами протонов и нейтронов. Согласно современным представлениям следующее после Pb дважды магическое ядро  ${}_{110}^{294}\text{X}^{184}$  должно иметь большое время жизни, а около него должны группироваться ядра с достаточно большими временами жизни (**остров стабильности**). Пока все попытки выйти на остров стабильности не увенчались успехом. Однако поиск его продолжается.

### 3.4. Альфа-распад. Закон Гейгера-Неттола. Туннельный механизм

Альфа-распад – это радиоактивное превращение ядер с испусканием  $\alpha$ -частиц, т.е. ядер гелия  ${}^4_2\text{He}$ :



Любое ядро заурановой области с  $Z > 83$  обладает  $\alpha$ -активностью. Но известно, что обладают  $\alpha$ -активностью также и некоторые изотопы редкоземельных элементов, у которых число нейтронов  $N > 83$ . Понятно, что  $\alpha$ -распад является экзотермическим процессом с выделением энергии  $Q > 0$  и происходит в тех ядрах, в которых энергия отрыва  $\alpha$ -частицы отрицательна:

$$\varepsilon_A - \varepsilon_{A-4} - \varepsilon_\alpha < 0. \quad (3.14)$$

Учитывая, что удельные энергии связи для ядер с большим массовым числом  $A$  близки  $\varepsilon_A \approx \varepsilon_{A-4}$ , то из (3.14) приходим к следующему необходимому условию  $\alpha$ -распада

$$\varepsilon_A < \varepsilon_\alpha \approx 7 \text{ МэВ}. \quad (3.15)$$

Экспериментально установлено, что энергии  $\alpha$ -частиц заключены в определенных пределах: редкоземельные ядра  $150 < A < 180$  испускают  $\alpha$ -частицы с энергией от 2 до 4,5 МэВ, а ядра с  $A > 180$  испускают с большей энергией от 4 до 9 МэВ.

Но период полураспада  $T_{1/2}$  меняется в широком диапазоне, так например, изотоп свинца  ${}^{204}_{82}\text{Pb}$  распадается с периодом

$T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{17}$  лет, а полоний  ${}^{212}_{84}\text{Po}$  имеет период  $T_{1/2} = 3 \cdot 10^{-7}$  с.

Период полураспада  $\alpha$ -распада резко зависит от энергии вылетающих  $\alpha$ -частиц. Такая зависимость периода полураспада  $T_{1/2}$  от

энергии  $E_\alpha$   $\alpha$ -частиц описывается эмпирически установленным законом Гейгера-Неттола:

$$\log T_{1/2} = C + \frac{D}{\sqrt{E_\alpha}}, \quad (3.16)$$

где  $C$  и  $D$  - постоянные.

Для объяснения зависимости  $T_{1/2}$  от  $E_\alpha$  в 1928 году Г. Гамов, Э. Кондон и Р. Герни разработали теорию  $\alpha$ -распада. В этой теории считается, что  $\alpha$ -частица находится внутри ядра в сформированном виде. Ее потенциальная энергия представлена на рис.3.1.

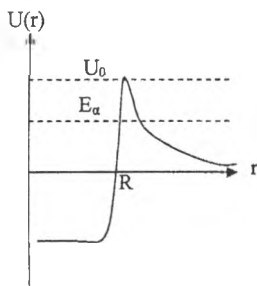


Рис.3.1. Потенциальная энергия  $\alpha$ -частицы внутри ядра

Внутри ядра на  $\alpha$ -частицу действуют ядерные силы притяжения, а вблизи границы ядра эти силы сменяются на кулоновское поле отталкивания, высота барьера которого равна

$$U_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2e(Z-2)e}{R_{\text{ядра}}} \approx 30 \text{ МэВ}. \quad (3.17)$$

Вылетающая из ядра  $\alpha$ -частица имеет энергию  $E_\alpha \sim 9 \text{ МэВ} < U_0$ , меньшую высоты барьера. И по законам классической механики она не может преодолеть барьер, т.е.  $\alpha$ -частица внутри ядра заперта кулоновским барьером. Однако  $\alpha$ -частица является квантовым объектом, и она может просочиться сквозь барьер за счет **туннельного эффекта**. В так называемом квазиклассическом приближении квантовой механики можно вычислить коэффициент прохождения сквозь барьер:

$$D = \exp \left\{ -\frac{2}{\hbar} \int_R^{r_0} \sqrt{2m_\alpha (U(r) - E_\alpha)} dr \right\}, \quad (3.18)$$

где  $R$  и  $r_0$  — точки поворота, определяемые из условия  $E_\alpha = U(r)$ .

Чтобы получить  $\lambda$  постоянную  $\alpha$ -распада, нужно умножить коэффициент прохождения  $D$  на поток  $\alpha$ -частиц, приближающихся к границе ядра. За этот поток можно взять  $f$  частоту соударений  $\alpha$ -частицы со стенками ядра, которая равна

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{v}{2R} = \frac{p}{2Rm_\alpha} \approx \frac{\hbar}{2m_\alpha R^2}, \quad (3.19)$$

Здесь воспользовались соотношением неопределенностей в виде  $pR \approx \hbar$ . Подставляя эти значения, можно вычислить постоянную распада  $\lambda = Df$ , а, следовательно и период полураспада. Полагая  $E_\alpha < U_0$ , после некоторых математических преобразований, можно получить и формулу Гейгера-Неттола.

Таким образом, квантовомеханическая теория  $\alpha$ -распада трактуется как туннельный переход. В настоящее время эта теория значительно совершенствована и ее предсказания хорошо согласуются с экспериментом.

### 3.5. Бета-превращения. Теория Ферми

**Бета-превращения** — это такие радиоактивные превращения атомных ядер, в котором нейтрон переходит в протон (или наоборот) с участием электронов (позитронов) и нейтрино (антинейтрино). Первоначально, когда еще не знали о существовании нейтрино, экспериментаторы столкнулись с рядом трудностей: казалось, что нарушается закон сохранения энергии, вылетающий электрон имеет сплошной спектр, в то время как энергии начального и конечного ядер строго квантованы. Имелись и другие необъяснимые трудности. Некоторые ученые, в том числе и Н. Бор, были готовы отказаться от закона сохранения энергии в бета-превращениях. Чтобы оставить в силе закон сохранения энергии В. Паули высказал гипотезу о ненаблюдаемой в эксперименте частицы, которая уносит часть энергии вылета. Эта гипотеза стала общепризнанной, частицу назвали **нейтрино**  $\nu$ . Она не наблюдаема в эксперименте, так как не обладает

электрическим зарядом и имеет ничтожно малую (почти нулевую) массу, а спин ее равен  $1/2$ , т.е. относится к фермионам.

В настоящее время известны следующие 3 типа  $\beta$ -превращения.

а) Электронный  $\beta$ -распад с участием электрона и антинейтрино



б) Позитронный  $\beta$ -распад с участием позитрона и нейтрино



в) К-захват, при котором электрон из электронной К-оболочки атома захватывается ядром и испускается нейтрино



г) Наконец, к  $\beta$ -превращениям относят и процессы захвата нейтрино или антинейтрино ядром:

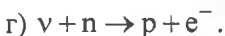
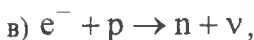
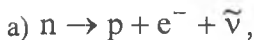


Примером нейтринного захвата является реакция



предложенная Б.М. Понтеркорво для регистрации солнечных нейтрино.

Как известно,  $\alpha$ -распад является процессом, происходящим внутри ядра, но  $\beta$ -распад является процессом, происходящим внутри нуклона. Находящиеся внутри ядра нуклоны распадаются по схеме:



Все эти процессы относятся к слабым взаимодействиям, а потому протекают сравнительно медленно. Экспериментально наблюдался бета-распад свободного нейтрона и измерен его период полураспада  $\tau_n \approx 15$  мин. Но распад свободного протона запрещен, так как масса протона меньше массы нейтрона:  $m_p < m_n$ , т.е. энергетически не воз-

можен. Поэтому для процессов  $\beta^-$ -распада должен выполняться энергетический баланс

$${}^A_Z M > {}^A_{Z+1} M + m, \quad (3.27)$$

где  $m$  – масса электрона. В таблицах приводятся не массы ядер  $m_X$  и  $m_Y$ , а массы нейтральных атомов. Массы начального и конечного атомов при  $\beta^-$ -распаде равны:

$$M_i = m_X + Zm, \quad (3.28)$$

$$M_f = m_Y + (Z+1)m. \quad (3.29)$$

Подставляя (3.28) и (3.29) в (3.27), получим необходимое условие  $\beta^-$ -нестабильности

$$M_i > M_f. \quad (3.30)$$

Для процесса  $\beta^+$ -распада должен выполняться энергетический баланс

$${}^A_Z M > {}^A_{Z-1} M + m \quad (3.31)$$

и необходимое условие  $\beta^+$ -нестабильности

$$M_i > M_f + 2m. \quad (3.32)$$

Для  $K$ -захвата имеем энергетический баланс

$${}^A_Z M + m > {}^A_{Z-1} M \quad (3.33)$$

и условие нестабильности

$$M_i > M_f. \quad (3.34)$$

Теперь рассмотрим теорию  $\beta^-$ -распада, задачей которой является объяснение экспериментальных сведений и предсказание значений еще не измеренных величин. В первую очередь это относится к объяснению сплошного спектра  $\beta$ -частиц и вычисление среднего времени жизни нейтрона. Такую теорию развил в 1934 году Э. Ферми. Он отправлялся от аналогии с квантовой электродинамикой. Фотон не находится внутри электрона (атома), а испускается при переходе электрона из одного энергетического состояния в другое. Точно также  $\beta^-$ -распад есть переход нуклона из одного состояния (нейтронного) в другое (протонное) с рождением электрона и антинейтрино:

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}. \quad (3.35)$$



Но рождение античастицы можно представить как уничтожение частицы

$$n + \nu \rightarrow p + e^- . \quad (3.36)$$

В рамках квантовой теории поля строится гамильтониан слабого взаимодействия в следующем виде

$$H_{\text{сл.вз}} = G_F (\hat{\Psi}_p^+ \Gamma_a \hat{\Psi}_n) (\hat{\Psi}_e^+ \Gamma^a \hat{\Psi}_\nu) . \quad (3.37)$$

Здесь оператор  $\hat{\Psi}_p^+$  описывает рождение протона,  $\hat{\Psi}_n$  - уничтожение нейтрона,  $\hat{\Psi}_e^+$  - рождение электрона,  $\hat{\Psi}_\nu$  - уничтожение нейтрино (рождение антинейтрино),  $\Gamma_a$  - 4-рядные матрицы, действующие на спинорные переменные, а  $G_F$  - константа Ферми, описывающая интенсивность слабого взаимодействия. Если гамильтониан задан, то с помощью существующих правил можно вычислить все интересующие нас величины. Вероятность рассматриваемого процесса определяется квадратом матричного элемента  $M_{if} = \langle f | H_{\text{сл.вз.}} | i \rangle$  и после соответствующих суммирования по дискретным переменным и интегрирования по непрерывным переменным можно получить

$$dw = \sum_s \int | \langle f | H | i \rangle |^2 d\Omega = BF(Z, E) E (E_m - E)^2 \sqrt{E^2 - m^2} dE, \quad (3.38)$$

где  $E_m = m_X - m_Y$  - максимальное выделение энергии, а  $F(Z, E)$ - функция дается в виде таблицы, она протабулирована. Формула (3.38) задает распределение энергии  $E$  вылетающей  $\beta$ -частицы, которое схематично представлено на рис.3.2. Спектр энергии  $\beta$ -частиц сплошной, так как максимальная энергия выделения  $E_m$  статически распределяется между  $\beta$ -частицей и нейтрино.

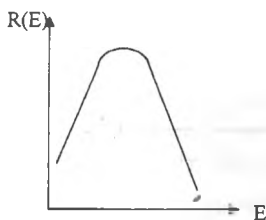


Рис. 3.2. Сплошной спектр  $\beta$ -частиц

Энергия  $\beta$ -частиц меняется от минимального значения  $E = mc^2 = 0,51 \text{ МэВ}$  до  $E_m$ . Чтобы получить постоянную распада нейтрона  $\lambda$ , следует проинтегрировать вероятность (3.38) по энергиям

$$\int_0^{E_m} dw(E) \approx \lambda. \quad (3.39)$$

А среднее время жизни определяется просто  $\tau = \frac{1}{\lambda}$ . Обычно на основе экспериментальных данных строится так называемый график Ферми

$$f(E) = \left[ \frac{dw/dE}{F(Z, E)E\sqrt{E^2 - m^2}} \right]^{1/2} \approx E_m - E. \quad (3.40)$$

Разрешенные по правилам отбора  $\beta$ -переходы из одного состояния ядра в другое имеют график Ферми в виде прямой (см. рис.3.3). Но при наличии конкурирующих процессов с разным энерговыделением  $E_m$  и при нарушении правил отбора график Ферми отличается от прямой линии. Предельная энергия  $\beta$ -частиц находят по пересечению прямой с осью  $E$  графика Ферми. На основе этих данных можно вывести определенные сведения о массе нейтрино.

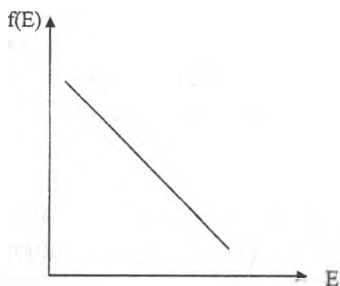


Рис.3.3. График Ферми для ускоренного  $\beta$ -процесса

Так как скорость распада изменяется в широком интервале времени, то для ее характеристики пользуются величиной  $\log ft$ , которая для ускоренных переходов, т.е. незапрещенных по правилам отбора, имеет порядок  $\approx 6 \div 7$ , а для запрещенных переходов имеет  $\approx 2 \div 3$ .

В настоящее время теория  $\beta$ -распада Ферми значительно усовершенствована. В первую очередь она модифицировалась учетом несохранения четности в слабых взаимодействиях, и с развитием ядерных моделей стало возможным использования более реалистических волновых функций состояния ядра.

### 3.6. Нейтрино и его свойства. Несохранение четности

Паули, основываясь на том, что при  $\beta^-$ -распаде не сохраняется момент импульса и энергия, выдвинул идею о существовании нейтральной частицы, которая не фиксируется в эксперименте из-за ничтожного слабого взаимодействия. Э.Ферми принял эту гипотезу и назвал эту частицу – **нейтрино** и включил ее в свою теорию  $\beta^-$  распада. Естественно, уловить эту частицу непосредственно в экспериментах не возможно, поэтому было предложено для экспериментального подтверждения гипотезы нейтрино по измерению энергии отдачи ядер при излучении нейтрино. Только в 1941 году Дж. Аллен сумел зарегистрировать энергию отдачи ядер лития при  $K$ -захвате



Но точно измерить эту энергию и оценить массу нейтрино не удалось.

Только в 50 гг. окончательно было установлен факт существования нейтрино и определен ряд важных его характеристик. Электрический заряд нейтрино равен нулю  $q = 0$ , а спин равен  $s_z = 1/2 \hbar$ , таким образом, нейтрино относится к ферми-частицам. Масса нейтрино полагают равным нулю  $m_0 = 0$ , но некоторые в это сомневаются и продолжают эксперименты по измерению массы нейтрино. Профессор В.А.Любимов из Москвы, занимающийся этой проблемой в течение многих лет, дает оценку массы нейтрино очень малую, но отличную от нуля  $14 \text{ эВ} < m_\nu < 46 \text{ эВ}$ . Наличие даже столь малой массы нейтрино приводит к существенному решению проблемы скрытой массы во Вселенной.

Нейтрино преподносило не мало сюрпризов экспериментаторам. В результате длительных исследований было установлено, что лептонов, которые не участвуют в сильных взаимодействиях, существует 3 дублета:  $e^-$  и  $\nu_e$ ,  $\mu^-$  и  $\nu_\mu$ ,  $\tau^-$  и  $\nu_\tau$ . Оказалось, что нейтрино, участвующие в реакциях с электроном  $e^-$ , мюоном  $\mu^-$  или таоном  $\tau^-$ , различаются. Чтобы их различать, стали приписывать им разные лептонные заряды: лептонам  $e^-$  и  $\nu_e$  приписывают электронный лептонный заряд  $L_e = +1$ , лептонам  $\mu^-$  и  $\nu_\mu$  - мюонный лептонный заряд  $L_\mu = +1$ , а лептонам  $\tau^-$  и  $\nu_\tau$  - таонный лептонный заряд  $L_\tau = +1$ . Лептоны имеют соответствующие им античастицы:  $e^+$  и  $\bar{\nu}_e$ ,  $\mu^+$  и  $\bar{\nu}_\mu$ ,  $\tau^+$  и  $\bar{\nu}_\tau$ . Им приписывают лептонные заряды противоположного знака:  $L_e = -1$ ,  $L_\mu = -1$  и  $L_\tau = -1$ . А другие частицы не имеют лептонный заряд, им приписывают  $L = 0$ .

В 1956—57 гг. экспериментаторы столкнулись еще с одной проблемой с участием нейтрино — оказалось, что закон сохранения четности в реакциях с нейтрино может нарушаться. Американские ученые китайского происхождения Ц. Ли и Ч. Янг выдвинули гипотезу о несохранении четности в слабых взаимодействиях. Ц. Ву экспериментально доказала справедливость этой гипотезы.

### 3.7. Гамма-излучение ядер. Мультипольность излучения. Правила отбора. Изомерия. Внутренняя конверсия.

В результате радиоактивных превращений ядра оказываются в возбужденном состоянии. Эти ядра, находящиеся в возбужденном состоянии, могут переходить в более низкие энергетические состояния без измерения  $Z$  и  $A$ , но с испусканием  $\gamma$ -кванта. Такое явление называют **гамма-излучением ядра**. Так как энергии состояний ядра дискретны, то и спектр  $\gamma$ -излучения дискретен. Энергии  $\gamma$ -излучения простирается от 10 кэВ и до 3 МэВ.

Гамма-излучение обусловлено электромагнитным взаимодействием, ему не мешает кулоновский барьер, поэтому время жизни  $\gamma$ -

активных ядер существенно меньше времен жизни ядер по отношению к  $\beta$ - и  $\alpha$ -распадам, обычно они лежат в интервале  $10^{-7}$  -  $10^{-13}$  с, но существуют  $\gamma$ -активные ядра, у которых времена жизни достигают нескольких часов и больше, это явление связанное с изомерией, которое рассмотрим позже.

Гамма-переходы подчиняются определенным **правилам отбора**, вытекающие из законов сохранения момента импульса и четности. Закон сохранения момента импульса требует, чтобы момент импульса  $L$ , уносимый  $\gamma$ -квантом, равнялся векторной разности спинов уровней, между которыми происходит  $\gamma$ -переход, т.е. чтобы выполнялись неравенства треугольника

$$|I_i - I_f| \leq L \leq I_i + I_f. \quad (3.42)$$

Закон сохранения четности требует выполнения правил отбора по четности:

$$\pi_i = \pi_f \cdot \pi_\gamma. \quad (3.43)$$

Состояния свободного  $\gamma$ -кванта с определенными моментами импульса  $L$  называют **мультиполями** излучения. Различают электрическое излучение с мультиполями  $EL$  и магнитное излучение с мультиполями  $ML$ . Им соответствуют четности  $\pi = (-1)^L$  - для электрического излучения  $EL$  и  $\pi = (-1)^{L+1}$  - для магнитного излучения  $ML$ . Так как  $\gamma$ -квант является векторной частицей, то уносимый излучением минимальный момент импульса равен  $L = 1$ , Таким образом, существуют следующие мультиполные излучения:  $L = 1$  - дипольное излучение,  $L = 2$  - квадрупольное,  $L = 3$  - октупольное излучение и т.д.

При обычных энергиях излучении отношение радиуса ядра  $R$  к длине волны излучения  $\lambda$  дает величину порядка

$$\frac{R}{\lambda} \approx 10^{-2} + 10^{-3}, \quad (3.44)$$

т.е.  $\lambda > R$  и излучение происходит не из ядра, а из электромагнитного поля, окружающего ядро. Поэтому при расчете вероятности  $\gamma$ -излучения пользуются так называемым длинноволновым приближением. Можно показать, что период полураспада сильно зависит от этого отношения

$$\frac{1}{T_{1/2}} \approx \left( \frac{R}{\lambda} \right)^{2L}, \quad (3.45)$$

Откуда следует, что с увеличением мультиполности  $L$  вероятность излучения сильно падает. Если правилами отбора по спину и четности нет запрета, то наблюдается излучение низшего мультиполя.

Силы магнитного взаимодействия слабы по сравнению с электрическими силами, и магнитное излучение  $M_L$  ослаблено по сравнению с электрическим излучением  $E_L$  в отношении как магнитный момент к электрическому дипольному моменту:

$$\left( \frac{\mu}{d} \right)^2 \approx 10^{-2} \div 10^{-3}. \quad (3.46)$$

Вероятности  $\gamma$ -переходов  $M1$  и  $E2$  оказываются сравнимы по величине. Поэтому наблюдаются смешанные  $\gamma$ -излучения:  $M1$  и  $E2$ ,  $M2$  и  $E3$ , т.д.

Экспериментально установлено, что ядра определенной области массового числа  $A$  имеют возбужденные состояния, которые характеризуются сравнительно большим временем жизни. Например, ядро  ${}_{49}^{115}\text{In}$  имеет в основном состоянии спин и четность  $I^\pi = 9/2^+$ , а первое возбужденное состояние с энергией  $E = 0,335$  МэВ спин  $I^\pi = 1/2^-$ . По правилам отбора высвечивания из этого возбужденного состояния в основное состояние ядра возможно  $M4$  излучением. А этот  $\gamma$ -переход сильно заторможен и время жизни ядра в этом состоянии сравнительно большое -  $T_{1/2} = 14,4$  час.

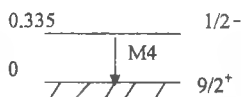


Рис.3.4. Изомерное состояние  $I^\pi = 1/2^-$  ядра  ${}_{49}^{115}\text{In}$

Долгоживущие возбужденные состояния ядер называются **изомерами**. Это явление получило простое объяснение в рамках оболочечной модели. В одночастичной схеме уровней встречаются близко

расположенные уровни с сильно отличающимися моментами и противоположной четности. Как в случае  $^{115}_{49}\text{In}$ , последний 49 протон заселяет одночастичный уровень  $1g_{9/2}$ , а первое возбуждение ядра происходит при переходе этого протона в соседний уровень  $2p_{1/2}$ . Из-за сильного различия моментов импульса состояний  $\gamma$ -излучение имеет мультипольность  $L=4$ , которое сильно заторможено. Явление изомерии встречаются у ядер с числом нуклонов  $N, Z < 50, 82, 126$  - так называемые **острова изомерии**.

До сих пор рассматривался  $\gamma$ -излучение, с помощью которого высвечивается энергия возбуждения ядра. Имеется и конкурирующий процесс, роль которого возрастает с увеличением мультипольности перехода и с уменьшением его энергии. Это **внутренняя конверсия**, при которой энергия возбуждения ядра передается одному из электронов атомной оболочки. Внутренняя конверсия происходит за счет обмена ядра и электрона виртуальными фотонами. Это явление можно сравнить с фотоэффектом в атоме, когда фотон вырывает электрон из атома. Первоначально это явление и назывался ядерным фотоэффектом. Но оказалось, что в случае ядра явление в корне отличается, мы здесь имеем дело с виртуальным фотоном и поэтому возможен переход  $0^+ \rightarrow 0^+$  для внутренней конверсии, что абсолютно запрещено для  $\gamma$ -излучения. Характерным отличием электронов внутренней конверсии является то, что спектр конверсионных электронов дискретен, а спектр электронов  $\beta$ -распада сплошной.

## Вопросы для закрепления знаний

- 3.1. Что понимают под радиоактивностью, и какие единицы ее измерения?
- 3.2. Чем отличается естественная радиоактивность от искусственной радиоактивности?
- 3.3. Выпишите основной закон радиоактивного распада для количества нераспавшихся ядер и для распавшихся ядер.
- 3.4. Какая связь между постоянной распада, периодом распада и средним временем жизни изотопа?
- 3.5. Перечислите типы радиоактивных превращений и правила смещения для них.

- 3.6. Перечислите четыре семейства (ряда)  $\alpha$ -превращений естественных радиоактивных ядер.
- 3.7. В чем заключается туннельный механизм  $\alpha$ -распада?
- 3.8. Поясните закон Гейгера-Неттола для  $\alpha$ -распада?
- 3.9. Выпишите типы  $\beta$ -распада и представьте их через внутринуклонный процесс.
- 3.10. Каков энергетический спектр  $\beta$ -распада и какова роль нейтрино в энергетическом балансе  $\beta$ -процесса?
- 3.11. Условие нестабильности ядра относительно  $\beta$ -распада имеет вид  $M_x > M_y + m_e$ , где  $M_x$ ,  $M_y$  - массы исходного и конечного ядер,  $m_e$  - масса электрона (позитрона). А условие нестабильности, выраженное через дефекты массы нейтральных атомов, представляется в виде:  $\Delta_x > \Delta_y$  для  $\beta^-$ -распада и К-захвата,  $\Delta_x > \Delta_y + 2m_e$  для  $\beta^+$ -распада. Получите последнее условие нестабильности.
- 3.12. Какие типы нейтрино существуют и каков их лептонный заряд?
- 3.13. Опишите эксперимент, подтвердивший несохранение четности в слабых взаимодействиях.
- 3.14. Выпишите правила отбора в  $\gamma$ -распаде ядер.
- 3.15. Что называют изомерией, и в какой области массовых чисел изомерия изотопов встречается?
- 3.16. Что называют внутренней конверсией электронов и чем отличается от фотоэффекта?

### Примеры решения задач

**Задача 3.1.** Определить количество свинца  $^{208}\text{Pb}$ , возникающего из 1 кг чистого изотопа  $^{238}\text{U}$  за период, равный возрасту Земли  $2,2 \cdot 10^9$  лет. Период полураспада изотопа  $^{238}\text{U}$  равен  $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$  лет.

**Решение:** Число накопившихся стабильных ядер  $^{208}\text{Pb}$  в результате радиоактивного распада равно

$$N = N_0(1 - e^{-0,69t/T_{1/2}}).$$



Выразим число частиц через массу вещества  $N = mN_A / \mu$ , где  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  - число Авогадро,  $\mu$  - молярная масса вещества. Следовательно,

$$m_{\text{Pb}} N_A / \mu(\text{Pb}) = m_{\text{U}} N_A / \mu(\text{U})(1 - e^{-0,69t/T_{1/2}}).$$

Откуда имеем

$$m_{\text{Pb}} = 1\text{кг} \cdot \frac{208}{238} (1 - e^{-0,69 \cdot 2,2 \cdot 10^9 / 4,5 \cdot 10^9}) = 0,25\text{кг}.$$

**Задача 3.2.** Найти активность  $I_0$  массы 1г радия  $^{226}\text{Ra}$ , период полураспада которого равен  $T_{1/2} = 1560$  лет.

**Решение:** Активность радиоактивного вещества определяется числом распадов за единицу времени 1с:

$$I_0 = -dN / dt = \lambda N.$$

Выразим постоянную распада через период полураспада  $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ . А число частиц связано с массой вещества

$$N = N_A m / \mu,$$

где  $N_A$  - число Авогадро, а  $\mu = 226\text{г} / \text{моль}$  - молярная масса радия. Подставляя эти выражения, получим

$$I_0 = \frac{m N_A \ln 2}{\mu T_{1/2}} = \frac{1 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 0,6}{226 \cdot 1560 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк} = 1\text{Ки}.$$

**Задача 3.3.** Активность препарата  $^{32}\text{P}$  равна  $I_0 = 2$  мкКи. Какая масса такого препарата, если период полураспада этого изотопа  $T_{1/2} = 14,5$  суток?

**Решение:** Активность радиоактивного вещества в количестве  $N$  ядер с постоянной распада  $\lambda$  равна  $I_0 = \lambda N$ . Активность измеряется в Ки ( $1 \text{ Ки} = 3,710^{10}$  распадов/с). Постоянная распада связана с периодом полураспада  $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$ . Количество ядер в образце массой  $m$  грамм равно

$$N = m N_A / \mu,$$

где  $N_A$  - число Авогадро,  $\mu = 32 \text{ г/моль}$  - молярная масса фосфора. Тогда активность препарата

$$I_0 = \lambda N = \frac{\ln 2 m N_A}{\mu T_{1/2}}$$

Масса препарата равна

$$m = \frac{\mu I_0 T_{1/2}}{N_A \ln 2} = 32 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \cdot 14,5 \cdot 24 \cdot 3600 / (6,02 \cdot 10^{23} \cdot 0,69) = 7,1 \cdot 10^{-12} \text{ г.}$$

**Задача 3.4.** В кровь человека ввели  $1 \text{ см}^3$  раствора, содержащего искусственный радиоизотоп натрия  $^{24}\text{Na}$  активностью  $I_0 = 2 \cdot 10^3$  частиц/с. Активность  $1 \text{ см}^3$  крови, взятой через время  $t = 5$  ч, оказалась равной  $I_0 = 16$  частиц/мин. Зная период полураспада  $T_{1/2}(^{24}\text{Na}) = 15$  ч, определить объем крови человека.

**Решение:** Активность введенного в кровь  $1 \text{ см}^3$  препарата равна

$$I_{01} = \lambda N_1 = 0,69 N_1 / T_{1/2}.$$

Активность растворенного в объеме  $V$  крови препарата через время  $t$  равна

$$I_{02} = \lambda N_2 / V = 0,69 / (V T_{1/2}) \cdot N_1 e^{-0,69 \cdot t / T_{1/2}}.$$

Откуда объем крови равен

$$V = (I_{01} / I_{02}) e^{-0,69 t / T_{1/2}} = \frac{2 \cdot 10^3}{16/60} e^{-0,695/15} = 5,9 \cdot 10^3 \text{ см}^3 \approx 6 \text{ л}$$

**Задача 3.5.** В результате  $\alpha$ -распада радий  $^{226}\text{Ra}$  превращается в радон  $^{222}\text{Rn}$ . Какой объем радона при нормальных условиях будет находиться в равновесии с  $1 \text{ г}$  радия? Период полураспада  $^{226}\text{Ra}$  равен  $T_{1/2}(^{226}\text{Ra}) = 1600$  лет, а для  $^{222}\text{Rn}$  имеем период полураспада  $T_{1/2}(^{222}\text{Rn}) = 3,82$  дня.

**Решение:** После установления векового равновесия число радиоактивных ядер обоих изотопов и их постоянные распада будут связаны уравнением:

$$\lambda_{Ra} N_{Ra} = \lambda_{Rn} N_{Rn}.$$

Откуда имеем число ядер радона

$$N_{Rn} = N_{Ra} \lambda_{Ra} / \lambda_{Rn} = N_{Ra} T_{1/2}(Rn) / T_{1/2}(Ra).$$

Искомый объем

$$V = V_M N_{Rn} / N_A,$$

где  $V_M = 22,4$  л/моль - молярный объем газа, а  $N_{Rn} / N_A$  - число молей. Выразим количество ядер  $^{226}\text{Ra}$  через массу  $m$

$$N_{Ra} = m N_A / \mu.$$

Тогда получим

$$V = \frac{V_M m T_{1/2}(Rn)}{\mu T_{1/2}(Ra)} = \frac{22,4 \text{ л/моль} \cdot 1\text{г} \cdot 3,82 \text{ дня}}{226 \text{ г/моль} \cdot 1600 \text{ лет} \cdot 365 \text{ дней/год}} = 6,5 \cdot 10^{-7} \text{ л}$$

**Задача 3.6.** Определить возраст деревянного предмета, если активность на единицу массы  $^{14}\text{C}$  составляет 0,7 активности свежесрубленного дерева.

**Решение:** В археологии применяется радиоуглеродный метод определения возраста. Растения поглощают углекислый газ из воздуха, и поэтому относительное количество радиоактивного углерода  $^{14}\text{C}$  (период полураспада  $T_{1/2} = 5730$  лет) и стабильного углерода  $^{12}\text{C}$  в живых растениях такое, как в воздухе. После гибели растения, прекращается поглощение углерода растением из воздуха, а радиоактивный изотоп углерода в растении распадается. По убыли активности можно определить возраст дерева. Убыль активности

$$N/N_0 = e^{-\lambda t} = e^{-0,69 t / T_{1/2}}.$$

Откуда возраст дерева

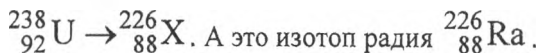
$$t = T_{1/2} \ln(N/N_0) / 0,69 = 2962 \text{ года.}$$

**Задача 3.7.** Какой изотоп образуется из  ${}_{92}^{238}\text{U}$  после трех  $\alpha$ -распадов и двух  $\beta$ -распадов?

**Решение:** Согласно правилам смещения после трех  $\alpha$ -распадов имеем

$$\Delta Z = 3 \cdot (-2) = -6 \quad \text{и} \quad \Delta A = 3 \cdot (-4) = -12.$$

А после двух  $\beta$ -распадов  $\Delta Z_2 = +2$  и  $\Delta A = 0$ . Следовательно,



**Задача 3.8.** Определить верхнюю границу спектра позитронов, испускаемых при  $\beta^+$ -распаде ядра  ${}_{14}^{27}\text{Si} \rightarrow {}_{13}^{27}\text{Al} + \beta^+ + \nu_e$ , используя значения дефект масс атомов  $\delta(27,14) = -12,385 \text{ МэВ}$  и  $\delta(27,13) = -17,197 \text{ МэВ}$ .

**Решение:** Энергия  $\beta^+$ -распада

$$Q = M(A, Z) - M(A, Z-1) - m_e = \delta(27,14) - \delta(27,13) - 2m_e,$$

где  $M(A, Z)$  и  $M(A, Z-1)$  - массы ядер.

Верхняя граница спектра позитронов равна энергии распада

$$T_{\max} = Q = -12,385 + 17,197 - 2 \cdot 0,511 = 3,592 \text{ МэВ}.$$

**Задача 3.9.** Какие мультипольные моменты  $\gamma$ -переходов возможны между состояниями ядер, указанных на рис. 3.1 и рис.3.2?

**Решение:** Мультипольность  $\gamma$ -переходов определяется правилами отбора по спинам  $|I_i - I_f| \leq L \leq I_i + I_f$  и по четности  $\pi_\gamma = \pi_i \pi_f$ .



Рис.3.1.



Рис.3.2.

В случае перехода  $a$  имеем  $1 \leq L \leq 2$  и  $\pi_\gamma = +$ . Следовательно, это смешанный переход  $E2 + M1$ . Для перехода  $b$  имеем  $1 \leq L \leq 2$  и  $\pi_\gamma = -$ . Значит -  $E1$ , а примесь  $M2$  пренебрежимо мала.

**Решение:** Мультипольность  $\gamma$ -переходов определяется правилами отбора по спинам  $|I_i - I_f| \leq L \leq I_i + I_f$  и по четности  $\pi_\gamma = \pi_i \pi_f$ . В случае перехода  $a$  имеем  $1 \leq L \leq 2$  и  $\pi_\gamma = +$ . Следовательно, это смешанный переход  $E2 + M1$ . Для перехода  $b$  имеем  $1 \leq L \leq 2$  и  $\pi_\gamma = -$ . Значит -  $E1$ , а примесь  $M2$  мала.

### Задание для самостоятельной работы

**Задача 3.10.** При ядерных испытаниях некоторое количество изотопа  $^{90}\text{Sr}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 29,1$  лет попало в окружающую среду. Через какое время активность рассеянных радионуклидов снизится в 10 раз?

**Ответ:** 97,1 лет.

**Задача 3.11.** В природной урановой среде радий содержится в отношении 1 атом на  $2,78 \cdot 10^6$  атомов урана. Определить период полураспада урана, если известно, что период полураспада радия равен 1620 лет.

**Ответ:**  $T_{1/2}(^{238}\text{U}) = 4,5 \cdot 10^9$  лет.

**Задача 3.12.** Период полураспада изотопа  $^{210}\text{Bi}$  равен 4,97 дня. Какой активностью обладает 1 мг этого препарата, выдержанного 10 дней?

**Ответ:** 31 Ки.

**Задача 3.13.** Покажите, что по законам классической физики  $\alpha$ -частица с энергией  $E_\alpha = 5\text{МэВ}$  не может вырваться из ядра  $^{238}_{92}\text{U}$  из-за существования кулоновского барьера. Указание: вычислите энергию кулоновского отталкивания  $\alpha$ -частицы и ядра при непосредственном соприкосновении.

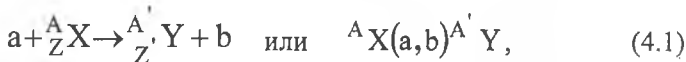
**Задача 3.14.** Какой изотоп образуется из  $^8_3\text{Li}$  после одного  $\beta$ -распада и одного  $\alpha$ -распада?

**Ответ:**  $^4_2\text{He}$ .

## Глава 4. Ядерные реакции

### 4.1. Законы сохранения ядерных реакций

Ядерными реакциями называются процессы рассеяния вида



где  $X, Y$  – атомные ядра,  $a, b$  – разные частицы. Бомбардирующей частицей  $a$  может быть нейтрон ( $a = n$ ), протон ( $a = p$ ), электрон ( $a = e$ ), тяжелый ион ( $a = I$ ), наконец, если ( $a = \gamma$ ), то реакцию называют фотоядерной реакцией. Под действием налетающей частицы различается характер ядерных превращений: кулоновское возбуждение ядра, вызванное заряженной частицей, деление ядра, ядерный синтез, процессы множественного рождения частиц.

В зависимости от энергии налетающей частицы  $a$  ядерные реакции протекают существенно по-разному. Поэтому ядерные реакции классифицируют по энергиям бомбардирующей частицы, выделяя область малых энергий ( $E_a \leq 1$  кэВ), низких энергий ( $1$  кэВ  $\leq E_a \leq 1$  МэВ), средних энергий ( $1$  МэВ  $\leq E_a \leq 100$  МэВ), больших энергий ( $100$  МэВ  $\leq E_a \leq 1$  ГэВ), высоких энергий ( $1$  ГэВ  $\leq E_a \leq 500$  ГэВ) и сверхвысоких энергий ( $E_a > 500$  ГэВ). Сверхвысокие энергии достижимы в настоящее время лишь в космических лучах, так как максимальная достигнутая пока энергия равна 500 ГэВ.

Ядерные реакции сильно различаются от того, бомбардируется ли легкое ядро или тяжелое ядро. Поэтому ядерные реакции классифицируют по массовому числу ядра-мишени: если  $A < 50$ , то называют ядерные реакции на легких ядрах, при  $50 < A < 100$  – реакции на средних ядрах,  $A > 100$  – на тяжелых ядрах.

Бомбардируя ядро-мишень потоком частиц с одинаковой энергией, исход реакции может быть разным. В этом случае говорят, при одном и том же входном канале получается разные выходные

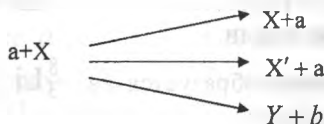


Рис. 4.1. Выходные каналы реакции

каналы реакции. Вероятность этих выходных каналов разная. Но упругое рассеяние всегда является одним из выходных каналов, т.е. любая реакция сопровождается упругим рассеянием.

Следовательно, ядерная реакция является процессом рассеяния, и они происходят при соблюдении всех необходимых законов сохранения: закона сохранения полной энергии  $E_{in} = E_{out}$ , закона сохранения импульса  $\vec{P}_{in} = \vec{P}_{out}$ , момента и четности  $I_{in} = I_{out}$ ;  $\Pi_i = \Pi_o$ , электрического заряда  $Q: Z_{in} = Z_{out}$ , барионного заряда  $B: A_{in} = A_{out}$ , лептонного заряда  $L$ .

Из закона сохранения полной энергии имеем для ядерной реакции

$$mc^2 + Mc^2 \rightarrow m'c^2 + M'c^2 + Q. \quad (4.2)$$

Откуда следует энергия реакции:

$$Q = [(m + M) - (m' + M')]c^2. \quad (4.3)$$

Если  $Q > 0$ , то реакция - экзотермическая с выделением энергии, если  $Q < 0$ , то реакция - эндотермическая с поглощением энергии, при  $Q = 0$  имеем упругое рассеяние.

Эндотермическая реакция протекает только при энергиях налетающей частицы, превышающей пороговую  $E_{пор}$  энергию ядерной реакции. Обозначим минимальная кинетическая энергия налетающей частицы, при которой возможно эндотермическая реакция

$$E_{пор} = E_{min} = \frac{P_1^2}{2m}, \quad (4.4)$$

где  $P_1$  - импульс налетающей частицы, а мишень покоится  $P_2 = 0$  в лабораторной системе координат. Кинетическая энергия центра инерции системы  $\frac{P_1^2}{2(m_1 + M_2)}$  бесполезна для реакции, поэтому пороговая энергия должна быть больше энергии реакции на эту величину

$$E_{\text{пор}} = |Q| + \frac{P_1^2}{2(m+M)}. \quad (4.5)$$

Исключая импульс частицы  $P_1$  из (4.4) и (4.5), получим пороговую энергию

$$E_{\text{пор}} = |Q|(1 + \frac{m}{M}). \quad (4.6)$$

Если налетающая частица  $a$  имеет положительный заряд, то ее проникновению в ядро препятствуют электрические силы отталкивания. Иными словами, вблизи поверхности ядра она «наталкивается» на кулоновский барьер, который необходимо преодолеть, чтобы ядерная реакция протекала:

$$U_{\text{кул}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{zZe^2}{R} = 1,2 \frac{zZ}{A^{1/3}} \text{ МэВ}. \quad (4.7)$$

Например, для протона  $z = 1$ , сталкивающегося с ядром свинца  $Z = 82, A = 207$ , кулоновский барьер равен  $U_{\text{кул}} \approx 16 \text{ МэВ}$ . А для нейтрона, не обладающего электрическим зарядом  $q = 0$ , кулоновского барьера не существует, и нейтрон даже с малой энергией легко проникает в ядро-мишень.

## 4.2 Эффективное сечение ядерных реакций

Эксперименты с ядерными реакциями проводят, бомбардируя ядра мишени потоком заряженных частиц из ускорителя или потоком нейтронов из атомного реактора. Считается, что все частицы имеют одну и ту же энергию, плотность потока частиц равномерна и равна  $j = N_a / St$  - числу частиц, падающих за единицу времени на единицу площади, перпендикулярной к направлению импульса частиц. Обычно в этих экспериментах измеряют полное  $N$  число частиц  $b$ , образовавшихся в результате реакции. Естественно, что выход реакции  $N$  пропорционален плотности налетающих частиц  $j$ . Поэтому интенсивность реакции характеризуется отношением:

$$\sigma = \frac{N}{j}, \quad (4.8)$$

которое называют **интегральным эффективным сечением** ядерной реакции. Интегральное сечение имеет размерность



$[\sigma] = \left[ \frac{1/c}{1/m^2c} \right] \approx [m^2]$  площади и пропорционально поперечному сечению ядра-мишени, но иногда из-за волновых свойств частиц может значительно превышать поперечные размеры мишени. Знание интегрального сечения нужно, например, при получении радиоактивных изотопов для определения времени облучения мишени. Величину интегрального сечения реакции можно рассчитать в рамках соответствующей ядерной модели и, сравнивая результаты расчета с экспериментальными данными, устанавливают важные детали строения ядра.

Большую информацию получают, если измеряется не интегральное сечение, а **дифференциальное эффективное сечение** ядерных реакций, которое определяет зависимость выхода реакции от энергии бомбардирующей частицы

$$d\sigma(E) = \frac{d\sigma}{dE} dE. \quad (4.9)$$

Поведение дифференциального сечения от энергии налетающей частицы определяется механизмом реакции, который протекает по-разному для различных налетающих частиц и ядер. Эта зависимость в некоторых случаях описывается плавной кривой, иногда резонансной кривой в виде частотола пиков.

Особый интерес представляет изучение угловой зависимости продуктов реакции, которая определяется измерением углового **дифференциального эффективного сечения**

$$d\sigma(\Omega) = \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega. \quad (4.10)$$

На рис.4.2 схематически изображено угловое распределение продуктов реакции. Оно зависит от ориентации спинов частиц, от углового момента, уносимого частицами, часто проявляется волновое свойство микрочастиц в виде дифракционной картины рассеянных частиц.

Интегрируя угловое дифференциальное сечение (4.10) по всем значениям телесного угла получают интегральное сечение реакции. Значение интегрального сечения можно оценить из следующих по-

ложений. Если налетающая частица достаточно быстрая так, что ее дебройлевская длина волны  $\lambda \sim \frac{\hbar}{P} < R$

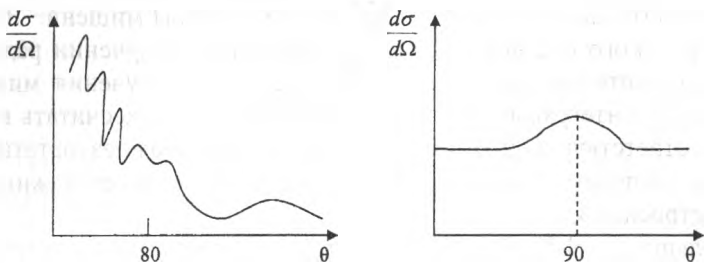


Рис. 4.2. Схематическая зависимость дифференциального сечения  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ .

меньше размеров  $R$  ядра-мишени, тогда интегральное сечение можно положить равным поперечному сечению этого ядра

$$\sigma \sim \sigma_{\text{кл}} = \pi R^2. \quad (4.11)$$

Это позволяет получить представления о величинах сечений ядерных реакций. Учитывая, что радиусы ядер варьируются в пределах от  $10^{-15}$  м до  $10^{-14}$  м, имеем:

$$\sigma \sim |10^{-15}|^2 \sim 10^{-30} \text{ м}^2 \sim 0,01 \text{ барн}. \quad (4.12)$$

За единицу измерения сечение реакции принят **барн**, который равен

$$1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2 \quad (4.13)$$

Но если частица  $a$  медленная, то сечение реакции может резко увеличиться, так как в этом случае оно определяется не радиусом ядра, а дебройлевской длиной волны:

$$\sigma \sim \pi \lambda^2 \quad \text{при} \quad \lambda > R. \quad (4.14)$$

Понятия «быстрая» или «медленная» зависит от радиуса ядра мишени, то условие «медленности»  $\lambda \gg R$  можно переписать в виде  $T \ll \tilde{T}$ , где

$$\tilde{T} = \frac{P^2}{2T} = \frac{\hbar^2}{2T\lambda^2} = \frac{\hbar^2}{2TR^2}. \quad (4.15)$$

Если частица  $a$  является нуклоном, то формула (4.15) дает для легких ядер  $\bar{T} \approx 20 \text{ МэВ}$ , а для тяжелых ядер  $\bar{T} \approx 0,2 \text{ МэВ}$ . Отсюда явствует, что нуклон с одной и той же энергией иногда можно считать медленным (при соударении с легким ядром), а иногда быстрым (при соударении с тяжелым ядром).

Совершенно иначе обстоит дело с нейтронами. Они не несут электрического заряда, а потому могут реагировать с тяжелыми ядрами, даже будучи очень медленными. В дополнение к этому, сечения реакций для медленных частиц гораздо больше, чем для быстрых. Именно этим обстоятельством и обусловлена та огромная роль, которую играют нейтроны в ядерной физике.

В дальнейшем будем часто использовать закон, установленный Э.Ферми в 1935 году. Он утверждает, что при низких энергиях сечение экзотермического процесса обратно пропорционально скорости налетающей частицы:

$$\sigma \sim \frac{1}{v}. \quad (4.16)$$

Понять этот закон просто, медленная частица дольше пролетает мимо ядра-мишени и, следовательно, больше времени взаимодействия частицы с ядром.

#### 4.3 Механизмы ядерных реакций. Прямые ядерные реакции

Ядерная реакция происходит при столкновении частицы с ядром, но исход реакции может быть разным, даже если исходные условия реакции остаются неизменными, так как процесс реакции носит статистический характер. Конечный результат реакции различается механизмом протекания реакции. Существует много разных механизмов, и нет ни одного универсального механизма реакции. К тому же в данной конкретной реакции отдельные механизмы обычно конкурируют друг с другом. Но наибольшую известность получили прямые ядерные реакции и ядерные реакции через составное ядро.

**Прямые ядерные реакции** протекают при высоких энергиях налетающей частицы и отличаются следующими особенностями:

- продукты реакции летят преимущественно вперед в системе центра инерции,
- энергия налетающей частицы почти полностью передается вылетающей частице.

Для описания этих процессов С. Батлер в 1953 году предложил следующий механизм. Налетающая частица взаимодействует не с ядром в целом, а с отдельным нуклоном или группой нуклонов на периферии ядра, непосредственно передавая ему свою энергию в течение характерного ядерного времени  $\tau_{\text{ядр}} \sim 10^{-21} - 10^{-22}$  с. Такие процессы чрезвычайно многообразны. Отметим среди них реакцию срыва (d, p) и (d, n), когда дейтрон пролетая мимо ядра, и ядро срывает один нуклон из него, а далее летит уже одинокий нуклон и реакции подхвата (p, d) и (n, d), или обратный процесс – реакция подхвата (p,d) и (n,d).



Рис. 4.3. Реакции срыва (d,p) и (d,n).

Когда из ядра выбивается нуклон в реакции подхвата (p,d), то состояние нуклона в ядре согласно оболочечной модели имеет определенный угловой момент, который сказывается на угле рассеяния продуктов реакции. Точно так же и в реакции срыва, когда заселяется нуклон на оболочечный уровень в ядре, угловой момент состояния нуклона определяет угловое распределение улетающего дейтрона.

Реакция протекает в соответствии с моделью оболочек. Из этих исследований следует, что в легких ядрах нуклоны объединены в группы типа  $\alpha$ -частицы. На этой основе сформулирована модель нуклонных ассоциаций, или кластеров, именуемая также единой моделью ядра. Основные ее идеи не противоречат представлениям оболочечной модели, а дополняют их.

#### 4.4 Ядерная реакция через составное ядро

Многие ядерные реакция характеризуются тем, что они протекают сравнительно медленно – за время  $\tau \sim 10^{-12}$  с  $> \tau_{\text{я}}$ , на много порядков превышающее ядерное время. Угловое распределение

продуктов этих реакций в системе центра инерции симметрично относительно угла  $\theta = 90^\circ$  к направлению импульса падающей частицы. При малых энергиях частицы их сечения имеют резко выраженные максимумы. Объяснение таких реакций было дано в 1936 году Н. Бором, который предложил **механизм составного ядра**.

Ядерные реакции через составное ядро проходят в 2 этапа:



На первом этапе частица  $a$  захватывается ядром  $X$  и растрчивает свою энергию на многочисленные соударения с нуклонами внутри ядра. В итоге образуется **составное ядро**  $C^*$ . Оно находится в возбужденном состоянии, на что указывает звездочка в обозначении.

Энергия возбуждения ядра  $E_c^* = E_a + \epsilon_c$  складывается из энергии  $E_a$  налетающей частицы и  $\epsilon_c$  энергии связи, которая высвобождается при образовании ядра  $C^*$ . Первый этап завершается очень быстро образованием составного ядра.

На втором этапе энергия возбуждения распределяется между нуклонами, пока случайно не сосредоточится на отдельном нуклоне и будет в состоянии преодолеть кулоновский барьер и выйти за пределы ядра. Продолжительность второго этапа на много порядков превышает  $\tau_j$  время первого этапа так, что составное ядро забывает, как оно образовалось. Поэтому можно считать независимыми эти два этапа реакции: образование составного ядра  $a + X \rightarrow C^*$  и распад его  $C^* \rightarrow Y + b$ . Это позволяет записывать сечение  $\sigma_{ab}$  реакции в целом в виде произведения сечения образования составного ядра  $\sigma_{ac}$  и вероятности  $\lambda_{cb}$  процесса распада

$$\sigma_{ab} = \sigma_{ac} \lambda_{cb} \quad (4.18)$$

Составное ядро может распадаться по разным каналам: упругого рассеяния  $X + a$ , неупругого рассеяния  $X^* + a$ , радиационного захвата  $C + \gamma$ ,  $Y + n$ ,  $Y + p$ ,  $Y + \alpha$  и др. Вероятность распада по определенному каналу характеризуется соответствующей **парциальной шириной распада**  $\Gamma_b$ . Сумма парциальных ширин всех распадов равна  $\Gamma = \sum \Gamma_b$  - **полной ширине распада**. Нормированная ве-

роятность распада по каналу  $C^* \rightarrow Y + b$  равна  $\lambda_{cb} = \Gamma_b / \Gamma$ . Поэтому сечение реакции (4.18) выражается формулой

$$\sigma_{ab} = \sigma_{ac} \frac{\Gamma_b}{\Gamma}. \quad (4.19)$$

Составное ядро находится в возбужденном состоянии, каждый энергетический уровень ядра имеет определенное значение энергии  $E_i$  и времени жизни  $\tau_i$ . Используя соотношения неопределенности  $\Delta E \Delta t \sim \hbar$  и полагая, что неопределенность времени жизни порядка времени жизни  $\Delta t \sim \tau_i$ , определим неопределенность в энергии уровня возбуждения  $\Delta E = \hbar / \Delta t$ . Точно такая связь парциальной ширины распада уровня  $\Gamma_i = \hbar / \tau_i$  со временем жизни уровня. Таким образом, ширина уровня ядра непосредственно связана со временем жизни уровня – с уменьшением времени жизни уровня ширина уровня, т.е. размытость уровня увеличивается.

Обозначим  $\delta E$  - расстояние между уровнем. В нижней части спектра возбужденных состояний ядра, где энергии возбуждения ядра еще малы, выполняется неравенство  $\Gamma < \delta E$ , и энергетический спектр ядра  $C^*$  - дискретен. В данной области имеются явно выделенные значения энергии  $E_a$  налетающих частиц:

$$E_0 = E_a = E_i^* - \varepsilon \quad (4.20)$$

и процесс образования составного ядра носит резонансный характер. В этом случае сечение ядерной реакции через составное ядро описывается знаменитой **формулой Брейта-Вингера**

$$\sigma_{ab} = \sigma_{ac} \lambda_{cb}^2 = \pi \lambda_a^2 \frac{\Gamma_a \Gamma_b}{(E - E_0)^2 + \Gamma^2 / 4}, \quad (4.21)$$

где  $\lambda_a$  - длина дебройлевской волны падающей частицы,  $\Gamma_a / \Gamma$  - вероятность образования составного ядра по каналу  $a + X \rightarrow C^*$ ,  $E_0$  - энергия уровня составного ядра с учетом (4.20),  $E$  - энергия падающей частицы.

В заключение отметим, что в настоящее время ядерные реакции уже широко используются не только в научных исследованиях, но и для прикладных целей. С помощью ядерной реакции выделяют из ядра энергию на атомных электростанциях, производят радиоактивные изотопы для медицины и народного хозяйства, ядерные реак-

ции используются для изучения строения ядра, свойств ядерных сил, и, наконец, для изучения механизма самих ядерных реакций.

### Вопросы для закрепления знаний

1. Чем отличаются экзотермические реакции от эндотермических реакций?
2. Почему порог реакции больше модуля энергии реакции?
3. Какие законы сохранения универсальны в ядерных реакциях?
4. Что такое сечение реакции, и в каких единицах оно измеряется?
5. Почему сечение реакции больше для медленных налетающих частиц по сравнению с быстрыми частицами?
6. Как зависит понятие быстрые частицы от массового числа ядра мишени?
7. Что такое каналы ядерной реакции?
8. Опишите механизм прямой ядерной реакции: а) какое время протекания реакции, б) каково угловое распределение продуктов реакции, в) каково соотношение энергии налетающей и вылетающей частиц?
9. Опишите механизм ядерной реакции через составное ядро: а) какое время протекания реакции, б) каково угловое распределение продуктов реакции, в) какова энергетическая зависимость сечения реакции при больших энергиях падающей частицы, г) какова энергетическая зависимость сечения реакции при низких энергиях?
10. Какие составные ядра образуются в следующих реакциях:  
а)  $^{10}\text{B}(\alpha, p)^{13}\text{C}$ ,                      в)  $^{12}\text{C}(^3\text{He}, \alpha)^{11}\text{C}$ ,  
б)  $^9\text{Be}(p, d)^8\text{Be}$                               с)  $^{10}\text{F}(p, \alpha)^{16}\text{O}$ ?
11. Испускание нуклонов составным ядром напоминает испускание молекул нагретой каплей жидкости. Объясните почему?
12. Выпишите формулу Брейта-Вигнера и объясните, какие процессы она описывает.
13. Сечение ядерной реакции через составное ядро при малых энергиях налетающей частицы носит явный резонансный характер, а при высоких энергиях не проявляется резонанс. Объясните почему?
14. Как меняется спектр уровней ядра с увеличением энергии его возбуждения?
15. Как полная ширина распада ядра связана с вероятностью распада по определенному каналу?

## Примеры решения задач

**Задача 4.1.** Используя законы сохранения, выпишите все возможные реакции ускоренных протонов с ядрами  ${}^7_3\text{Li}$ .

**Решение:** Законы сохранения электрического заряда, барионного и лептонного зарядов, позволяют протекание следующих двухчастичных реакций:

1.  ${}^7_3\text{Li} + p \rightarrow p + {}^7_3\text{Li}$ ,
2.  ${}^7_3\text{Li} + p \rightarrow n + {}^7_4\text{Be}$ ,
3.  ${}^7_3\text{Li} + p \rightarrow \gamma + {}^8_4\text{Be}$ ,
4.  ${}^7_3\text{Li} + p \rightarrow {}^2_1\text{H} + {}^6_3\text{Li}$ ,
5.  ${}^7_3\text{Li} + p \rightarrow {}^3_1\text{H} + {}^5_3\text{Li}$ ,
6.  ${}^7_3\text{Li} + p \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ .

**Задача 4.2.** В каких реакциях можно получить изотоп  ${}^8_4\text{Be}$ ?

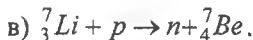
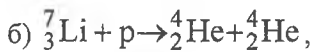
**Решение:** В соответствии с законами сохранения и имеющими в природе изотопов можно получить  ${}^8_4\text{Be}$  из следующих реакций:

1.  $p + {}^7_3\text{Li} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + \gamma$ ,
2.  $p + {}^{10}_5\text{B} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^3_2\text{He}$ ,
3.  $p + {}^{11}_5\text{B} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^4_2\text{He}$ ,
4.  $\gamma + {}^9_4\text{Be} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + n$ ,
5.  $\gamma + {}^{10}_4\text{Be} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + d$ ,
6.  ${}^2_1\text{H} + {}^6_3\text{Li} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + \gamma$ ,
7.  ${}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + \gamma$ .

**Задача 4.3.** Найти энергию  $Q$  ядерных реакций

а)  ${}^7_3\text{Li} + p \rightarrow p + {}^7_3\text{Li}$ ,





Для эндотермических реакций вычислить пороговую энергию.

Указание: дефект масс указанных изотопов:

$$\Delta(1,0) = 8,071 \text{ МэВ}, \quad \Delta(1,1) = 7,289 \text{ МэВ},$$

$$\Delta(4,2) = 2,424 \text{ МэВ}, \quad \Delta(7,3) = 14,907 \text{ МэВ},$$

$$\Delta(7,4) = 15,768 \text{ МэВ}.$$

**Решение:** Энергия ядерной реакции равна

$$Q = [(m + M) - (m' + M')]c^2.$$

$$\text{а) } Q = [(14,907 + 7,289) - (14,907 + 7,289)] = 0$$

- это упругое рассеяние без изменения энергии.

$$\text{б) } Q = [(14,907 + 7,289) - 2 \times 2,424] = 17,35 \text{ МэВ}$$

- это экзотермическая реакция с выделением энергии.

$$\text{в) } Q = [(14,907 + 7,289) - (15,768 + 8,071)] = -1,64 \text{ МэВ}$$

- это эндотермическая реакция с поглощением энергии. В этом случае реакция происходит при пороговой энергии протонов

$$E_{\text{пор}} = |Q|(m + M)/M = 1,64 \times (1,0078 + 7,0160)/7,0160 = 1,93 \text{ МэВ}.$$

**Задача 4.4.** Выход реакции образования радиоактивных изотопов можно охарактеризовать либо числом  $k_1 = N_1 / N_2$  - отношением  $N_1$  - числа происшедших актов ядерного превращения к  $N_2$  - числу бомбардирующих частиц, либо числом  $k_2 = I_0 / N_2$  [Бк] - отношением  $I_0$  активности полученного продукта к  $N_2$  - числу частиц, бомбардирующих мишень. Как связаны между собой величины  $k_1$  и  $k_2$ ?

**Решение:** Так как активность препарата  $I_0 = \lambda N_1$ , то

$$k_2 = I_0 / N_2 = \lambda N_1 / N_2 = \lambda k_1 = k_1 \ln 2 / T_{1/2}.$$

**Задача 4.5.** При бомбардировке  ${}^7_3\text{Li}$  протонами образуется радиоактивный изотоп бериллия  ${}^7_4\text{Be}$  с периодом полураспада

$T_{1/2} = 4,67 \cdot 10^6$  с. Найти выход реакции  $k_1$ , если известно, что

бомбардирующие протоны с общим зарядом  $q = 1 \text{ мкА} \cdot \text{ч}$  вызывают активность полученного препарата  $I_0 = 6,51 \cdot 10^6 \text{ Бк}$ .

**Решение:** Из задачи 4.4 имеем

$$k_1 = k_2 T_{1/2} / \ln 2 = I_0 T_{1/2} / (N_2 \ln 2).$$

Суммарный заряд равен  $q = eN_2$ , откуда  $N_2 = q/e$ . Следовательно,

$$k_1 = e I_0 T_{1/2} / (q \ln 2) = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,51 \cdot 10^6 \cdot 4,67 \cdot 10^6 / (10^{-6} \cdot 36000,69) \approx 1/500$$

**Задача 4.6.** В реакции  ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^{17}_8\text{O}$  под каким углом  $\varphi$  к направлению движения  $\alpha$ -частицы вылетает протон, если известно, что

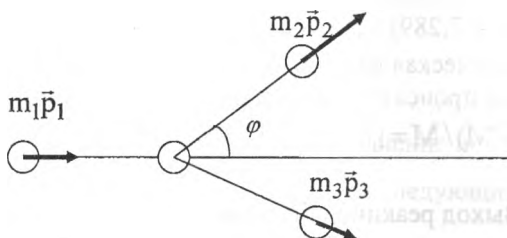


Рис.4.1. К задаче 4.6.

его кинетическая энергия равна  $W_2 = 8,5 \text{ МэВ}$ , а кинетическая энергия  $\alpha$ - частицы равна  $W_1 = 7,7 \text{ МэВ}$  и энергия реакции  $Q = -1,18 \text{ МэВ}$ ?

**Решение:** Обозначим  $m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$  - массы бомбардирующей  $\alpha$ - частицы, протона и ядра отдачи  ${}^{17}_8\text{O}$ ; а  $W_1$ ,  $W_2$  и  $W_3$  - их кинетические энергии. Так как ядро мишени  ${}^{14}_7\text{N}$  неподвижно, то закон сохранения энергии запишется так:

$$W_1 + Q = W_2 + W_3 \quad (1),$$

где  $Q$  - энергия реакции. Закон сохранения импульса имеет вид:

$$\vec{p}_1 = \vec{p}_2 + \vec{p}_3 \quad (2).$$

Из (2) имеем

$$p_3^2 = p_1^2 + p_2^2 - 2p_1 p_2 \cos \varphi \quad (3).$$

Так как  $W = p^2 / 2m$ , то  $p^2 = 2mW$  (4)

и уравнение (3) примет вид

$$2m_3 W_3 = 2m_1 W_1 + 2m_2 W_2 - 2 \cos \varphi \sqrt{m_1 m_2 W_1 W_2}.$$

Откуда имеем

$$W_3 = m_1 W_1 / m_3 + m_2 W_2 / m_3 - 2 \cos \varphi \sqrt{m_1 m_2 W_1 W_2} / m_3 \quad (5).$$

Исключая из (1) энергию  $W_3$ , получим формулу, которая связывает кинетическую энергию бомбардирующих  $\alpha$ -частиц с кинетической энергией протонов:

$$W_1(m_3 - m_1) + Qm_3 = W_2(m_2 + m_3) - 2 \cos \varphi \sqrt{m_1 m_2 W_1 W_2}.$$

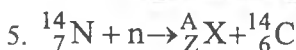
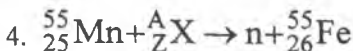
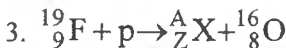
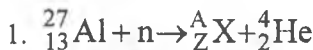
Откуда имеем

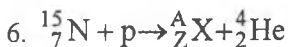
$$\cos \varphi = [W_2(m_2 + m_3) - W_1(m_3 - m_1) - Qm_3] / (2\sqrt{m_1 m_2 W_1 W_2}) = 0,849,$$

или  $\varphi = 32^\circ$ .

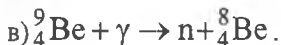
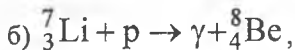
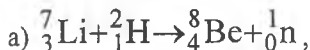
### Задание для самостоятельной работы

**Задача 4.7.** Определить изотоп  ${}^A_Z X$  в следующих реакциях:





**Задача 4.8.** Найти энергию  $Q$  следующих реакций:

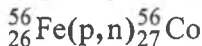


Для эндотермических реакций вычислить пороговую энергию.

**Ответ:** а)  $Q = 15,12 \text{ МэВ}$ , б)  $Q = 17,2 \text{ МэВ}$ ,

в)  $Q = -1,77 \text{ МэВ}$ ,  $E_{\text{пор}} = 1,77 \text{ МэВ}$

**Задача 4.9.** В результате ядерной реакции



образуется радиоактивный изотоп кобальта с периодом полураспада  $T_{1/2} = 80 \text{ сут}$ . Найти выход реакции  $k_1$ , если известно, что бомбардирующие протоны с общим зарядом  $q = 20 \text{ мкА} \cdot \text{ч}$  вызывают активность полученного препарата  $I_0 = 5,2 \cdot 10^7 \text{ Бк}$ .

**Ответ:**  $k_1 = 1/1000$ .

**Задача 4.10.** При бомбардировке изотопа лития дейтронами образуются две  $\alpha$ -частицы, разлетающиеся симметрично под углом  $\varphi$  к направлению скорости бомбардирующих дейтронов. Какую кинетическую энергию  $W_2$  имеют образующиеся  $\alpha$ -частицы, если известно, что энергия бомбардирующих дейтронов  $W_1 = 0,2 \text{ МэВ}$  и энергия реакции  $Q = 22,42 \text{ МэВ}$ . Найти угол  $\varphi$ .

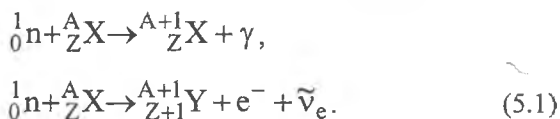
**Ответ:**  $W_2 = 11,31 \text{ МэВ}$ ,  $\varphi \approx 87,3^\circ$ .

## Глава 5. Деление ядер. Ядерная энергетика

### 5.1 Механизмы деления ядер

**Деление ядер** – это процесс превращения ядра в несколько (2, редко 3 или 4) осколков, сравнимых по массе. Различают **спонтанное деление** (самопроизвольное) деление, которое относят к радиоактивным превращениям, и **вынужденное деление**, происходящее под действием нейтронов, что является примером ядерной реакции.

В 1934 году Э. Ферми начал опыты по облучению урана нейтронами в надежде получить трансурановые элементы в цепочках превращений вида



Он действительно обнаружил  $\beta^-$ -излучение, причем весьма сложного состава, и сделал (ошибочный) вывод о синтезе элемента с  $Z = 93$ .

В 1938-39 г.г. О.Ган и Ф.Штрассман повторяя этот опыт, облучали уран нейтронами, наблюдали активность La и Ba - элементов из середины таблицы Менделеева. Л.Мейтнер и О.Фриш объяснили этот результат. При захвате нейтрона ядро урана делится на 2 сравнимых по массе осколка, что в то время считалось совершенно не вероятным.

Процесс деления ядра можно объяснить в рамках капельной модели. Будем считать, что ядро находится в основном состоянии и имеет сферическую форму. Кроме того, предположим для простоты, что ядро делится на два идентичных осколка  ${}^{A'}_{Z'}Y$ , так что  $Z' = Z/2$  и  $A' = A/2$ .

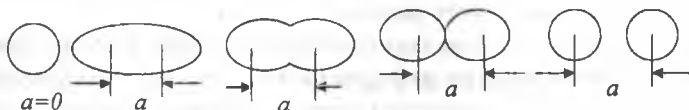


Рис.5.1 Процесс деления

Чтобы процесс деления был энергетически выгодным (экзотермическим), необходимо, чтобы энергия деления была положительной:

$$Q_{\text{дел}} = (\epsilon_{A/2} - \epsilon) \cdot A > 0. \quad (5.2)$$

Полная энергия ядра  $X$  задается формулой Вайцзеккера, и полная энергия ядра  $Y$  – той же формулой, но с заменой  $Z$  на  $Z/2$  и  $A$  на  $A/2$ . Если не учитывать член спаривания, то для энергии реакции деления имеем:

$$Q_{\text{дел}} = E_x - 2E_y = \left(1 - \sqrt[3]{2}\right) \alpha_2 A^{\frac{2}{3}} + \left(1 - \frac{1}{\sqrt[3]{4}}\right) \alpha_3 Z^2 A^{-\frac{1}{3}}. \quad (5.3)$$

Рассматриваемый процесс становится экзотермическим, начиная с ядра  $X_0$ , для которого  $Q_{\text{дел}} = 0$ , что дает для его характеристик:

$$\frac{\alpha_3}{\alpha_4} \left( \frac{Z^2}{A} \right)_0 = \sqrt[3]{4} \frac{\sqrt[3]{2} - 1}{\sqrt[3]{4} - 1} \cong 0,7. \quad (5.4)$$

Заметим, что в выражении (5.4) слева стоит отношение кулоновской и поверхностной энергий исходного ядра:

$$\frac{E_{\text{кул}}}{E_{\text{пов}}} = \frac{\alpha_3 Z^2}{\alpha_4 A}. \quad (5.5)$$

Произведя количественный расчет этого выражения, и подставляя числовые значения  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$ , получаем для «критического» ядра:

$$\left( \frac{Z^2}{A} \right)_{\text{кр}} \approx 50 \quad (5.6)$$

Откуда следует, что «критическими» становятся ядра с  $Z \approx 110$ . Если  $Z^2/A > 50$ , то такие ядра не могут существовать, так как они делятся, причем мгновенно. Если отношение  $Z^2/A$  для данного ядра меньше критического значения, то возможность деления ядра требует дополнительного анализа.

Рассмотрим с этой целью поведение полной энергии ядра при возрастании параметра деформации  $a$ . Как видно из рисунка 5.1 значение  $a=0$  характеризует невозбужденное сферическое ядро (а). Для слабо деформированного ядра (б) параметр  $a$  есть рас-

стояние между фокусами эллипсоида. Для сильно деформированного ядра ( $e$ )  $a$  приобретает смысл расстояния между центрами наметившихся к делению дочерних ядер. После разрыва ядерной капли  $a$  становится равным расстоянию между центрами разлетающихся осколков. Зависимость полной энергии  $E=E(a)$  изображена на рис. 5.2. Штриховая кривая отвечает критическим ядрам, которые мгновенно делятся без воздействия извне. Сплошная кривая на рис. 5.2 соответствует интересующим нас ядрам, некритическим ядрами. Для них при малых деформациях, т.е. в окрестности точки  $a=0$  кривая идет вверх. В другом предельном случае, при  $a \rightarrow \infty$ , имеем:  $E=2E_Y < E_X$ . В какой-то точке  $a = a_{кр}$  зависимость  $E=E(a)$  должна иметь максимум, как это и изображено на рис.5.2.

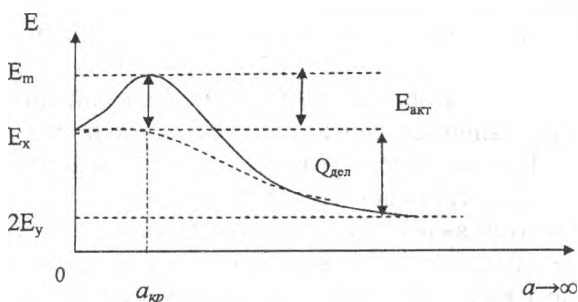


Рис.5.2. Зависимость полной энергии делящегося ядра от параметра  $a$

Разность между энергией  $E_X$  невозбужденного ядра и значением энергии  $E=2E_Y$  при  $a \rightarrow \infty$  есть **энергия реакции деления**  $Q_{дел}$ . Разность между максимальной энергией  $E_m$  деформированного ядра и энергией  $E_X$  называется **энергией активации**:

$$E_{акт} = E_{max} - E_X. \quad (5.7)$$

Чтобы ядро развалилось, ему надо сообщить извне энергию возбуждения  $E_{возб} > E_{акт}$ . В процессе деления выделяется энергия

$$E_{выдел} = Q_{дел} - E_{возб}, \quad (5.8)$$

которая может оказаться положительной.

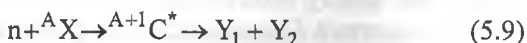
С некоторой вероятностью ядро может развалиться без сообщения ему энергии. Механизм такого спонтанного деления подобен механизму  $\alpha$ -распада, так как проходит за счет туннельного эффекта. Поскольку массы осколков велики, то вероятность спонтанного деления чрезвычайно мала. В 1940 году наши ученые К.А. Петржак и Г.Н. Флеров открыли явление спонтанного деления ядер и измерили период спонтанного распада урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$ , который оказался фантастически большим  $T_{1/2}=0,8 \cdot 10^{16}$  лет. Для урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$  отношение  $Z^2/A=35,5 < 50$ , значительно меньше критического, и вероятность распада чрезвычайно мала.

## 5.2 Деление ядер под действием нейтронов. Цепная реакция

При каждом акте спонтанного деления выделяется значительное количество энергии. Но источником энергии эти процессы служить не могут: они чрезвычайно редки и неуправляемы. С практической точки зрения неизмеримо больший интерес представляет **вынужденное деление тяжелых ядер под действием нейтронов**. Интенсивность реакции деления зависит от энергии нейтронов  $E_n$  и от сорта делящихся ядер  $X$ .

Общепринятой является следующая терминология. Нейтроны с энергиями от 0,025 до 0,5 эВ называются тепловыми, с энергиями от 0,5 эВ до 1 кэВ – резонансными, с энергиями от 1 до 100 кэВ – промежуточными, а с энергиями от 100 кэВ до 14 МэВ – быстрыми.

Процесс деления является сравнительно медленным, т.к. требует глубокой перестройки структуры ядра. С момента захвата нейтрона ядром  ${}^A_Z X$  до момента деления проходит время  $\tau \approx 10^{-17}$  с, на 5 порядков превышающее  $\tau_{\text{яд}}$ . Поэтому процесс деления происходит по схеме



через образование составного ядра  ${}^{A+1}C^* \equiv {}^{A+1}_Z X^*$  в возбужденном состоянии. Деление произойдет в том случае, когда будет выполнено условие  $E_{\text{возб}}^* > E_{\text{акт}}$ . Энергия возбуждения ядра при захвате нейтрона равна



$$E_{\text{возб}} = E_n + \varepsilon_{A+1} \quad (5.10)$$

и состоит из кинетической энергии  $E_n$ , внесенной захваченным нейтроном, и удельной энергии связи  $\varepsilon_{A+1}$ , которая выделяется при захвате нейтрона и образования составного ядра  $^{A+1}C$ . Из (5.10) имеем кинетическую энергию нейтрона  $E_n = E_{\text{возб}} - \varepsilon_{A+1}$  и подставляя в условие развала при сообщении извне энергии возбуждения  $E_{\text{возб}} > E_{\text{акт}}$ , получим условие возможности деления ядра:

$$E_n > E_f = E_{\text{акт}} - \varepsilon_{A+1}, \quad (5.11)$$

где  $E_f$  — **эффективный порог деления**, при энергиях нейтрона ниже которого не происходит деление ядра. Так как энергия активации  $E_{\text{акт}}$  и удельная энергия связи  $\varepsilon_{A+1}$  теоретически вычисляемы, то и эффективный порог деления  $E_f$  можно вычислить для конкретного ядра и определить при каких энергиях падающего нейтрона возможно деление ядра. Так как удельная энергия связи четно-четного ядра  $\varepsilon_{\text{чет}} > \varepsilon_{\text{неч}}$  больше нечетного ядра, то возможно для некоторых ядер  $E_{\text{акт}} < \varepsilon_{A+1}$  и порог деления крайне мал и даже отрицателен  $E_f < 0$ . Подставляя значения  $E_{\text{акт}}$  и  $\varepsilon_{A+1}$  в выражение (5.11), получим значения порога деления  $E_f$  для изотопов урана:

$$E_f = \begin{cases} -0,3 \text{ МэВ} & \text{для } ^{235}\text{U}, \\ 1,6 \text{ МэВ} & \text{для } ^{238}\text{U}. \end{cases} \quad (5.12)$$

Таким образом, изотоп урана  $^{235}\text{U}$  делится под действием медленных нейтронов, а изотоп  $^{238}\text{U}$  под действием быстрых нейтронов. На опыте обнаружена эта разница в делении ядер двух изотопов урана:  $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$ . Ядра урана  $^{238}\text{U}$  делятся под действием нейтронов с кинетической энергией не менее 1 МэВ, в то время как ядра урана  $^{235}\text{U}$  делятся при захвате самых медленных, тепловых нейтронов. Тепловые нейтроны вызывают деления ядер изотопа урана  $^{233}\text{U}$  и трансуранового элемента плутония  $^{239}_{94}\text{Pu}$ .

Имеется и другое не менее существенное преимущество в делении ядер изотопа  $^{235}\text{U}$ . В области малых энергий действует так называемый закон  $1/v$ , согласно которому сечение деления обратно пропорционально скорости частицы  $\sigma \sim 1/v$ . Поэтому для теп-

ловых нейтронов с энергией  $E_n \sim 0,025$  эВ сечение деления  $^{235}\text{U}$  оказывается равным примерно  $\sigma \sim 600$  барн, а для изотопа  $^{238}\text{U}$ , делщегося при энергиях нейтрона  $E_n > 2$  МэВ сечение деления всего  $\sigma \sim 0,5$  барн.

С реакцией деления  $(n, f)$  конкурируют процессы неупругого рассеяния  $(n, n')$ , упругого рассеяния  $(n, n)$  и радиационного захвата  $(n, \gamma)$ , которые мешают делению. При малых энергиях конкурирующие процессы мало вероятны или просто отсутствуют.

При каждом акте деления одного ядра  $^{235}\text{U}$  выделяется энергия  $Q_{\text{дел}} = (\epsilon_{A/2} - \epsilon_A)A \approx 200$  МэВ, основная доля которой ( $\sim 80\%$ ) освобождается в виде кинетической энергии осколков. Их обычно два и существенно отличаются по массе друг от друга.

Так как в тяжелых ядрах наблюдается избыток нейтронов, а в получаемых осколках- ядрах малой массы число протонов и нейтронов почти одинаково, то этот избыток нейтронов испускается во время акта деления. Поэтому их называют **мгновенными нейтронами**.

После испускания мгновенных нейтронов осколки оказываются в возбужденном состоянии. Эта энергия возбуждения освобождается испусканием **мгновенных  $\gamma$ -квантов**.

Испускание мгновенных нейтронов не восстанавливает равновесное отношение  $N/Z$  в осколках. Они еще перегружены нейтронами и освобождаются от них путем ряда  $\beta^-$ -распадов с вылетом электронов и электронных антинейтрино. Бета-превращения сопровождаются  $\gamma$ -излучением, но уже **запаздывающим** по сравнению с первичным актом деления.

Наконец, излучаются **запаздывающие нейтроны**, количество которых не большое, но их наличие важно для осуществления управляемой цепной реакции.

Рассмотрим, как происходит процесс деления урана  $^{235}\text{U}$ . При захвате нейтрона ядро делится в основном на два осколка и испускается в среднем два нейтрона. Эти 2 нейтрона при их захвате ядрами вызывают 2 деления ядер с испусканием  $2^2$  нейтронов, которые вызовут  $2^3$  нейтронов и т. д. В итоге разовьется лавинообразный процесс – **цепная ядерная реакция**. Если не регулировать

ее, то цепная реакция завершится взрывом колоссальной силы, который и происходит в атомной бомбе.

Для получения управляемой цепной реакции необходимы следующие условия.

1. В цепной реакции с медленными нейтронами участвует только изотоп  $^{235}\text{U}$ . В естественной смеси урана находится изотопа  $^{238}\text{U}$  – 99,3% , а необходимого изотопа  $^{235}\text{U}$  всего – 0,7% . Для осуществления цепной реакции необходимо обогатить естественный уран изотопом  $^{235}\text{U}$  до 15%. Проблема обогащения урана довольно сложна.

2. Испускаемые при делении  $^{235}\text{U}$  нейтроны имеют  $E_n \sim 2$  МэВ. Для осуществления реакции деления на тепловых нейтронах необходимо замедлить нейтроны. В качестве замедлителя используют материалы, масса ядер которых мала и сравнима с массой нейтрона. Другое требование к материалу замедлителя, чтобы ядра замедлителя не захватывали нейтроны. Хорошим замедлителем является тяжелая вода  $\text{D}_2\text{O}$  - дейтерий не захватывает нейтроны, но из-за ее дороговизны используют в качестве замедлителя обычную воду  $\text{H}_2\text{O}$ , хотя водород захватывает часть нейтронов с образованием дейтерия.

Для снижения вероятности захвата нейтрона материалом замедлителя вместо однородной смеси урана и замедлителя (гомогенная среда) применяется гетерогенная система в виде чередующихся блоков урана и замедлителя. Образовавшийся в уране быстрый нейтрон успевает уйти в замедлитель, где становится тепловым, после чего диффундирует обратно в уран и вступает в реакцию деления. Таким путем удается повысить вероятность реакции на 40-50%.

Первую цепную реакцию деления осуществил Э. Ферми в 1942 году, используя чередующиеся блоки естественного урана и графита в качестве замедлителя.

3. Цепная реакция будет идти лишь в том случае, когда ядерного горючего достаточно много. Минимальная масса топлива, при которой еще протекает цепная реакция, называется **критической массой**. Она зависит от формы, наличия отражателя. Критическую массу можно существенно уменьшить, окружив зону реакции **отражателем** нейтронов, который предотвращает утечку нейтронов, направляя их обратно в зону реакции. Хорошим отража-

телем является бериллий. В реакциях на тепловых нейтронах роль отражателя часто выполняет замедлитель.

4. Для количественной характеристики скорости нарастания цепной реакции вводят величину  $k$ , называемую **коэффициентом размножения нейтронов в среде**. Он определяется как отношение числа быстрых нейтронов в данном поколении к их числу в предшествующем поколении:

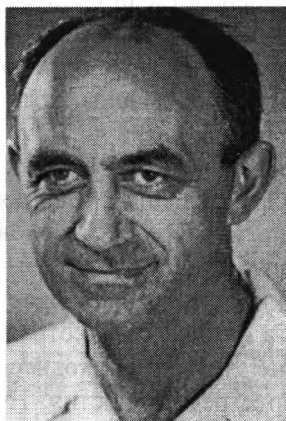
$$k = \frac{N_i}{N_{i-1}}, \quad (5.13)$$

Если в первом поколении было  $N_1$  нейтронов, то в  $n$ -ом поколении их будет  $N_n = N_1 k^{n-1}$ . Отсюда ясно, что при  $k = 1$  реакция протекает стационарно (рабочий режим реактора), при  $k > 1$  интенсивность реакции нарастает (режим разогрева реактора или взрыв бомбы), при  $k < 1$  реакция гаснет. Система при  $k = 1$  называется **критической**, при  $k > 1$  - **надкритической**, при  $k < 1$  - **подкритической**. Очевидно, что критическая масса – это как раз масса горючего в критической системе.

### 5.3 Ядерные реакторы на тепловых и быстрых нейтронах

**Ядерные реакторы** – это устройства, в которых протекает управляемая цепная реакция деления тяжелых ядер. **Реакторы** – сложнейшие в техническом и технологическом отношении установки, которые различаются по ряду признаков:

1. по энергии нейтронов, при которой протекает реакция деления ядер, различаются реакторы: на тепловых, на быстрых и на промежуточных нейтронах;
2. ядерное горючее ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{233}\text{U}$ ), обычно смешанное с ураном  $^{238}\text{U}$ , и сырьё для воспроизводства горючего ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ );
3. тип замедлителя: обычная вода, тяжелая вода, органические жидкости, графит, бериллий...
4. тип теплоносителя, служащего для отвода тепла из активной зоны в установку, вырабатывающую электроэнергию: обычная вода, водяной пар, органические жидкости, азот, жидкие металлы.
5. по структуре активной зоны: гомогенные и гетерогенные;
6. по режиму работы: непрерывный, импульсный;
7. по назначению: энергетические, исследовательские, для воспроизводства делящихся материалов.



**Энрико Ферми (1901-1954)** – итальянский физик, родился в Риме. Окончил Пизанский ун-т (1922), работал в Гёттингенском ун-те у М. Борна (1923), в Лейденском ун-те у П. Эренфеста (1924), преподавал в Римском и Флорентийском ун-тах. В 1938 эмигрировал в США, где работал в Колумбийском (1939-42), Чикагском (1942-45) ун-тах, в Ин-те ядерных исследований (Чикаго с 1946). Разработал статистику частиц с полуселым спином (1925), создал теорию бета-распада (1933-34), открыл искусственную радиоактивность (1934), создал количественную теорию ионизационных потерь энергии заряженных частиц (1939), В его честь назван 100-й элемент – фермий. Нобелевская премия (1938).

Типичная схема реактора на **тепловых нейтронах** приведена на рис 5.3. Главная часть реактора – **активная зона**, в которой протекает цепная реакция и выделяется энергия. Для уменьшения утечки нейтронов активная зона окружается отражателем. Активная зона состоит из замедлителя, в который помещены кассеты с горючим – твэлы (тепловыделяющие элементы).

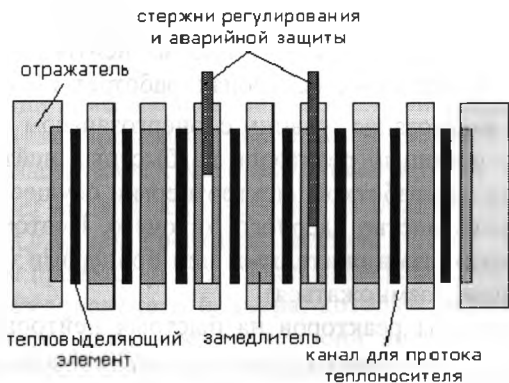


Рис.5.3. Схема реактора на тепловых нейтронах

По каналам циркулирует теплоноситель, непосредственно контактирует с поверхностью твэлов и отводит от них выделяющееся тепло. Интенсивность протекания цепной реакции регулируется специальными стержнями, изготовленными из материалов, которые сильно поглощают нейтроны (кадмий, карбид бора и др.).

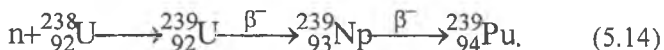
В предрабочем состоянии стержни полностью вдвинуты в активную зону, коэффициент размножения  $k < 1$ , и цепная реакция не идет. По мере выдвижения стержней поглощение нейтронов уменьшается, коэффициент размножения возрастает, и при некотором положении достигается равенство  $k=1$ . Реактор начинает работать, но постепенно топливо выгорает, а активная зона отравляется продуктами реакции, и регулирующие стержни приходится выдвигать, используя первоначальный «запас реактивности». На случай выхода реактора в надкритический режим работы ( $k > 1$ ) предусмотрены дополнительные аварийные стержни, которые в любой момент могут быть быстро вдвинуты в активную зону для прототвращения взрыва.

Доля производства электроэнергии на АЭС в 1999 году составила во Франции – 76%, в Западной Европе – 43%, Японии – 36%, Северной Америке 19%, а в России составила только 14,4% (в том числе: в территориях Центра России – 28,2%, Северо-запада – более 41%, Поволжья – 23%)

Развитие ядерной энергетики направлено на строительство реакторов на быстрых нейтронах, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с реакторами на тепловых нейтронах. Дело в том, что реактор на тепловых нейтронах работает на изотопе урана  $^{235}\text{U}$ , но его энергозапас сравним с энергозапасом органического топлива. А с помощью реакторов на быстрых нейтронах можно одновременно с выработкой электроэнергии осуществлять расширенное воспроизводство ядерного горючего. Поэтому их называют **реакторами-размножителями** или бридерами (от английского *breed* – расти, размножаться).

Принцип работы реакторов на быстрых нейтронах в следующем. В реактор загружают ядерное топливо – смесь урана  $^{239}\text{U}$  с некоторым количеством плутония  $^{239}\text{Pu}$ . Ядерная энергия выделяется в результате деления плутония  $^{239}\text{Pu}$ , а уран  $^{239}\text{U}$  играет

роль сырья, из которого воспроизводится ядерное горючее по схеме:



Но эксплуатация реакторов на быстрых нейтронах более сложно. Так как здесь нет запаздывающих нейтронов, то управление реакцией деления сильно затруднено. Вместо регулирующих стержней приходится регулировать расстояние между отражателем и активной зоной.

Первый экспериментальный реактор БР-2 на быстрых нейтронах был построен у нас в г. Обнинске в 1956 г. С 1973 года работает в городе Шевченко (Казахстан) атомная электростанция с электрической мощностью в 120 МВт, а тепловая мощность 650 МВт, которая используется для опреснения морской воды до 80 тыс. тонн в сутки. На Белоярской АЭС в Челябинской области уже несколько десятилетий находится в эксплуатации блок БН-600.

Строительство атомных электростанций на быстрых нейтронах считается наиболее перспективным направлением развития энергетики будущего до тех пор, пока не будет освоен управляемый термоядерный синтез.

#### 5.4. Реакции синтеза. Проблема управляемого термоядерного синтеза. Критерий Лоусона. Токамаки

Из графика зависимости удельной энергии связи  $\epsilon_A(A)$  от массового числа  $A$  следует, что выделение энергии возможно не только при делении тяжелых ядер, но и при слиянии легких ядер, в **реакциях синтеза**. Поскольку завал кривой удельной энергии связи  $\epsilon_A(A)$  в области малых массовых чисел крутой, то в реакциях синтеза может выделяться существенно больше энергии на один нуклон  $q = Q/A$ , чем в реакциях деления.

Основным препятствием к протеканию реакций синтеза является наличие **кулоновского барьера**, который должны преодолеть сталкивающиеся ядра, прежде чем они достаточно сблизятся и смогут вступить в сильное взаимодействие. Его высоту  $U_{\text{кул}}$  можно оценить по формуле

$$U_{\text{кул}} = k \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{R} \approx 0,1 \text{ МэВ}, \quad (5.15)$$

полагая в ней  $R=R_1+R_2$ . Для типичных реакций синтеза она составляет десятки и сотни кэВ.

Для преодоления кулоновского барьера необходимо разогнать ядра до  $E > U_{\text{кул}}$ , т.е. нагреть до температуры  $T \sim 10^9$  К. Собственно, сильный разогрев вещества – единственный способ осуществления самоподдерживающихся реакций синтеза, в связи чем они обычно именуется **термоядерными реакциями**. При высоких температурах  $T$  вещество существует в виде **плазмы**, удержание которой с помощью магнитных полей представляет сложную проблему - проблему **управляемого термоядерного синтеза** (УТС).

Сегодня все надежды на УТС связывают с **дейтерий-тритиевой реакцией**



которая считается наиболее эффективной. Ее характеризуют сравнительно низкий кулоновский барьер и большое сечение при относительно невысоких энергиях. Энерговыведение этой реакции

$q = \frac{Q}{A} \approx 3,5 \text{ МэВ} / \text{нуклон}$  значительно превосходит величину  $q \sim 1 \text{ МэВ}$ , типичную для деления тяжелых ядер.

Овладение реакциями синтеза даст человечеству практически неисчерпаемый источник энергии, так как в реакции синтеза на самом деле происходит соединение 4 ядер водорода в одно ядро гелия



а водорода в водах морей и океанов Земли достаточно. Другое преимущество реакции синтеза в том, что не образуются радиоактивные отходы, как при делении ядер.

Но для получения полезной энергии  $W_{\text{пол}}$  из реакции синтеза сначала необходимо затратить тепло  $W_{\text{теп}}$  на разогрев плазмы до необходимой температуры. Поэтому важен энергетический баланс



– условие выгодности  $W_{\text{пол}} > W_{\text{теп}}$ . С этой целью рассмотрим число элементарных актов синтеза в единице объема:

$$N = \alpha(T) \cdot n_D n_T \cdot \tau, \quad (5.18)$$

где  $\tau$  – время удержания плазмы в горячем состоянии,  $n_D$  и  $n_T$  – концентрации дейтерия  ${}^2\text{H}$  и трития  ${}^3\text{H}$ ,  $\alpha(T)$  – некоторая функция температуры  $T$ , вид которой определяется энергетической зависимостью сечения реакции синтеза и условиями процессов теплообмена в плазме.

В одном акте синтеза выделяется энергия  $Q$ , а в единице объема за время  $\tau$  выделяется энергия  $QN$ , которую можно преобразовать в электрическую энергию

$$W_{\text{пол}} = \eta QN = \eta Q \alpha(T) n_D n_T \tau, \quad (5.19)$$

где  $\eta$  – коэффициент преобразования (КПД).

С другой стороны, на разогрев рассматриваемого количества плазмы требуется затратить тепловую энергию на единицу объема

$$W_{\text{теп}} = 2 \frac{3}{2} kT (n_D + n_T), \quad (5.20)$$

где множитель 2 учитывает, что в плазме наряду с ядрами (ионами) присутствуют в таком же количестве электроны. Подставляя (5.19) и (5.20) в условие энергетической выгодности процесса в целом  $W_{\text{пол}} > W_{\text{теп}}$ , получим время, необходимое для удержания плазмы:

$$\tau > \frac{3kT(n_D + n_T)}{\alpha(T)\eta Q n_D n_T} \equiv \frac{3kTn}{\alpha(T)\eta Q n_D(n - n_D)} \quad (5.21)$$

где  $n = n_D + n_T$  – полная концентрация ядерных частиц. Очевидно, что правая часть минимальна при  $n_D = n/2$ . Поэтому условие (5.18) можно переписать как

$$n\tau > \frac{12kT}{\alpha(T)\eta Q} = f(T) \quad (5.22)$$

С увеличением температуры  $T$  функция  $f(T)$  убывает (из-за возрастания сечения реакции), а в области очень высоких температур она возрастает (из-за наличия сомножителя  $T$ ). Поэтому при некотором  $T=T_0$  функция  $f(T)$  достигает минимума. Ясно, что температура  $T_0$  наиболее благоприятна для осуществления УТС. Деталь-

ный анализ поведения функции  $\alpha(T)$  показывает, что для реакции синтеза оптимальна температура

$$T_0 \cong 2 \cdot 10^8 \text{ К.} \quad (5.23)$$

Если положить  $\eta = 1/3$  (реальное значение коэффициента преобразования внутренней энергии в электрическую) и учесть, что  $Q = 17,6 \text{ МэВ}$ , то (минимальное) значение  $f(T_0)$  оказывается равным примерно  $10^{20} \text{ с/м}^3$ . В итоге приходим к следующему условию стационарного протекания дейтерий-тритиевой реакции:

$$\eta \tau > 10^{20}, \quad (5.24)$$

где время  $\tau$  измеряется в секундах, а концентрация  $n$  – в обратных кубических метрах. Условия типа (5.20) и (5.21) и составляют содержание знаменитого **критерия Лоусона**.

Итак, для получения управляемой термоядерной реакции необходимо:

1. высокая температура  $T$  смеси дейтерия  $d$  и трития  $t$ ,
2. достаточная плотность смеси  $n$ ,
3. достаточное время удержания  $\tau$  плазмы.

В земных условиях удовлетворить сформулированным условиям чрезвычайно трудно. В 1951 г. И.Е.Тамм и А.Д. Сахаров предложили **метод магнитного возбуждения и удержания плазмы** и конструкцию установки.

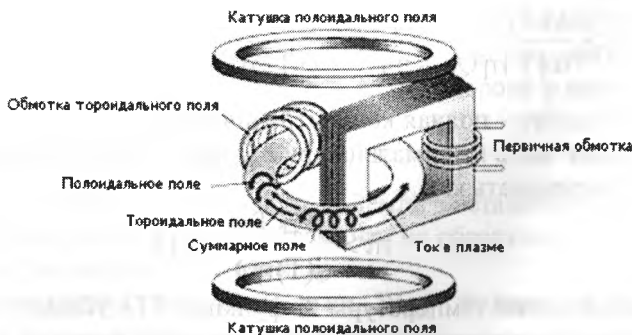


Рис.5.4. Схема токамака

Установка представляет собой тороидальную вакуумную камеру, на которую намотаны катушки с током для создания (тороидального) магнитного поля. Вакуумную камеру заполняют смесью дейтерия и трития и с помощью индуктора в ней создают вихревое электрическое поле. Индуктор представляет собой первичную обмотку большого трансформатора, в котором камера токамака является вторичной обмоткой. Протекающий через плазму ток нагревает плазму (омический нагрев) и создает вокруг себя полоидальное магнитное поле, которое поле сжимает протекающий через плазму ток, и тем самым создается теплоизоляция нагретой плазмы от стенок тороидальной камеры.

Такая установка получила названия **токамак** (тороидальная камера с магнитными кольцами). В 1955 году была сконструирована первая такая установка в Институте Атомной Энергии им. И.В. Курчатова. После успехов в создании атомного и водородного оружия и для мирных целей АЭС задача осуществленная УТС не представлялась чрезмерно сложной. Скоро стало ясно, что не возможно решить задачу в скором будущем. Нужны планомерные исследования и большие материальные и интеллектуальные затраты с привлечением к сотрудничеству развитые страны. С 1956 года начался процесс рассекречивания программ по УТС. Теперь во многих странах мира построены исследовательские установки типа токамак. Теперь их в мире свыше 150 установок, самые крупные из них: Т-15 (Москва), JET (Англия), TFTR (США), JT-60 (Япония), ТОРУС-II (Франция).

По международному договору (МАГАТЭ) разработан проект с участием многих стран построить демонстрационный термоядерный реактор, не отличающийся от промышленного. Долго решался вопрос, где разместить эту установку - в Японии или во Франции, наконец, этот вопрос был решен в пользу Франции.

### **Вопросы для закрепления знаний**

- 1.1 Почему спонтанное деление ядер относят к разновидности радиоактивного деления?
- 1.2. Почему вынужденное деление относят к ядерным реакциям?
- 1.3. В капельной модели конкуренция сил поверхностного натяжения, удерживающие ядро от развала, и сил кулоновского от-

талкивания определяется параметром делимости, который имеет критическое значение  $Z^2 / A \approx 50$ . Оцените значение параметра делимости для реальных ядер, и оцените  $Z$  ядра, для которого достигается критическое значение параметра делимости.

**6.4.** Деление ядра возможно при захвате нейтрона с энергией  $E_n \leq E_f$ , большей энергии порога деления, которая определяется выражением  $E_f = E_{акт} - \varepsilon_{A+1}$ , где  $E_{акт}$  - энергия активации и  $\varepsilon_{A+1}$  - энергия связи составного ядра  ${}^{A+1}_Z X$ . Объясните это условие деления ядра.

**6.5.** Почему в процессе деления ядра выделяются мгновенные и запаздывающие нейтроны, а протоны не выделяются?

**6.6.** Что такое критическая масса и цепная реакция деления?

**6.7.** Как достигается управление процессом цепной реакции деления, и при каком значении коэффициента размножения нейтронов?

**6.8.** Атомный реактор состоит из следующих основных узлов: ТВЭЛы, замедлители, теплоноситель, поглотители, отражатели. Объясните их назначение.

**6.9.** Каким требованиям должен удовлетворять материал, используемый в качестве замедлителя нейтронов ядерном реакторе? Почему для этой цели часто используется тяжелая вода?

**6.10.** Какие преимущества атомных реакторов на быстрых нейтронах?

**6.11.** В чем заключается проблема управляемой термоядерной реакции?

**6.12.** Каков физический смысл критерия Лоусона  $nt > 10^{20}$ ?

**6.13.** Какие принципы работы токамака?

**6.14.** Какие преимущества управляемых термоядерных установок?

### Примеры решения задач

**Задача 5.1.** Какую кинетическую энергию имеют тепловые нейтроны, находящиеся в термодинамическом равновесии с окружающей средой, соответствующей нормальным условиям?

**Решение:** Частица, находящаяся в термодинамическом равновесии со средой при температуре  $T = 300^\circ \text{K}$ , имеет энергию

$$E = 3/2 \cdot kT = 1,5 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \text{ Дж} = 6,2 \cdot 10^{-21} / 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ эВ} = 0,04 \text{ эВ}$$

**Задача 5.2.** Найти максимальную часть кинетической энергии (в %), теряемую нейтроном при упругом соударении с покоящимся ядром: а) дейтерия  ${}^2_1\text{H}$ , б) бериллия  ${}^9_4\text{Be}$ , в) углерода  ${}^{12}_6\text{C}$  и г) урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$ ?

**Решение:** Выпишем законы сохранения импульса и кинетической энергии при лобовом столкновении нейтрона с покоящимся ядром массы  $m_A$ :

$$m\vec{v} = m\vec{v}' + m_A\vec{v}_A,$$

$$mv^2/2 = mv'^2/2 + m_A v_A^2/2.$$

Представим эти уравнения в виде:

$$m(\vec{v} - \vec{v}') = m_A \vec{v}_A \quad (1),$$

$$m(\vec{v} + \vec{v}')(\vec{v} - \vec{v}') = m_A v_A^2 \quad (2).$$

Из (1) и (2) имеем:

$$\vec{v} + \vec{v}' = \vec{v}_A \quad (3).$$

Умножим (3) на  $m$  и сложим с (1):

$$2m\vec{v} = (m + m_A)\vec{v}_A,$$

откуда

$$\vec{v}_A = 2m\vec{v}/(m + m_A).$$

Изменение энергии нейтрона при соударении  $\Delta E = E - E' = E_A$  или

$$\Delta E/E = m_A v_A^2 / 2E = 4mm_A / (m + m_A)^2.$$

Подставляя массы сталкивающихся частиц, получим:

- а)  $\Delta E/E = 88,9\%$ , б)  $\Delta E/E = 36\%$ ,  
 в)  $\Delta E/E = 28,4\%$ , г)  $\Delta E/E = 1,7\%$ .

**Задача 5.3.** Найти минимальную кинетическую энергию нейтрона, при которой в результате захвата его ядром  $^{238}\text{U}$  последует деление, если известно, что энергия активации образующегося ядра составляет около  $E_{\text{акт}} = 7 \text{ МэВ}$ . Указание: дефекты масс равны:  $\Delta(238,92) = 47,305 \text{ МэВ}$ ,  $\Delta(239,92) = 50,570 \text{ МэВ}$ ,  $\Delta(1,0) = 8,071 \text{ МэВ}$ .

**Решение:** При захвате нейтрона ядром образуется составное ядро:

$n + {}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{239}_{92}\text{U}^*$ . Энергия отделения нейтрона из ядра  ${}^{239}\text{U}$

равна  $\epsilon_{A+1} = (47,305 + 8,071) - 50,570 = 4,81 \text{ МэВ}$ .

Энергия возбуждения ядра складывается из энергий  $E_{\text{воз}} = E_n + \epsilon_{A+1}$ . Условие вынужденного деления ядра  $E_{\text{воз}} \geq E_{\text{акт}}$ . Откуда имеем

$$E_n \geq E_{\text{акт}} - \epsilon_{A+1} = 7 - 4,81 = 2,19 \text{ МэВ},$$

т.е. при энергии быстрых нейтронов происходит деление  ${}^{238}\text{U}$ .

**Задача 5.4.** Ядро атома урана  ${}^{235}\text{U}$  испытывает деление при захвате теплового нейтрона. Считая для простоты, что ядро распадается на два одинаковых осколка, которые в момент деления находились на расстоянии  $r = 1,6 \cdot 10^{-14} \text{ м}$  друг от друга, а затем разлетаются под влиянием электростатического отталкивания, оценить освобождающуюся энергию на один акт деления.

**Решение:** Энергия кулоновского отталкивания осколков равна

$$E = (1/4\pi\epsilon_0) \cdot Z_1 Z_2 e^2 / r = 9 \cdot 10^9 \cdot (46)^2 (1,6 \cdot 10^{-19})^2 / 1,6 \cdot 10^{-14} = \\ = 3 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = 3 \cdot 10^{-11} / 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ эВ} = 1,9 \cdot 10^8 \text{ эВ} = 190 \text{ МэВ}.$$

**Задача 5.5.** Тепловая мощность реактора на атомном реакторе равна 90 МВт. Сколько урана будет израсходовано за год непрерывной работы на силовой установке ледокола, состоящей из трех таких реакторов? Сколько каменного угля потребовалось бы для получения такой же энергии?

**Решение:** Мощность ледокола

$$P = 3 \times 90 \text{ МВт} = 270 \text{ МВт} = 2,7 \cdot 10^8 \text{ Дж/с.}$$

За 1 год расходуется энергии

$$E = P \times 365 \times 24 \times 3600 = 8,5 \cdot 10^{15} \text{ Дж.}$$

При делении одного атома урана  $^{235}\text{U}$  выделяется энергия

$$E_{\text{вых}} = 200 \text{ МэВ} = 2 \cdot 10^8 \times 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж.}$$

Следовательно, для получения такой энергии необходимо число атомов

$$n = E / E_{\text{вых}} \quad (1).$$

С другой стороны такое число атомов находится в  $m$  массе

$$n = N_A m / A \quad (2).$$

Приравнявая (1) и (2), получим

$$m = AE / (N_A E_{\text{вых}}) = 235 \cdot 8,5 \cdot 10^{15} / (3,2 \cdot 10^{-11} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}) = 104 \cdot 10^3 \text{ г} = 104 \text{ кг.}$$

Удельная теплота сгорания каменного угля  $q = 2,6 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг.}$   
Следовательно, необходимо каменного угля

$$m = E / q = 8,5 \cdot 10^{15} / 2,6 \cdot 10^7 \text{ кг} = 3,3 \cdot 10^8 \text{ кг.}$$

**Задача 5.6.** Образец из природного урана облучается потоком тепловых нейтронов интенсивностью  $J = 10^{10} \text{ н/см}^2\text{с}$ . Определить тепловую мощность, выделяемую  $1 \text{ см}^3$  образца в результате деления ядер урана  $^{235}\text{U}$ , эффективное сечение которых составляет  $\sigma = 590 \text{ барн}$ .

**Решение:** При каждом делении ядра  $^{235}\text{U}$  выделяется энергии

$$E_{\text{вых}} = 200 \text{ МэВ} = 2 \cdot 10^8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ Дж.}$$

Число ядер, вступивших в реакцию равно  $N = \sigma J n$ , а ядер  $^{235}\text{U}$  находится в естественной смеси в соотношении  $0,7\% = 7 \cdot 10^{-3}$ .

В объеме  $1 \text{ см}^3$  смеси их находится  $n = 7 \cdot 10^{-3} \cdot \rho N_A / A$ , где  $\rho = 19,7 \text{ г/см}^3$  - плотность урана. Число вступивших в реакцию

$$\text{ядер равно } N = 7 \cdot 10^{-3} \sigma J \rho N_A / A =$$

$= 7 \cdot 10^{-3} \cdot 590 \cdot 10^{-24} \cdot 10^{10} \cdot 19,7 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} / 238 = 19,7 \cdot 10^8 \text{ п / см}^3 \text{ с}$ .  
 Следовательно, единица объема образца выделяет энергию

$$w = E_{\text{вых}} \cdot N = 3,2 \cdot 10^{-11} \cdot 19,7 \cdot 10^8 = 0,063 \text{ Вт / см}^3.$$

### Задание для самостоятельной работы

**Задача 5.7.** Советские физики К.А. Петржак и Г.Н. Флеров экспериментально обнаружили, что, кроме  $\alpha$  - распада, ядра  $^{235}\text{U}$  испытывают спонтанное деление. Найти отношение активностей  $I_\alpha / I_f$  обоих процессов, если известно, что период  $\alpha$  - распада  $^{235}\text{U}$  равен  $T_{1/2\alpha} = 8,5 \cdot 110^8 \text{ лет}$ , а среднее время жизни данных ядер для спонтанного деления составляет  $\tau = 3 \cdot 10^{17} \text{ лет}$ .

**Ответ:**  $I_\alpha / I_f = \ln 2 \cdot \tau_f / T_{1/2\alpha} = 2,5 \cdot 10^8$ .

**Задача 5.8.** При захвате теплового нейтрона ядром  $^{235}\text{U}$  и последующего деления возникает два осколка и два нейтрона. Оценить величину энергии, освобождаемой при данном процессе, если энергия связи на один нуклон в делящемся ядре составляет  $7,8 \text{ МэВ}$ , а в осколках деления - по  $8,6 \text{ МэВ}$ .

**Ответ:**  $Q = 171,6 \text{ МэВ}$ .

**Задача 5.9.** Энергия возбуждения, необходимая для деления ядра, возникающего при захвате нейтрона ядром  $^{235}\text{U}$ , должна быть не меньше  $E_{\text{акт}} = 6,2 \text{ МэВ}$ . Будет ли сопровождаться делением захват ядром  $^{235}\text{U}$  теплового нейтрона? (Указание: дефекты масс равны:  $\Delta(235,92) = 40,915 \text{ МэВ}$  и  $\Delta(236,92) = 42,441 \text{ МэВ}$ ).

**Ответ:** Да, произойдет деление ядра, так как энергия возбуждения делящегося ядра  $^{236}\text{U}$  равна

$$E_{\text{возб}} = E_n + \epsilon_{235+1} = 7 \text{ МэВ} > E_{\text{акт}}.$$

**Задача 5.10.** Определить количество нейтронов, генерируемых в  $1 \text{ с}$  в реакторе мощностью  $P = 10 \text{ МВт}$ , считая, что при каждом делении освобождается  $200 \text{ МэВ}$  энергии и выделяется  $2,47$  нейтрона в среднем.



**Ответ:**  $7,7 \cdot 10^{17}$  нейтронов/с.

**Задача 5.11.** Вычислить суточный расход урана  $^{235}\text{U}$  в ядерном реакторе с тепловой мощностью  $3 \text{ ГВт}$ . Сколько нефти потребовалось бы сжигать в сутки для получения такой же мощности?

*Указание:* удельная теплота сгорания жидкого углеводородного топлива  $d_{\text{H}} = 42000 \text{ кДж/кг}$ .

**Ответ:** 3,16 кг, 6100 т.

**Задача 5.12.** Для осуществления реакции синтеза

$^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + n + Q$  необходимо ядрам дейтрона и трития преодолеть кулоновский барьер между ними. Определить кинетическую энергию этих ядер, необходимую для преодоления этого барьера. До какой температуры необходимо нагреть смесь дейтерия и трития для осуществления реакции синтеза?

**Ответ:**  $E \approx 0,4 \text{ МэВ}$ ,  $T \approx 2 \cdot 10^9 \text{ К}$ .

## Глава 6. Взаимодействие излучения с веществом

### 6.1. Прохождение ионизирующих излучений через вещество. Проникающая способность излучения

Общая картина прохождения частиц высокой энергии через вещество крайне сложна. Но при прохождении заряженных частиц через вещество основную роль играют электромагнитные взаимодействия из-за их дальнего действующего характера, а также из-за того, что электронов в веществе гораздо больше ядер. Ядерные процессы преобладают только для не обладающих электрическим зарядом нейтронов во взаимодействиях с веществом. По механизму прохождения через вещество частицы можно разбить на следующие группы: тяжелые заряженные частицы, легкие заряженные частицы (электроны и позитроны),  $\gamma$ -кванты и нейтроны.

Тяжелая заряженная частица ( $\alpha$ -частица) массы  $M$  и высокой энергии взаимодействует с электрическими полями электронов и атомных ядер. Они либо **ионизируют**, либо **возбуждают атомы**. Осуществляется также и чисто ядерное взаимодействие частицы с атомным ядром. Но основные потери энергии заряженной частицы происходит за счет **ионизационных потерь**, которые характеризуются величиной  $-dE/dx$  - средней потерей энергии на единицу пути. Так как электромагнитные явления хорошо изучены, то теория позволяет рассчитать ионизационные потери заряженной частицы в среде. Первые такие расчеты были выполнены Н. Бором, а затем Бете и Блох в рамках более последовательной квантовой теории. Зная величину  $-dE/dx$ , то можно определить потери энергии частицы:

$$dE = -\frac{dE}{dx} dx, \quad (6.1)$$

откуда и расстояние, пройденное частицей до остановки в веществе

$$R = \int_{E_0}^0 \frac{dE}{-dE/dx}, \quad (6.2)$$

где  $E_0$  - начальная энергия частицы. Вычисление интеграла для величины  $R$ , называемой **пробегом**, приводит

$$R = \frac{M}{Z^2} f(\vartheta), \quad (6.3)$$

где  $f(v)$  - функция, зависящая от свойств среды. Таким образом, пробег заряженной частицы зависит от заряда частицы, её массы, начальной скорости, от плотности среды и её химического состава.

Механизм прохождения легкой заряженной частицы (электронов и позитронов) через вещество несколько отличается. Если в случае тяжелых частиц интенсивность пучка остается постоянной и в конце пробега  $R$  резко обрывается, то в случае пучка из легких частиц интенсивность пучка убывает плавно, непрерывно выбывают частицы из пучка. В этом случае говорят о **максимальном пробеге**, когда все частицы выбывают из пучка. Второе отличие в том, что электроны при торможении излучают, т.е. кроме ионизационных потерь появляются **радиационные потери** энергии легкой частицы.

Радиационные потери линейно растут с энергией, тогда как ионизационные потери от энергии практически не зависят. При очень высоких энергиях ионизационными потерями можно пренебречь. В этом пределе энергия пучка убывает по экспоненциальному закону с глубиной  $x$  проникновения в вещество:

$$E = E_0 e^{-x/l_r}, \quad (6.4)$$

где  $l_r$  - **радиационная длина пробега**, определяемая выражением

$$-(dE/dx)_{\text{рад}} = E/l_r. \quad (6.5)$$

В табл.6.1 сравниваются пробеги заряженных частиц в различных веществах.

Табл. 6.1. Пробег заряженных частиц в различных веществах

| Заряженная частица | Энергия $E$ (МэВ) | Воздух<br>см | Биологические<br>ткани см | Al<br>см |
|--------------------|-------------------|--------------|---------------------------|----------|
| β- частица         | 0.5               | 22           | 0.02                      | 0.008    |
|                    | 1.7               | 610          | 0.92                      | 0.01     |
| α- частица         | 5.5               | 4            | 0.005                     | -        |

Как видно, пробег тяжелых частиц в плотных веществах весьма мал. Поэтому при внешнем облучении плотная одежда поглощает значительную часть  $\beta$ - и полностью  $\alpha$ -частицы, но при попадании внутрь организма они причиняют серьезный вред.

Совсем другие процессы наблюдаются при прохождении  $\gamma$ -квантов через вещество. Для  $\gamma$ -квантов не существует понятий пробега, максимального пробега, потерь энергии на единицу длины. При прохождении пучка  $\gamma$ -квантов через вещество их энергия не меняется, но в результате столкновений постепенно ослабляется интенсивность  $\gamma$ -пучка:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}, \quad (6.6)$$

где  $I_0$  - начальная интенсивность. Величина  $\mu$  называется коэффициентом поглощения. Часто пользуются понятием массового коэффициента поглощения, равного  $\mu/\rho$  где  $\rho$  — плотность вещества. В этом случае толщину удобно измерять в единицах  $г/см^2$ . Коэффициент поглощения полностью характеризует процесс прохождения  $\gamma$ -излучения через вещество, так как зависит и от свойств среды и от энергии квантов. Таким образом,  $\gamma$ -кванты выбывают из пучка в результате отдельных столкновений с электронами или с атомными ядрами вещества. При этих столкновениях происходят следующие процессы: фотоэффект, комптон-эффект и при высоких энергиях - рождение электрон-позитронных пар в кулоновском поле ядра.

Фотоэффект — процесс выбивания  $\gamma$ -квантом электрона из электронной оболочки атома, наиболее интенсивно наблюдается для  $\gamma$ -квантов с энергиями  $E$ , сравнимыми с энергиями связи электронов в атомах. С увеличением энергии квантов фотоэлектрическое поглощение отходит на задний план, уступая место комптон-эффекту. При комптон-эффекте  $\gamma$ -кванты рассеиваются на свободных электронах, которые получают энергию отдачи, и таким образом теряется энергия  $\gamma$ -квантов.

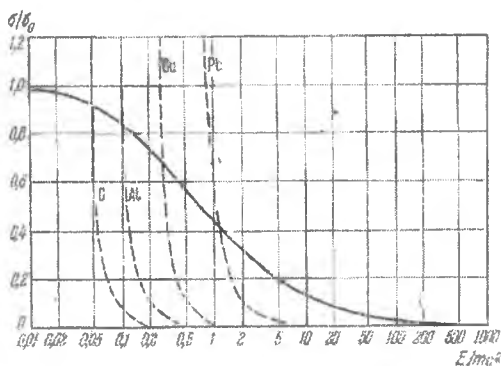


Рис. 6.1. Полные сечения комптон-эффекта (сплошная линия) и фотоэффекта (пунктирные линии) для различных веществ.

Процесс рождения электрон-позитронных пар в поле ядра состоит в том, что квант поглощается, а рождаются и вылетают электрон и позитрон.

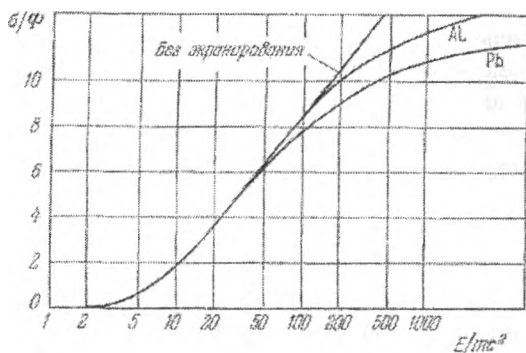


Рис.6.2. Зависимость эффективного сечения рождения пар на свинце и алюминии от энергии  $E$   $\gamma$ -кванта.

Нейтроны из-за своей электрической нейтральности не взаимодействуют с электронами атомных оболочек, а при столкновении с ядрами атомов легко поглощаются ими, вызывая ядерные реакции, или рассеиваются на них, замедляя свою скорость. В результате этого интенсивность нейтронного потока, проходя сквозь вещество, убывает в целом по такому же

закону (6.6), как в случае поглощения  $\gamma$ -излучения. Поглощение нейтронов ядрами сильно зависит от энергии нейтронов, медленные нейтроны ( $E < 1 \text{кэВ}$ ) сильно взаимодействуют с ядрами, а для быстрых нейтронов это взаимодействие значительно слабее. Отличаются нейтроны резонансной области ( $0,5 \text{эВ} < E < 1 \text{кэВ}$ ), сечения реакций которых в зависимости от энергии нейтронов проявляют густой частокол острых резонансов. А процесс замедления нейтронов тем эффективнее, чем легче ядра замедлителя.

Табл. 6.2. Слой половинного ослабления излучений

| Вещество | $\gamma$ -излучения см | Нейтронное излучение см |
|----------|------------------------|-------------------------|
| Вода     | 23                     | 3                       |
| Бетон    | 10                     | 12                      |
| Свинец   | 2                      | 9                       |
| Сталь    | 3                      | 5                       |

## 6.2 Единицы измерения поглощенной дозы

Падающее на вещество ионизирующее излучение теряет свою энергию, передав ее веществу. Мерой воздействия излучения на вещество является **поглощенная доза излучения**, которая определяется энергией, переданной единице массы вещества:

$$D = E_{\text{изл}} / m. \quad (6.7)$$

В СИ за единицу дозы поглощенного излучения принят **грей** (Гр): 1 Гр равен поглощенной дозе излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж:

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ кг}. \quad (6.8)$$

Отношение поглощенной дозы ко времени облучения называют **мощностью дозы излучения**:

$$\dot{D} = D / t. \quad (6.9)$$

Единица мощности поглощенной дозы в СИ - **грей в секунду** (Гр/с). Физическое воздействие излучения на вещество



**Рентген Вильгельм Конрад (1845-1923)** - немецкий физик, родился в Леннепе, окончил Цюрихский политехнический ин-т (1868), работал в ряде ун-тов Германии: в Вюрцбургском, Страсбургском, в Гиссене, Вюрцбургском, Мюнхенском. Исследовал свойства жидкостей, газов, открыл взаимосвязь электрических и оптических явлений в кристаллах. В 1895 г. открыл X-лучи, исследовал их свойства (Нобелевская премия, 1901).

связано основном с ионизацией атомов и молекул.

Количественной мерой действия излучения служит **экспозиционная доза**, которая характеризует ионизирующее действие излучения на воздух. **Экспозиционной дозой излучения** называют величину, равную отношению суммарного заряда одного знака, образованного излучением в некотором объеме воздуха, к массе воздуха в этом объеме:

$$X = q / m. \quad (6.10)$$

В СИ единицей экспозиционной дозы является **кулон на килограмм (Кл/кг)**. Экспозиционная доза в 1 Кл/кг равен такой дозе, при которой в сухом атмосферном воздухе в 1 кг создаются ионы, несущие электрический заряд каждого знака, равный 1 Кл. До сих пор употребляется внесистемная единица экспозиционной дозы – **рентген (Р)**:

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}. \quad (6.11)$$

При экспозиционной дозе 1 Р в 1 см<sup>3</sup> сухого воздуха при нормальном давлении образуется около 2·10<sup>9</sup> пар ионов. Такая доза накапливается за 1 час на расстоянии 1 м от радиоактивного препарата радия <sup>226</sup>Ra массой 1 г, имеющего активность I<sub>0</sub> = 1 Ки. При облучении мягких тканей человеческого организма γ-излучением поглощенная доза 1 Гр примерно равна 100 Р.

При облучении живых организмов поражающее действие излучения при одной и той же поглощенной дозе зависит от вида излучения. Поэтому вводят **коэффициент относительной биологической эффективности k**, показывающий, во сколько раз поражающее действие данного вида излучения выше, чем рентге-

новского, при одинаковой дозе поглощенного излучения. В табл. 6.3 приведены значения коэффициента  $k$  для разных видов излучений. Поглощенная доза, умноженная на коэффициент относительной биологической эффективности  $k$ , характеризует биологическое действие поглощенной дозы и называется **эквивалентной дозой  $H$** :

$$H = k \cdot D. \quad (6.12)$$

Единицей эквивалентной дозы в СИ является **зиверт (Зв)**. Доза в 1 Зв равен эквивалентной дозе, при которой поглощенная доза равна 1 Гр и  $k=1$ . Но часто еще пользуются внесистемной единицей эквивалентной дозы **бэр (биологический эквивалент рентгена)**:  $1\text{Зв} \approx 100\text{бэр}$ .

Табл.6.3. Коэффициент  $k$  относительной эффективности излучений

| Типы излучений       | $k$ | Типы излучений     | $k$ |
|----------------------|-----|--------------------|-----|
| $\gamma$ - излучение | 1   | быстрые $n$        | 10  |
| $\beta$ - излучение  | 1   | $\alpha$ - частица | 10  |
| медленные $n$        | 5   | протоны            | 10  |

Для расчета защиты от ионизирующих излучений установлена **предельно допустимая доза (ПДД)**, облучение которой безвредно для здоровья. При установлении предельно допустимой дозы исходят из того, что в естественных условиях облучение человека за счет космических лучей и радиоактивности веществ земной коры составляет примерно 0,1 бэр в год и абсолютно безвредно. Предельно допустимая доза (ПДД) облучения для лиц, профессионально занимающихся использованием радиационных источников, определена доза, равная  $H = 50\text{ мЗв}$  в год. А для населения, подвергающегося систематическому облучению, в качестве предельно допустимой дозы установлена эквивалентная доза, равная  $0,1 \cdot ПДД = 5\text{ мЗв}$  в год.



### 6.3. Источники радиации. Биологическое действие радиации

Жизнь с появления на Земле находится в условиях постоянного воздействия радиации. Человек постоянно подвергался и продолжает подвергаться внешнему и внутреннему облучению.

Источниками облучения являются естественный радиационный фон Земли и искусственный радиационный фон – результат деятельности самого человека.

Естественный радиационный фон представляет собой ионизирующие излучения природных источников космического и земного происхождения. Космические излучения представляют собой поток протонов (92%), ядер гелия, ядер лития и других элементов. Это первичное космическое излучение взаимодействует с атомами и молекулами атмосферы, образуя вторичное космическое излучение, состоящее в основном из электронов, нейтронов, мезонов и  $\gamma$ -квантов. Интенсивность излучения зависит от географической широты и высоты от уровня над морем. В атмосфере и биосфере в результате ядерных реакций под действием космических лучей постоянно образуются радионуклиды. Из 20 таких радионуклидов наиболее значимы  $^{14}\text{C}$  ( $T_{1/2} = 5730$  лет) и  $^3\text{H}$  ( $T_{1/2} = 12,35$  лет).

Земная радиация обусловлена естественными радионуклидами, которые содержатся в земной коре. Из нераспавшихся к настоящему времени сохранились 23 радионуклида. Сроки их жизни сопоставимы с возрастом Земли. Наибольшее значение имеют радионуклиды:  $^{40}\text{K}$  и семейства урана, тория и актиния. По мере распада последних образуется еще 40 радионуклидов.

Технологически измененный естественный радиационный фон представляет собой ионизирующие излучения природных источников, претерпевших изменения в результате деятельности человека. Радионуклиды поступают на земную поверхность вместе с извлекаемыми полезными ископаемыми, продуктами сжигания органического топлива. Они содержатся в строительных материалах, воздухе, воде, продуктах питания.

Искусственный радиационный фон Земли обусловлен в основном продуктами деления урана и плутония при испытаниях ядер-

ного оружия и выбросами радионуклидов АЭС при работе атомных реакторов.

Среднегодовые дозы, получаемые от естественного радиационного фона и различных искусственных источников излучения, приводятся в табл. 6.4.

Табл.6.4. Среднегодовые дозы от источников излучения

| Источник излучения            | Доза (мбэр/год)     |
|-------------------------------|---------------------|
| Естественный радиационный фон | 200 (23 мк бэр/час) |
| Стройматериалы                | 140                 |
| Атомная энергетика            | 0.2                 |
| Медицинские исследования      | 140                 |
| Ядерные испытания             | 2.5                 |
| Полеты в самолетах            | 0.5                 |
| Бытовые предметы              | 4                   |
| Телевизоры и мониторы ЭВМ     | 0.1                 |
| Общая доза                    | 500                 |

Как следует из таблицы, что радиация, связанная с нормальным состоянием ядерной энергетике, составляет лишь малую долю радиации, порождаемой деятельностью человека. Большие дозы радиации мы получаем от других источников, вызывающих меньше нареканий. Большой и возрастающий вклад в облучение человека вносит применение рентгеновских лучей в медицине для диагностики заболеваний, ядерная терапия злокачественных новообразований и вся ядерная медицина. К значительному увеличению уровня облучения приводит постоянное пребывание в закрытых помещениях из-за испускаемого строительными материалами радиоактивного газа радона.

В основе биологического действия ионизирующего излучения лежат процессы ионизации и возбуждения атомов и молекул в тканях человека. Эффект зависит от величины поглощенной дозы, ее мощности, вида излучения, радиочувствительности, физиологического состояния организма и действия многих других факторов.

Можно выделить четыре фазы в биологическом процессе воздействия радиации. Первая, физическая фаза ионизации и возбу-

ждения атомов длится  $10^{-13}$  с. Во второй, химико-физической фазе, протекающей  $10^{-10}$  с, образуются высокоактивные в химическом отношении радикалы, которые, взаимодействуя с различными соединениями, дают начало вторичным радикалам, имеющим значительно большие по сравнению с первичными сроки жизни. В третьей, химической фазе, длящейся  $10^{-6}$  с, образовавшиеся радикалы, вступают в реакции с органическими молекулами клеток, что приводит к изменению биологических свойств молекул.

Описанные процессы первых трех фаз являются первичными, но они определяют дальнейшее развитие лучевого поражения. В следующей четвертой, биологической фазе химические изменения молекул преобразуются в клеточные изменения. Наиболее чувствительным к облучению является ядро клетки, наибольшие последствия вызывает повреждение ДНК, содержащей наследственную информацию. В результате облучения в зависимости от величины поглощенной дозы клетка гибнет или становится неполноценной в функциональном отношении. Время протекания четвертой фазы очень различно и в зависимости от условий может растянуться на годы или даже на всю жизнь.

Различные виды излучений характеризуются различной биологической эффективностью, что связано с отличиями в их проникающей способности и характером передачи энергии органам и тканям живого объекта, состоящего в основном из легких элементов.

Альфа-излучение имеет малую длину пробега частиц и характеризуется слабой проникающей способностью. Оно не может проникнуть сквозь кожные покровы. Пробег альфа-частиц с энергией 4 Мэв в воздухе составляет 2.5 см, а в биологической ткани лишь 31 мкм. Альфа-излучающие нуклиды представляют большую опасность при поступлении внутрь организма через органы дыхания и пищеварения

Бета-излучение обладает большей проникающей способностью. Пробег бета-частиц в воздухе может достигать нескольких метров, а в биологической ткани нескольких сантиметров. Так пробег электронов с энергией 4 Мэв в воздухе составляет 17.8 м, а в биологической ткани 2.6 см.

Гамма-излучение имеет еще более высокую проникающую способность. Под его действием происходит облучение всего организма.

Биологический эффект от действия тепловых нейтронов в основном обусловлен продуктами ядерных реакций  $\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$  и  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ , в результате которых образуются радиоактивные элементы: тритий и углерод-14. А образующиеся в реакции (n,p) протоны усиливают воздействие на биологическую ткань, теряя всю свою энергию в месте рождения

Зависимость тяжести нарушения от величины дозы облучения показана в табл. 6.5.

Табл.6.5. Воздействие различных доз облучения на человеческий организм

| Доза, Гр               | Причина и результат воздействия  |
|------------------------|--|
| (0.7 - 2)<br>$10^{-3}$ | Доза от естественных источников в год  |
| 0.05                   | Предельно допустимая доза профессионального облучения в год  |
| 0.1                    | Уровень удвоения вероятности генных мутаций  |
| >0.25                  | Однократная доза оправданного риска в чрезвычайных обстоятельствах   |
| >1.0                   | Доза возникновения острой лучевой болезни  |
| >3- 5                  | Без лечения 50% облученных умирает в течение 1-2 месяцев вследствие нарушения деятельности клеток костного мозга |
| >10 - 50               | Смерть вследствие поражений главным образом желудочно-кишечного тракта   |
| >100                   | Смерть наступает через несколько часов или дней вследствие повреждения центральной нервной системы               |

Как было заявлено, воздействие радиации на ткани живого организма происходит, в основном, через ионизацию атомов и молекул, хотя энергия радиации совсем незначительна. При облучении человека смертельной дозой  $\gamma$ -излучения, равной  $6 \text{ Гр}$ , в его организме выделяется энергия, равная

$$E = mD = 70 \text{ кг} \cdot 6 \text{ Гр} = 420 \text{ Дж}.$$

Такая энергия передается организму человека одной чайной ложкой горячего чая. Естественно, тепловое воздействие ионизирующей радиации не является причиной гибели человека, основная причина обусловлена химическими процессами, происходящими в живых клетках.

При облучении небольшой части тела доза, даже превышающая смертельную, может оказать сравнительно слабое действие на состояние организма в целом. Действие одной и той же дозы облучения заметно зависит от того, за какой промежуток времени эта доза получена. Если облучение сильно растянут по времени, то общее поражающее действие будет меньшим, чем при однократном облучении суммарной дозой

Радионуклиды накапливаются в органах неравномерно. В процессе обмена веществ в организме человека они замещают атомы стабильных элементов в различных структурах клеток, биологически активных соединениях, что приводит к высоким локальным дозам. При распаде радионуклида образуются изотопы химических элементов, принадлежащие соседним группам периодической системы, что может привести к разрыву химических связей и перестройке молекул. Эффект радиационного воздействия может проявиться совсем не в том месте, которое подвергалось облучению. Превышение дозы радиации может привести к угнетению иммунной системы организма и сделать его восприимчивым к различным заболеваниям. При облучении повышается также вероятность появления злокачественных опухолей.

Наиболее интенсивно облучаются органы, через которые поступили радионуклиды в организм (органы дыхания и пищеварения), а также щитовидная железа и печень. Дозы, поглощенные в них, на 1-3 порядка выше, чем в других органах и тканях. По способности концентрировать всосавшиеся продукты деления основные органы можно расположить в следующий ряд:

щитовидная железа > печень > скелет > мышцы.

Так, в щитовидной железе накапливается до 30% всосавшихся продуктов деления, преимущественно радиоизотопов йода. По концентрации радионуклидов на втором месте после щитовидной железы находится печень. Доза облучения, полученная этим органом, преимущественно обусловлена радионуклидами  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{La}$ .

Среди техногенных радионуклидов особого внимания заслуживают **изотопы йода**. Они обладают высокой химической активностью, способны интенсивно включаться в биологический круговорот и мигрировать по биологическим цепям, одним из звеньев которых может быть человек.

Основным начальным звеном многих пищевых цепей является загрязнение поверхности почвы и растений. Продукты питания животного происхождения - один из основных источников попадания радионуклидов к человеку.

Исследования, охватившие примерно 100000 человек, переживших атомные бомбардировки Хиросимы и Нагасаки, показывают, что рак - наиболее серьезное последствие облучения человека при малых дозах. Первыми среди раковых заболеваний, поражающих население, стоят лейкозы.

Распространенными видами рака под действием радиации являются рак молочной железы и рак щитовидной железы. Обе эти разновидности рака излечимы и оценки ООН показывают, что в случае рака щитовидной железы летальный исход наблюдается у одного человека из тысячи, облученных при индивидуальной поглощенной дозе один Грей.

#### 6.4. Стохастические эффекты малых доз радиаций

Острые лучевые поражения при внешнем облучении хорошо исследованы в наблюдениях над облученными больными и на опытах над животными.

Эффекты воздействия радиации на человека обычно делятся на две категории:

1) **Соматические** (телесные) - возникающие в организме человека, который подвергался облучению.

2) **Генетические** - связанные с повреждением генетического аппарата и проявляющиеся в следующем или последующих по-

колениях: это дети, внуки и более отдаленные потомки человека, подвергшегося облучению.

Соматическими последствиями радиации являются лучевая болезнь, локальные лучевые поражения, лейкозы, опухоли разных органов, а к генетическим последствиям относят генные мутации и хромосомные нарушения.

Последствия облучения могут проявиться в форме **детерминированных и стохастических** эффектов. Первые развиваются лишь после гибели критического числа функциональных клеток в организме и тканях, т.е. имеют порог. Потеря даже значительного числа клеток не оказывает заметного вредного воздействия на большинство органов и тканей организма. Величина порога зависит от радиочувствительности органа и для отдельных органов существенно различается. Повышенной радиочувствительностью отличается красный костный мозг, семенники, хрусталик глаза и особенно зародыш и плод. Тяжесть поражения зависит от поглощенной дозы, мощности дозы, вида излучения и физиологического состояния организма.

При неравномерном облучении тяжесть болезни меньшая. Хроническое облучение слабее действует на живой организм по сравнению с однократным облучением в той же дозе, что связано с постоянно идущими процессами восстановления радиационных повреждений. Считается, что примерно 90% радиационных повреждений восстанавливается. При облучении с низкой мощностью защитные механизмы организма могут обеспечить гомеостаз организма в течение длительного времени и даже в течение всей жизни (облучение от естественного фона).

Наиболее сложной радиобиологической проблемой остается оценка малых доз радиации. Если поврежденная клетка не погибает, то повреждение восстанавливается. В случае неполноценного восстановления оставшиеся изменения в клетке могут передаваться дочерним клеткам и в конечном счете привести к развитию рака. Риск повышается с увеличением дозы облучения. Такие эффекты называются стохастическими (вероятностными).

Стохастические эффекты, такие как злокачественные новообразования, генетические нарушения, могут возникать при любых дозах облучения. С увеличением дозы повышается не тяжесть этих эффектов, а вероятность (риск) их появления. Для количест-

венной оценки частоты возможных стохастических эффектов принята консервативная гипотеза о линейной беспороговой зависимости вероятности отдаленных последствий от дозы облучения с коэффициентом риска около  $7 \cdot 10^{-2} / \text{Зв}$ .

Убедительных экспериментальных данных о справедливости такой зависимости нет. Мутации в ДНК под воздействием внешней среды происходит постоянно. Большинство мутаций либо нейтральны, либо полезны, а вредные отсеиваются в каждом поколении под действием естественного отбора. В процессе эволюции у человека выработались и генетически закрепились защитные свойства от разных вредных факторов, в том числе и от радиации. Есть основания считать, что и для стохастических эффектов существует порог. Речь может идти о его величине.

Данные по **генетическим последствиям облучения** весьма неопределенны. Ионизирующее излучение может порождать жизнеспособные клетки, которые будут передавать то или иное изменение из поколения в поколение. Однако анализ этот затруднен, так как примерно 10% всех новорожденных имеют те или иные генетические дефекты и трудно выделить случаи, обусловленные действием радиации.

В последние десятилетия процессы взаимодействия ионизирующих излучений с тканями человеческого организма были детально исследованы. В результате выработаны **нормы радиационной безопасности**, отражающие действительную роль ионизирующих излучений с точки зрения их вреда для здоровья человека. При этом необходимо помнить, что норматив всегда является результатом компромисса между риском и выгодой.

В заключение отметим, что знание свойств радиации и ее воздействия позволяет свести к минимуму связанный с ее использованием риск и по достоинству оценить те огромные блага, которые приносит человеку применение достижений ядерной физики в различных сферах.

## **Вопросы для закрепления знаний**

1. Энергия заряженных частиц при прохождении через вещество уменьшается, затрачиваясь на следующие процессы:

а) возбуждение атомов вещества,



- б) ионизация атомов,
  - в) тормозное излучение - рентгеновское излучение,
  - г) упругое и неупругое рассеяние частиц на ядрах среды.
- Поясните, как это происходит.

2. Проникающая способность заряженных частиц определяется толщиной слоя вещества, называемой пробегом  $R$ . Приведите значения пробега  $R$  для  $\alpha$ - и  $\beta$ - частиц в следующих средах: в воздухе, в воде, в бетоне и в железе.

3. Почему пробеги  $R$   $\alpha$ - и  $\beta$ - частиц не велики? Следует ли отсюда, что их воздействие на организм не велико?

4. Основными видами взаимодействия  $\gamma$ - квантов с веществом являются:

- а) фотоэффект,
- б) комптоновское рассеяние,
- в) образование электрон-позитронных пар.

Поясните, при каких энергиях  $\gamma$ - квантов преобладает тот или иной эффект.

5. Интенсивность пучка  $\gamma$ - квантов и нейтронов при прохождении через вещество убывает с расстоянием  $x$  по экспоненциальному закону  $I(x) = I_0 e^{-\mu x}$ , где  $\mu$ - линейный коэффициент поглощения  $\gamma$ - квантов. Обычно в таблицах приводится значение толщины слоя вещества, при прохождении которого интенсивность  $\gamma$ - квантов убывает в 2 раза. Значение слоя половинного ослабления  $\gamma$ - излучения с энергией 5 МэВ для воды равен 22 см, для бетона – 10 см, для свинца – 1,3 см.

Определить слой этих материалов, поглощающий интенсивность излучения в 1024 раз.

6. Какое излучение обладает наибольшей проникающей способностью?

7. Какие материалы можно применять для защиты от различных видов излучения?

8. Мерой воздействия излучения на вещество является поглощенная доза излучения. Как она определяется и в каких единицах измеряется?

9. Что такое мощность дозы излучения, и в каких единицах она измеряется?

10. Биологическое влияние различных видов излучения на организм животных и растений неодинаково при одинаковой поглощенной дозе излучения. Различие биологического действия различных излучений характеризуется коэффициентом относительной биологической эффективности  $k$ .

Приведите значения этого коэффициента  $k$  для рентгеновского и  $\gamma$ -излучения, для медленных и быстрых нейтронов, для  $\alpha$ -частиц с разной энергией.

11. Что такое эквивалентная доза, и в каких единицах она измеряется?

12. Какими процессами обусловлено биологическое действие радиационных излучений на живой организм?

13. Какое значение имеет естественный радиационный фон?

14. При облучении человека смертельная доза  $\gamma$ -излучения равна 6 Гр. Какую энергию при этом получает человек с массой 70 кг? Выразите эту энергию в Дж и кал.

### Примеры решения задач

**Задача 6.1.** Допустимая доза общего облучения человека, работающего с  $\gamma$ -излучением или  $\beta$ -частицами, составляет ПДД = 0,05 Гр/год. Какова допустимая мощность дозы общего облучения при условии непрерывного действия излучения на человека круглосуточно в течение всего года?

**Решение:** Мощность дозы излучения

$$D = 0,05 \text{ Гр/год} = 0,05 \text{ Гр} / 365 \cdot 24 \text{ ч} = 5,7 \cdot 10^{-6} \text{ Гр/ч} = 5,7 \text{ мкГр/ч}$$

**Задача 6.2.** После аварии на Чернобыльской АЭС в некоторых местах до сих пор регистрируется  $\gamma$ -излучение с мощностью дозы  $D = 160 \text{ мкР/ч}$ . Определите, во сколько раз это превосходит ПДД для населения.

**Решение:** Для населения установлена предельно допустимая доза

$$\text{ПДД(нас)} = 5 \text{ мЗв / год} = 0,57 \cdot 10^{-6} \text{ Зв / ч} = 65 \text{ мкР / ч.}$$

Следовательно, мощность излучения превосходит ПДД для населения  $D / \text{ПДД} = 160 / 65 = 2,5$  раз.

**Задача 6.3.** По санитарным нормам допустимая плотность потока быстрых нейтронов составляет:  $I_n = 20 \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$ . Определить, на каком минимальном расстоянии от источника интенсивностью  $S = 106 \text{ н/с}$  можно работать без дополнительной защиты.

**Решение.** Плотность потока нейтронов  $I_n(r)$  на расстоянии  $r$  от источника определяется соотношением:

$$I_n(r) = S / 4\pi r^2$$

Минимальное безопасное расстояние из этого соотношения:

$$r_{\text{мин}} = \sqrt{S / 4\pi I_n} = 109 \text{ см}.$$

**Задача 6.4.** Индивидуальная доза облучения, полученная в результате воздействия источника  $^{60}\text{Co}$  в течение  $10 \text{ с}$ , составила  $D_0 = 100 \text{ Гр}$ . При распаде  $^{60}\text{Co}$  образуется 2  $\gamma$ -кванта с энергией 1,33 и 1,17 МэВ. Сколько квантов  $\gamma$ -излучения попало при этом в организм человека, если каждый  $\gamma$ -квант теряет в тканях тела около 40% своей энергии?

**Решение.** Каждая такая пара  $\gamma$ -квантов выделяет в тканях человека энергию

$$E = (1,33 + 1,17) \cdot 0,4 = 1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}.$$

Для человека весом 75 кг поглощенная доза от одной пары  $\gamma$ -квантов составляет

$$D = E / m = 1,6 \cdot 10^{-13} / 75 = 2,13 \cdot 10^{-15} \text{ Гр}.$$

При получении организмом человека дозы  $100 \text{ Гр}$  число  $\gamma$ -квантов составляет

$$n = 2 \cdot D_0 / D = 2 \cdot 100 / 2,13 \cdot 10^{-15} = 9,4 \cdot 10^{16} \text{ } \gamma\text{-квантов}.$$

**Задача 6.5.** Найти для алюминия толщину  $x_{1/2}$  слоя половинного ослабления для рентгеновских лучей некоторой длины волны. Массовый коэффициент поглощения алюминия для этой длины волны  $\mu_m = 5,3 \text{ м}^2 / \text{кг}$ , плотность алюминия

$$\rho_{\text{Al}} = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$$

**Решение:** Интенсивность пучка рентгеновских лучей, прошедших сквозь пластинку толщиной  $x$  определяется формулой

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (1)$$

где  $I_0$  - интенсивность пучка, падающего на пластинку,  $\mu$  - линейный коэффициент поглощения. Массовый коэффициент поглощения  $\mu_m$  связан с линейным коэффициентом поглощения  $\mu$  соотношением  $\mu_m = \mu / \rho$ , откуда

$$\mu = \mu_m \rho. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получаем

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho x}. \quad (3)$$

Пройдя слой толщиной, равной толщине слоя половинного ослабления  $x_{1/2}$ , рентгеновские лучи будут иметь интенсивность

$$I = I_0 / 2. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), получаем

$$1/2 = \exp(-\mu_m \rho x_{1/2}). \quad (5)$$

Прологарифмировав выражение (5), получим искомое значение толщины слоя половинного ослабления:

$$x_{1/2} = \ln 2 / (\mu_m \rho) = 0,05 \text{ мм}.$$

### **Задание для самостоятельной работы**

**Задача 6.6.** Среднее значение эквивалентной дозы облучения, обусловленной естественным радиационным фоном, составляет  $H \approx 2 \text{ мЗв/год}$ . Переведите это значение естественного фона во внесистемную единицу *рентген в час* ( $R/\text{ч}$ ).

**Задача 6.7.** Мощность дозы  $\gamma$ -излучения радиоактивных элементов в зоне заражения равна  $D = 2 \text{ мГр/ч}$ . Сколько часов мо-

жет работать в этой зоне человек без вреда для здоровья? В аварийной обстановке принята предельная допустимая доза  $ПДД = 0,25 \text{ Гр}$ .

Ответ: 125 час.

**Задача 6.8.** При облучении каждый грамм живой клетки поглотил  $10^8$   $\alpha$ -частиц с энергией  $5,2 \text{ МэВ}$ . Определите эквивалентную дозу облучения, учитывая, что для  $\alpha$ -частиц коэффициент относительной биологической эффективности  $k=20$ .

Ответ:  $H = 1,66 \text{ Зв}$ .

**Задача 6.9.** Во сколько раз уменьшится интенсивность рентгеновских лучей при прохождении слоя железа толщиной  $d = 0,15 \text{ мм}$ ? Массовый коэффициент поглощения железа для рентгеновских лучей  $\mu_m = 1,1 \text{ м}^2/\text{кг}$ , а плотность железа  $\rho_{\text{Fe}} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Ответ:  $I_0/I = 3,62$ .

## ЧАСТЬ 3

### Физика элементарных частиц

#### Глава 7. Свойства элементарных частиц

**7.1. Фундаментальные взаимодействия. Бозоны – переносчики взаимодействий и мезоны. Фермионы: лептоны и барионы. Странные и очарованные частицы**

Под термином **элементарные частицы** первоначально понимали первичные, далее неделимые частицы, т.е. бесструктурные частицы, из которых состоит материя. В зависимости от уровня знаний под этот термин относили разные частицы. В настоящее время под этим не совсем удачным термином элементарные частицы понимают частицы ниже уровня атомного ядра – **субъядерные частицы**:  $e$ ,  $p$ ,  $n$ ,  $\pi$ , ... Эти частицы обладают рядом характерных свойств, резко отличающихся от наших обычных понятий.

1. Основной отличительной чертой элементарных частиц является чрезвычайно **малые расстояния** их проявлений и вследствие этого **очень высокие энергии** их взаимодействий. Уже начальные эксперименты установили, что пространственные масштабы, характерные элементарным частицам, меньше  $< 10^{-15}$  м. Можно оценить энергии, присущие этим частицам, на основе соотношения неопределенностей  $\Delta p \Delta x \approx \hbar$ . Полагая неопределенность в расстояниях  $\Delta x \approx 10^{-16}$  м, для ультрарелятивистской энергии  $E = pc$  получим неопределенность порядка

$$\Delta E = \Delta p \cdot c \approx \frac{\hbar c}{\Delta x} \approx \frac{1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{10^{-16} \text{ м}} = 3,15 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 2 \cdot 10^9 \text{ эВ}. \quad (7.1)$$

Следовательно, чтобы проникнуть в масштабы элементарных частиц, необходима очень высокая энергия  $\sim 1$  ГэВ. Для получения таких энергий построены мощные ускорители заряженных частиц. Поэтому физику элементарных частиц называют **физикой высоких энергий**.

2. Самым главным свойством элементарных частиц надо считать их способность рождаться при столкновениях и возможность **взаимно превращаться** друг в друга. После открытия большого числа элементарных частиц исследования были направлены на

то, чтобы обнаружить фундаментальные, неделимые части материи, из которых состоят элементарные частицы. Но эти надежды были тщетны. Выяснилось, что при самых разных взаимодействиях наблюдается только взаимопревращение частиц, но нет элементарных составляющих. Поэтому возникла гипотеза «**демократии**» частиц — все частицы превращаются друг в друга, нет самых элементарных.

3. Следующей характерной чертой элементарных частиц состоит в том, что большая часть их **нестабильна**. Частицы самопроизвольно распадаются. Среднее время жизни частиц меняется в широких пределах: от характерного времени сильного взаимодействия  $\tau \approx 10^{-23}$  с и до бесконечного времени  $\infty$ . Например, для протона, который согласно современной теории так же распадается, экспериментально установлено, что его время жизни  $\tau > 10^{32}$  лет.

Частицы с малым временем жизни  $\tau \approx 10^{-23}$  с характеризуют не временем жизни  $\tau$ , а шириной резонанса в сечении столкновения  $\Gamma = \hbar/\tau$  (МэВ). Связь энергии частицы со временем жизни следует из соотношения неопределенностей  $\Delta E \Delta t \approx \hbar$ , где неопределенность энергии  $\Delta E \approx mc^2 \approx \Gamma$  характеризует время жизни частицы  $\Delta t \approx \hbar/\Delta E \approx \tau$ . Такие частицы с малым временем жизни получили название **резонансов**, т.е. они являются скорее возбужденными состояниями известной элементарной частицы.

4. Все процессы с элементарными частицами осуществляются через 4 фундаментальные взаимодействия. Квантование поля взаимодействия приводит к квантам-частицам, через обмен которыми осуществляется взаимодействие двух частиц. В таблице 7.1 приводятся типы взаимодействий с указанием кванта обмена — переносчика взаимодействия.

Гравитационное взаимодействие столь мало по интенсивности, что пока не проявляется в экспериментах с элементарными частицами.

По отношению к участию в сильном взаимодействии частицы разделяются на 2 вида: частицы не участвующие в сильном взаимодействии — их называют **лептонами**, и частицы, участвующие в сильном взаимодействии, которых называют **адронами**.

Табл. 7.1

| N | Тип взаимодействия              | I-интенсивность | R-радиус действия | $\tau$ -время | Переносчик взаимодействия          |
|---|---------------------------------|-----------------|-------------------|---------------|------------------------------------|
| 1 | Сильное взаимодействие          | 1               | $10^{-15}$ м      | $10^{-23}$ с  | пи-мезоны<br>$\pi^0, \pi^+, \pi^-$ |
| 2 | Электромагнитное взаимодействие | 1/137           | $\infty$          | $10^{-18}$ с  | фотоны<br>$\gamma$                 |
| 3 | Слабое взаимодействие           | $10^{-10}$      | $10^{-10}$ м      | $10^{-13}$ с  | промежуточные бозоны $W^+, Z^0$    |
| 4 | Гравитационное взаимодействие   | $10^{-38}$      | $\infty$          | ?             | гравитон<br>G                      |

**Лептоны** участвуют в слабом и электромагнитном взаимодействиях, но не участвуют в сильном взаимодействии. Первоначально известные лептоны отличались самой малой массой (греческое leptos – легкий), но в последствие к ним были добавлены более тяжелые частицы. Современная теория предсказывает существование всего 6 лептонов: электрон, мюон и таон ( $e^-, \mu^-, \tau^-$ ) и соответствующие им нейтрино ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ).

Лептонам приписывают следующие квантовые числа - **лептонные заряды**:

- электрону  $e^-$  и электронному нейтрино  $\nu_e$  приписывают электронно-лептонный заряд  $L_e = +1$ ,
- мюону  $\mu^-$  и мюонному нейтрино  $\nu_\mu$  - мюонно-лептонный заряд  $L_\mu = +1$ ,
- таону  $\tau^-$  и таонному нейтрино  $\nu_\tau$  - таонно-лептонный заряд  $L_\tau = +1$ .

Все лептоны на современном уровне знания можно назвать истинно элементарными частицами, так как в них не обнаружена внутренняя структура. В этом смысле их называют еще **фундаментальными частицами**.



**Адронами** называют частицы, участвующие в сильном взаимодействии (греческое adros – сильный). Они также участвуют во всех других взаимодействиях - электромагнитном и слабом. Эти частицы составляют наиболее многочисленную группу элементарных частиц вместе с резонансами. Их подразделяют в зависимости от их внутренней кварковой структуры на 2 группы.

**Мезоны** – адроны с промежуточной массой между массой электрона и массой нуклона  $m_e < m_\pi < m_N$  (греческое mesos – промежуточный). К ним относятся:  $\pi^{0,\pm}$ ,  $\eta^0$ ,  $K^{+,0}$ ,  $D^{+,0}$  и др. Они состоят из кварка и антикварка.

**Барионы** – тяжелые адроны с массой, равной и превышающей массу нуклона  $m \geq m_N$  (греческое baros – тяжесть). К ним относятся нуклоны ( $n$ ,  $p$ ) и гипероны ( $\Sigma^+$ ,  $\Lambda^0$ , и др.). **Гиперонами** называют барионов с массой, большей массы нуклона и большим временем жизни по сравнению с ядерным временем  $10^{-23}$  с. Они состоят из 3 кварков.

5. По величине спина все частицы (в том числе и не только элементарные) подразделяются на **бозоны** и **фермионы**.

**Бозоны** – это частицы с целочисленным значением спина  $I = 0, 1, \dots$  в единицах  $\hbar$ . Бозоны подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна. К бозонам относятся: мезоны и многочисленные мезонные резонансы, **фотон**  $\gamma$  со спином 1 и гипотетический **гравитон**  $G$  со спином 2.

**Фермионы** имеют полуцелый спин  $I = 1/2, 3/2, \dots, 11/2$ . Фермионы подчиняются статистике Ферми-Дирака и принципу запрета Паули. К фермионам относятся **лептоны**, **барионы** и **барионные резонансы**, а также **кварки**. Наибольший спин  $11/2$  имеет  $\Delta_{2420}$  (дельта-изобар).

6. В микромире каждой частице соответствует **античастица**. У частицы и античастицы совпадают значения массы, спина, времени жизни, изотопические спины, но имеют противоположные по знаку электрический заряд, магнитный момент и характерные заряды: барионный, лептонный, странность, очарование, красота. (Эти понятия будут определены позже). В некоторых случаях частица совпадает со своей античастицей. Такие частицы назы-

вают **истинно нейтральными**. К ним относятся фотон  $\gamma$ ,  $\pi^0$ -мезон,  $\eta^0$ -мезон,  $J/\psi$ - джей-пси мезон.

Первую античастицу – позитрон теоретически предсказал Дирак в 1931 году и в следующем году Андерсон обнаружил в космических лучах. Вскоре были открыты электронно-позитронные ливни в космических лучах. Далее была установлена возможность процесса аннигиляции электрона и позитрона в два и более  $\gamma$ -квантов и обратного процесса образования электрон-позитронной пары:

$$e^- + e^+ \leftrightarrow \gamma + \gamma. \quad (7.2)$$

Один  $\gamma$ -квант не может образоваться при аннигиляции, так как нарушался бы закон сохранения импульса. И при обратном процессе из одного  $\gamma$ -кванта не может образоваться такая пара по этой же причине. Для образования пары  $e^-e^+$  необходимо не менее двух  $\gamma$ -квантов с суммарной энергией, больше энергии пары  $2m_e c^2$ , а в случае одного  $\gamma$ -кванта образование пары происходит в присутствии второго тела, например, атомного ядра.

Свойства антипротона были предсказаны теоретиками еще во времена открытия позитрона. Однако для того, чтобы обнаружить эту частицу, необходимо было иметь ускоренные протоны с энергией больше 6 ГэВ. Такой ускоритель был специально построен в Беркли, и начались эксперименты по обнаружению антипротона и антинейтрона. В 1955 году на этом ускорителе были открыты антипротоны в реакции

$$p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}. \quad (7.3)$$

По закону сохранения барионного заряда антипротон может образоваться только в паре с протоном. Вскоре был открыт и антинейтрон.

В настоящее время обнаружены античастицы почти всех частиц. Сейчас ни у кого не вызывает сомнения тот факт, что каждая частица имеет "двойника" - античастицу. Схемы распада частицы и античастицы - зарядово-сопряженные, например,

$$\begin{aligned} n &\rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \\ \bar{n} &\rightarrow \bar{p} + e^+ + \nu_e \end{aligned}$$

У истинно нейтральных частиц ( $\gamma$ ,  $\pi^0$ ,  $\eta^0$ ) частица и античастица тождественны. Даже для легких ядер были обнаружены антиядра. Первое антиядро – антидейтерий  $\bar{d}$  было получено в 1965 году на ускорителе в США. В 1969 году на самом мощном ускорителе того времени в Серпухове были открыты антигелий  ${}^3\bar{\text{He}}$  и анти-триий  ${}^3\bar{\text{H}}$ .

7. В начале шестидесятых годов был открыт еще один класс элементарных частиц, которые получили название **резонансов** или **резонансных частиц**. Они отличаются тем, что их время жизни очень мало  $10^{-23}$  с. Первый нуклонный резонанс был открыт Э. Ферми в 1952 году в реакциях рассеяния  $\pi$ -мезонов на нуклонах, он был назван  $\Delta$ -изобарой. Резонансы стали активно исследоваться и открываться с развитием техники водородных пузырьковых камер, в которых стало возможно наблюдать продукты распада резонансов

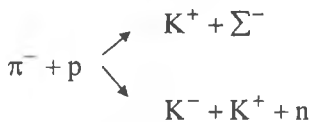


Впервые среди элементарных частиц появилась частица с зарядом +2.

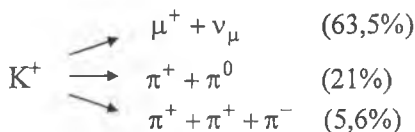
8. С появлением мощных ускорителей были открыты новые частицы со странным поведением. Их странная особенность проявлялась в том, что они рождались парами, хотя не были частицей и античастицей. Вторая особенность поведения странных частиц – большое время жизни. В результате распада такой частицы образуются сильно взаимодействующие частицы: протоны или пионы. Поэтому казалось, что время жизни странных частиц должно быть  $\sim 10^{-23}$  сек. На самом деле их время жизни  $\sim 10^{-10}$  сек, характерное для слабого взаимодействия.

Для того, чтобы объяснить такое поведение странных частиц М. Гелл-Манн и К. Нишиджима высказали предположение, что странная частица является носителем еще одного нового квантового числа, которое было названо **странностью**  $S$  (strange). Странность сохраняется в сильных взаимодействиях, но не сохраняется в слабых взаимодействиях. Это позволило сразу объяснить и парное рождение странных частиц в реакции сильного взаимодействия и большое время жизни в результате распада,

происходящего за счет слабого взаимодействия. Они рождаются парами с противоположной по знаку странностью вследствие соблюдения закона сохранения странности в сильных взаимодействиях:



Но при распаде этих частиц за счет слабого взаимодействия нарушается этот закон сохранения:



Странные частицы имеют массу покоя, большую массы покоя нуклона. Эти частицы были названы **гиперонами**. К ним относятся  $\Lambda$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^+$ ,  $\Sigma^-$ ,  $\Xi^0$ ,  $\Xi^-$ ,  $\Omega^-$ .

В 1974г была открыта новая частица, получившая двойное название  $J/\psi$  (джей-пси), так как ее одновременно открыли в двух разных лабораториях и присвоили ей такое название. Затем было открыто и целое семейство частиц, не менее странных. Их называли очарованными частицами и приписали им новое квантовое число  $c$  - **очарование** (charm – шарм). Вскоре были открыты частицы, которым приписали квантовое число  $b$  – **красота** (beauty) и наконец, частицы с квантовым числом  $t$  – **истина** (truth).

## 7.2 Законы сохранения

В микромире значение законов сохранения значительно возрастает по сравнению с макромиром. Для описания макромира существуют динамические уравнения такие, как уравнение Ньютона, уравнения Максвелла и др., которые однозначно определяют эволюцию системы и можно проследить за всеми деталями ее изменения во времени, например, за траекторией движения системы. Законы сохранения в классической физике непосредственно вытекают из этих уравнений и играют подчиненную роль. Но

в микромире неизвестны динамические уравнения, и не возможно проследить за траекторией микрочастицы. Здесь единственным источником информации о свойствах и поведении частиц становятся законы сохранения. Законы сохранения служат для установления характеристик частиц, для классификации их и для предсказания разнообразных реакций с ними.

В микромире существуют универсальные законы сохранения и приближенные законы сохранения.

1. К **универсальным**, т.е. свойственным всем типам взаимодействий, относятся следующие законы сохранения.

а) Закон сохранения четырехмерного вектора энергии-импульса

$P_\alpha = (i \frac{E}{c}, \vec{P})$ . Для релятивистских частиц с массой покоя  $m$  инвариантной величиной является квадрат 4 - импульса

$$P_\alpha^2 = -\frac{E^2}{c^2} + P^2 = -m^2 c^2 = \text{inv} \quad \text{или} \quad E^2 = P^2 c^2 + m^2 c^4.$$

б) Закон сохранения момента импульса  $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$ . Примером этого закона является возможность распада нейтрона с участием антинейтрино  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ .

в) Закон сохранения электрического заряда  $\sum q_i = \sum q_i'$ .

г) Закон сохранения барионного заряда  $B$  связан с массовым числом  $A$ .

д) Закон сохранения лептонного заряда  $L$  и его компонентов  $L_e, L_\mu, L_\tau$ .

Следующие законы сохранения относятся к приближенным законам, которые могут нарушаться в процессах электромагнитных взаимодействий или слабых взаимодействий.

Закон сохранения изоспина  $T$  может нарушаться в электромагнитных и слабых взаимодействиях.

Следующие законы сохранения нарушаются только в слабых взаимодействиях:

- закон сохранения сохранения пространственной четности  $P$ ,
- закон сохранения проекции изоспина  $T_3$ ,
- закон сохранения странности  $S$ ,
- закон сохранения очарования  $c$ ,

- закон сохранения красоты  $b$ ,
- закон сохранения истины  $t$ .

Особо отметим, что все эти законы сохранения не нарушаются в сильных взаимодействиях.

Как известно, что законы сохранения являются следствиями свойств симметрии пространства, времени и их взаимодействий. Закон сохранения энергии связан со свойством однородности времени, сохранения импульса — однородностью пространства и закон сохранения момента импульса  $\vec{J}$  связан со свойством изотропии пространства.

А закон сохранения электрического заряда  $q$  есть следствие так называемого калибровочной инвариантности, т.е. инвариантности динамических уравнений относительно калибровочного преобразования волновой функции

$$\psi_a(x) \rightarrow \psi'_a(x) = e^{iq_a \alpha} \psi_a(x) \quad (7.4)$$

Аналогичную природу имеют законы сохранения барионного заряда, лептонного заряда, странности, которую можно связать с гиперзарядом  $Y = B + S$ .

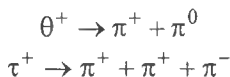
### 7.3. Несохранение пространственной четности в слабых взаимодействиях

Сильное взаимодействие является наиболее симметричным, т.к. при сильном взаимодействии сохраняются все квантовые числа, т.е. выполняются все законы сохранения. Электромагнитное взаимодействие является чуть менее симметричным, чем сильное, т.к. при электромагнитном взаимодействии нарушается закон сохранения изоспина  $T$  и его проекции  $T_3$ . Слабое взаимодействие оказалось наименее симметричным, т.к. при таком взаимодействии может нарушаться закон сохранения пространственной четности.

Как известно, что закон сохранения четности является следствием свойства зеркальной симметрии пространства. Это означает  $[\hat{H}, \hat{P}] = 0$ , т.е. гамильтониан системы коммутирует с оператором  $\hat{P}$  инверсии осей координат  $\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$ . Другими словами, сохранение четности означает, что процессы в нашем реальном мире и в

мире, который получается из него отражением в зеркале, обязаны протекать одинаково.

Со временем введение четности Ю. Вигнером в 1927 году не наблюдалось нарушение этого закона. Но в 1954-56 годах возникла проблема с частицами  $\theta$  и  $\tau$ , которые совпадали во всем, кроме распада



Внутренняя четность пи-мезонов равна  $P = -1$ . Четность первой частицы  $\theta$  равна  $P = (-1)(-1) = +1$ , а четность второй частицы  $\tau$  равна  $P = (-1)(-1)(-1) = -1$ . Для отождествления этих частиц необходимо допустить, что четность не сохраняется в слабых взаимодействиях. Впервые гипотезу о возможности нарушения закона сохранения четности в слабом взаимодействии выдвинули американские физики-теоретики китайского происхождения Т.Ли и Ч.Янг в 1954г. Они так же предложили эксперименты для подтверждения этого положения.

Такой опыт выполнила в 1957 году американская ученая Ц. Ву. Он состоял в измерении углового распределения электронов  $\beta$ -распада ориентированных ядер кобальта  $^{60}\text{Co}$ .

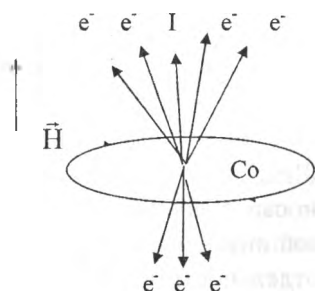


Рис.7.1. Распределение потока  $\beta$ -частиц в опыте Ц.Ву

Эти ядра были выбраны потому, что они обладают большим спином  $I=5$ , а значит и большим магнитным моментом  $\mu$ , кото-

рый легко ориентировать сильным внешним магнитным полем. Бета-активный препарат  $^{60}\text{Co}$  помещался в магнитное поле при низкой температуре  $T \approx 0,1 \text{ К}$  для устранения теплового расстройтва ориентации ядер. Измерялся поток  $\beta$ -частиц в направлении спина ядра и в противоположно спину. Если правое и левое в природе не различимы, то вылет  $\beta$ -электронов в направлении спина  $I$  и в противоположно спину  $I$  направлении должен быть равновероятным. На рис.7.1 схематично показан результат эксперимента, который показал, что распределение потока  $\beta$ -частиц не одинаково. Таким образом, опыт Ву подтвердил гипотезу о не сохранении четности в слабом взаимодействии. И в 1957 году Ли и Янг были удостоены Нобелевской премии.

Вследствие этого установили, что  $\tau$ - и  $\theta$ -мезоны одна и та же частица, называемая теперь  $K$ -мезоном, с четностью  $P = -1$ , распад которой идет с нарушением четности  $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ .

Пространство обладает такими точными симметриями, как однородность и изотропность. Чтобы восстановить зеркальную симметрию были предложена следующая идея. При инверсии координат с помощью  $P$  - операции вектор скорости меняет знак  $\vec{v} \rightarrow -\vec{v}$ , а электрический заряд  $q$  не меняет знак, считается скаляром. Но при зеркальном отображении направление кругового тока меняется на обратное, что равносильно изменению знака заряда  $q \rightarrow -q$ . Поэтому вводится операция  $C$  - зарядового сопряжения, которая меняет знак электрического заряда электрона  $e^- \rightarrow e^+$ , а обобщая эту операцию на все частицы, которые не обладают зарядом, получим операцию изменения частицы на античастицу  $v \rightarrow \bar{v}$ .

В 1957 году Л.Д.Ландау, А. Салам, Ли и Янг сформулировали принцип инвариантности слабого взаимодействия относительно  $\hat{C}\hat{P}$  - комбинированной инверсии. В сильном и электромагнитном взаимодействиях в отдельности проявляется  $\hat{P}$ - инвариантность и  $\hat{C}$ - инвариантность. Но при слабом взаимодействии нарушаются в отдельности  $\hat{P}$ - инвариантность и  $\hat{C}$ - инвариантность, но наблюдается инвариантность относительно одновременной  $\hat{C}\hat{P}$ - инверсии. В общей теории существует  $\hat{C}\hat{P}\hat{T}$  - теорема: все процессы





Ландау Лев Давыдович (1908-1968)- советский физик-теоретик, академик, родился в Баку, окончил Ленинградский ун-т (1927), работал в Ленинградском ФТИ (1927-32), Харьковском ФТИ (1932-37), Московском ФТИ (1947-50), МГУ. Работы посвящены квантовой механике, физике твердого тела, теории фазовых переходов, теории ферми-жидкости и теории сверхтекучей жидкости (Нобелевская премия, 1962), квантовой теории поля, физике элементарных частиц. Создал вместе с Е.М. Лифшицем многотомный «Курс теоретической физики», воспитал большую теоретическую школу, Герой Соц. Труда (1954), Гос. Премии (1946, 1949, 1953)

природы инвариантны относительно  $\hat{C}\hat{P}\hat{T}$ -инверсии. Здесь операция  $\hat{T}$ - инверсии означает обращение времени  $t \rightarrow -t$  в волновой функции частицы

$$T\Psi(\vec{r}, t) = \Psi^*(\vec{r}, -t)$$

Из этой  $\hat{C}\hat{P}\hat{T}$ - теоремы следуют следующие следствия:

- а) масса  $m$  и время жизни  $t_{cp}$  частицы и античастицы равны,
- б) электромагнитные моменты частицы и античастицы отличаются только знаком,
- в) антигравитация в природе не существует.

В 1964 году были обнаружены распады типа  $K_L^0 = \pi^+ + \pi^-$ , которые запрещены по  $\hat{C}\hat{P}$ -инвариантности. Нарушение  $\hat{C}\hat{P}$ -инвариантности равносильно нарушению  $\hat{T}$ - инвариантности, так как  $\hat{C}\hat{P}\hat{T}$ - теорема строго соблюдается во всех процессах. Отсюда следует необратимость времени и, следовательно, необратимость процессов в природе.

### Вопросы для закрепления знаний

1. Перечислите 4 типа фундаментальных взаимодействий элементарных частиц. Укажите, обменом каких частиц они осуществ-

ляются? Какая интенсивность, радиус действия и характерное время процессов этих взаимодействий?

2. Какие частицы называются адронами? Что общего и чем различаются барионы и мезоны?

3. Какие частицы называются лептонами? Перечислите дублеты лептонов и соответствующий им лептонный заряд.

4. Чем различаются бозоны и фермионы? Чем они характеризуются?

5. Почему нарушается закон сохранения изоспина в электромагнитных?

6. Опишите результат опыта Ц. Ву по доказательству несохранения четности в слабых взаимодействиях.

7. В чем странность странных частиц?

8. Какие частицы называют гиперонами?

9. Какие частицы называются резонансами?

10. В чем заключается комбинированная  $CP$ -инвариантность?

11. Объясните, в чем заключается  $CPT$ -теорема? Какие следствия вытекают из нее?

### Примеры решения задач

**Задача 7.1.** Почему не могут выполняться следующие процессы:

а)  $\mu^- \neq e^- + \tilde{\nu}_e$

б)  $p \neq e^+ + \nu_e + \tilde{\nu}_e$

в)  $\nu_e + p \neq e^+ + n$

**Задача 7.2.** Показать, что свободно движущийся электрон не может испустить фотон.

**Решение:** Покажем, что процесс  $e^- \rightarrow e^- + \gamma$  запрещен по закону сохранения энергии и импульсов, который в 4-мерной формулировке имеет вид

$$P_{\alpha i} = P_{\alpha f} + P_{\alpha \gamma}, \quad (1)$$

где 4-мерный вектор энергии-импульса  $P_{\alpha} = (iE/c, \vec{p})$  и

$$-P_{\alpha}^2 = E^2 - \vec{p}^2 c^2 = m^2 c^4 \quad (2)$$

Из (1) находим

$$P_{\alpha f} = P_{\alpha i} - P_{\alpha \gamma} \quad (3)$$

Возведем (1) в квадрат

$$P_{\alpha i}^2 = P_{\alpha f}^2 + P_{\alpha \gamma}^2 + 2(P_{\alpha f}, P_{\alpha \gamma}) \quad (4)$$

Используя (3), представим (4) в виде

$$P_{\alpha i}^2 = P_{\alpha f}^2 + P_{\alpha \gamma}^2 + 2(P_{\alpha i} - P_{\alpha \gamma}, P_{\alpha \gamma}) = P_{\alpha f}^2 + P_{\alpha \gamma}^2 + 2(P_{\alpha i}, P_{\alpha \gamma}) - 2P_{\alpha \gamma}^2 \quad (5)$$

Перейдем в систему отсчета, в которой начальный электрон покоится

$$\vec{p}_{ei} = 0 \quad \text{и} \quad E_i = m_e c^2 \quad (6)$$

тогда

$$\vec{p}_f = -\vec{p}_\gamma \quad (7)$$

Подставляя (2) в (5) и имея в виду (5) и (7), получим

$$\begin{aligned} m_e^2 c^4 &= E_f^2 - \vec{p}_f^2 + 2(E_i E_\gamma - \vec{p}_i \vec{p}_\gamma) - (E_\gamma^2 - \vec{p}_\gamma^2) = \\ &= m_e^2 c^4 + 2m_e c^2 E_\gamma - m_\gamma^2 c^4 \end{aligned}$$

Откуда имеем 
$$E_\gamma = (m_e^2 - m_e^2 + m_\gamma^2) c^2 / 2m_e.$$

Так как масса фотона равна нулю, то энергия фотона  $E_\gamma = 0$  равна нулю.

**Задача 7.3.** Процесс рассеяние фотона на свободном электроне, называемый комптон-эффектом, описывается зависимостью изменения длины волны  $\Delta\lambda$  от угла рассеяния  $\vartheta$  фотона

$$\Delta\lambda = \Lambda(1 - \cos \vartheta),$$

где  $\Lambda = h / m_e c$  - комптоновская длина волны электрона.

На основе законов сохранения импульсов и энергии этого процесса вывести формулу эффекта Комптона.

**Решение.** Выпишем законы сохранения импульсов и энергии для этого процесса:

$$\vec{p}_\gamma = \vec{p}'_\gamma + \vec{p}_e \quad (1)$$

$$E_\gamma + m_e c^2 = E'_\gamma + \sqrt{p_e'^2 c^2 + m_e^2 c^4} \quad (2)$$

Здесь мы учли, что электрон до столкновения покоился и в результате столкновения приобрел импульс  $p_e$  и энергию

$\sqrt{p_e^2 c^2 + m_e^2 c^4}$ , а фотон с импульсом

$$\vec{p}_\gamma = h\vec{n} / \lambda \quad (3)$$

и энергией

$$E_\gamma = p_\gamma c \quad (4)$$

после рассеяния изменяет энергию, импульс и направление распространения. Из (1) имеем

$$p_e^2 = p_\gamma^2 + p_\gamma'^2 - 2p_\gamma p_\gamma' \cos \vartheta \quad (5),$$

где  $\vartheta$  - угол рассеяния фотона. Из (2) учитывая (4), получим

$$(p_\gamma - p_\gamma' + m_e c)^2 = p_e^2 + m_e^2 c^2 \quad (6).$$

Исключая  $p_e$  из (5) и (6), получим

$$mc(p_\gamma - p_\gamma') = p_\gamma p_\gamma' (1 - \cos \vartheta) \quad (7).$$

Подставляя (3) в (7), имеем, окончательно

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

**Задача 7.4.** С точки зрения рождения антипротона энергетически наиболее выгодным является процесс  $p + p \rightarrow p + p + \bar{p}$ .

Учитывая, что масса протона  $m_p \approx 0,94$  ГэВ, показать, что порог рождения антипротона достаточно высок  $T_0 = 6m_p \approx 5,6$  ГэВ.

**Решение:** Рассматривая две сталкивающиеся частицы как единую систему, выпишем следующий из закона сохранения 4-импульса инвариант

$$\begin{aligned} M_i^2 c^4 &= E_{in}^2 - \vec{p}_{in}^2 c^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2 c^2 = \\ &= (E_1 + m_2 c^2)^2 - (\vec{p}_1 + 0)^2 c^2 = \\ &= E_1^2 + 2E_1 m_2 c^2 + m_2^2 c^4 - p_1^2 c^2 = \end{aligned}$$

$$= m_1^2 c^4 + m_2^2 c^4 + 2E_1 m_2 c^2.$$

Необходимое условие реакции  $M_i \geq \sum m_f$  приводит к порогу реакции

$$T_a = [(\sum m_{\text{out}})^2 - (m_a + m_b)^2] c^2 / (2m_b). \quad (1)$$

Учитывая, что масса антипротона равна массе протона  $m_p \approx 940$  МэВ. Подставляя это в (1) для вышеприведенной реакции рождения антипротона, получим

$$T_a = [(4m_p)^2 - (2m_p)^2] / (2m_p) = 6m_p \approx 5,6 \text{ ГэВ}.$$

### Задание для самостоятельной работы

**Задача 7.5.** Объясните, почему происходят эти процессы:

а)  $\tilde{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n,$

б)  $\mu^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\mu,$

в)  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu,$

г)  $p + \tilde{p} \rightarrow n + \tilde{n}.$

**Задача 7.6.** Выпишем соотношение некоторого процесса  $a + b \rightarrow c + d$ , который допускается законами сохранения. Существует правило: если в этом соотношении какую-либо частицу перенести из одной части соотношения в другую, заменив ее на античастицу, то получится соотношение, выражающее возможный новый процесс. Используя это правило, рассмотреть все возможные процессы, которые следуют из соотношений, приведенных в задаче 7.5.

**Задача 7.7.** Показать, что движущийся в вакууме один фотон с любой, сколь угодно большой энергией не может превратиться в электрон-позитронную пару.

**7.8.** Ниже приведены законы сохранения и типы взаимодействий. Проставьте знак «+», если этот закон сохранения в данном типе взаимодействия не нарушается и знак «-», если нарушается.

| Законы сохранения   | Взаимодействия |                  |        |
|---|----------------|------------------|--------|
|   | Сильное        | Электромагнитное | Слабое |
| Электрический заряд $Q$<br>4-энергия-импульс $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$<br>Угловой момент $J$<br>Барионный заряд $B$<br>Лептонные заряды $L_e, L_\mu, L_\tau$<br>Странность (strangeness) $s$<br>Очарование (charm) $c$<br>Красота (beauty) $b$<br>Истина (truth) $t$<br>Изоспин $T$<br>Проекция изоспина $T_3$<br>Пространственная четность $P$ |                |                  |        |

**Задача 7.9.** Определить порог рождения антипротона при соударении электрона с покоящимся электроном.

Ответ:  $T_0 = 2m_p(m_p/m_e + 2) = 3446 \text{ ГэВ}$

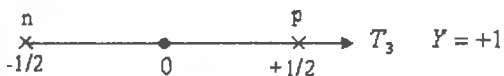
## Глава 8. Систематика элементарных частиц

### 8.1. Соотношение Гелл-Мана и Нишиджимы. Восьмеричный формализм. Октет барионов. Октет мезонов. Декуплет барионов и открытие $\Omega^-$ -гиперона

Существование большого количества элементарных частиц (>400) поднимает вопрос об их систематике. Их разнообразие вынудило физиков искать какие-то принципы, которые позволили бы упорядочить множество частиц. В особенности после экспериментов Р. Хофштадтера по рассеянию электронов на нуклонах стало известно, что нейтрон и протон в отличие от электрона имеют сложную структуру, т.е. имеют определенные составные элементы. Поиски этих составных элементов и установление систематики частиц привели, в конце концов, к фундаментальному открытию истинно элементарных частиц – **кварков**, из которых состоят адроны.

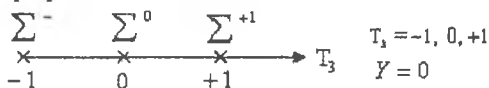
Первую удачную систематику элементарных частиц предложили американский физик Гелл-Манн в 1953 г. и независимо от него японский физик К. Нишиджима в 1954 г. Она основана на разбиении элементарных частиц с близкими физическими свойствами на небольшие семейства – изотопические мультиплеты (изомультиплеты). Частицы одного изомультиплета одинаково участвуют в сильных взаимодействиях, имеют примерно равные массы, один и тот же барионный заряд  $B$ , обладают одинаковыми свойствами спинами  $J$  и четностью  $\eta_p$ . Они отличаются друг от друга только электромагнитными характеристиками: электрическим зарядом и магнитным моментом. Каждому мультиpletу приписывают изоспин  $T$ , частица изомультиплета характеризуется проекцией изоспина  $T_3$ , и следовательно, число частиц в изомультиплете равно  $N = 2T + 1$ - числу проекции изоспина  $T$ .

Так, например, протон и нейтрон объединяются в изомультиплет с барионным зарядом  $B=1$  и спином  $J^p = 1/2^+$ . Они составляют изодублет с изоспином  $T = 1/2$  и проекциями изоспина  $T_3 = +1/2$  и  $T_3 = -1/2$  для протона и нейтрона, соответственно. Удобно их представить графически на оси  $T_3$ :

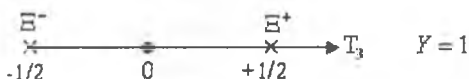


Таких мультиплетов можно составить множество. Ограничимся в дальнейшем рассмотрением мультиплетов, составленных из частиц, схожих протону и нейтрону с барионным зарядом  $B=1$  и спином  $J^{\pi} = 1/2^{+}$ .

Такой изотриплет составляют три  $\Sigma^{-}, \Sigma^{0}, \Sigma^{+}$  - сигма-гиперона с изоспином  $T=1$  и проекциями  $T_3 = -1, 0, +1$ . Их также представим на графике оси  $T_3$ :



Барионный изодублет с  $B=1$  и спином  $J^{\pi} = 1/2^{+}$  составляют  $\Xi^{-}, \Xi^{0}$  - кси-гипероны с изоспином  $T=1/2$  и проекциями  $T_3 = -1/2, +1/2$ . Ниже они представлены на графике:



Наконец, изосинглет с  $B=1$  и спином  $J^{\pi} = 1/2^{+}$  составляет один  $\Lambda^{0}$  -лямбда-гиперон. Ему приписывают изоспин  $T=0$  с проекцией  $T_3=0$  и представляют на оси  $T_3$



Всем мультиплетам присваивается еще квантовое число **гиперзаряд**, состоящий из суммы барионного заряда и квантовых чисел **странности S** и **очарования C**:

$$Y = B + S + C. \quad (8.1)$$



Впоследствии к этой сумме прибавили квантовые числа красоты  $b$  и истины  $t$  после открытия частиц с этими квантовыми числами.

Гиперзаряд частицы связан с его электрическим зарядом соотношением Гелл-Манна и Нишиджимы:

$$q = T_3 + \frac{1}{2} Y \quad (8.2)$$

Вычислим гиперзаряд для изомультиплетов и проверим соотношение Гелл-Манна и Нишиджимы.

1. Изодублет  $n, p$  имеет барионный заряд  $B = 1$ , странность  $S = 0$  и очарование  $C = 0$ . Следовательно, гиперзаряд равен  $Y = +1$ , электрические заряды  $q = +1/2 + 1/2 = +1$  для протона и для нейтрона  $q = -1/2 + 1/2 = 0$ .

2.  $\Lambda^0$ -изосинглет с  $B=1, S=-1, C=0, T=0, T_3=0$  имеет гиперзаряд  $Y=0$  и электрический заряд  $q = 0 + \frac{1}{2}(1 - 1 + 0) = 0$ .

3.  $\Sigma^\pm, \Sigma^0$  - изотриплет с  $B=1, S=-1, C=0, T=1, T_3 = +1, 0, -1$  и гиперзаряд  $Y=0$ .

Следовательно, электрические заряды триплета равны  $q = +1 + 0 = +1, q = 0 + 0 = 0$  и  $q = -1 + 0 = -1$ .

4.  $\Xi^{\bar{0}}$  - изодублет -  $B = +1, S = -2, C = 0, T = \frac{1}{2}, T_3 = +\frac{1}{2}, T_3 = -\frac{1}{2}$  и гиперзаряд  $Y = -1$ . Электрические заряды дублета равны  $q = +1/2 - 1/2 = 0$  и  $q = -1/2 - 1/2 = -1$ .

Таким образом, изомультиплет характеризуется изоспином и гиперзарядом, а члены мультиплета различаются проекцией изоспина. Такая возможность является следствием инвариантности сильного взаимодействия относительно изо-спиновых преобразований и калибровочных преобразований, приводящих к сохранению зарядов, как электрических, так и гиперзаряда. Математическим аппаратом этой теории является теория симметрии, основанной на теории групп, которая в свое время объяснила периодическую закономерность химических элементов таблицы Менделеева.



**Гелл-Манн Мюррей** - американский физик-теоретик, родился в 1929 г. в Нью-Йорке, окончил Йельский ун-т (1948) и Массачусетский технологический ин-т (1951), работал в Чикагском ун-те и в Калифорнийском технологическом ин-те. Совместно с Фейнманом разработал теорию слабого взаимодействия. Разработал независимо от Ю. Неемана систематику элементарных частиц, объединив их в супермультиплеты, предсказал новую частицу – омега-минус-гиперон и ее свойства (Нобелевская премия, 1965). Автор (независимо от других) кварковой гипотезы, выдвинул гипотезу глюонов.

Математические действия с изоспинами аналогичны математике обычных спинов, которые описываются матрицами Паули. Как известно, из двух частиц со спином  $1/2$  можно составить состояния со спинами  $1$  и  $0$ . Также волновые функции изотриплета и изосинглета можно составить через волновые функции изодублета. Отсюда следует важный вывод, что изодублет является элементарным построением, из которого можно сконструировать другие мультиплеты. Эта идея является основой построения составных моделей частиц.

После открытия множества новых частиц, в основном, резонансов, появилось много различных изомультиплетов, и их тоже следовало систематизировать. Начались поиски новых симметрий. Такую симметрию предложили в 1961 г. М. Гелл-Манн и Ю. Неман. Эта симметрия основана на представлении барионных изомультиплетов в зависимости от изоспина и гиперзаряда.

Представим выше рассмотренные изомультиплеты с одинаковым набором массового числа  $B$  и спина  $J^{\pi}$  на плоскости  $(T_3, Y)$ , где осями являются проекция изоспина и гиперзаряд. На графике рис.8.1 получается правильный шестиугольник, состоящий из 8 частиц. Эта группа частиц называется октет барионов. Все они в сильном взаимодействии проявляют одинаковые свойства, но их масса отличается незначительно. Это различие в массе составляет

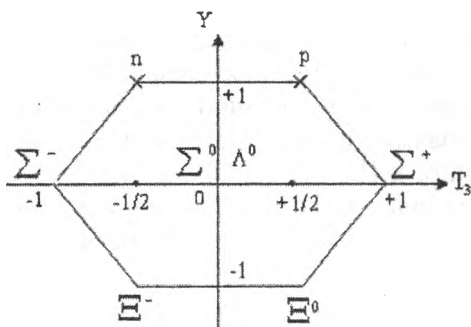


Рис.8.1. Октет барионов

$\Delta m \approx m_\pi$  массу пи-мезона, т.е. всего на  $\frac{m_\pi}{m_N} \approx \frac{280}{2000} \approx 15\%$ . Масса

$\Sigma$ -гиперонов больше массы нуклонов на  $m_\pi$ , так же масса  $\Xi$ -гиперонов больше массы  $\Sigma$ -гиперонов на эту же величину  $m_\pi$ . Это значит, что они могут распадаться с испусканием пи-мезона:  $\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$  и  $\Xi^0 \rightarrow \Sigma^+ + \pi^-$ .

Аналогичная картинка получается также для стабильных мезонов с массовым числом  $B=0$  и спином  $J^P = 0^-$  (мезоны являются псевдоскалярами). Только здесь мезонные семейства включают частицы и античастицы, т.к. квантовые числа  $B=0$  и  $J^P = 0^-$  у них одинаковы, а различаются они только значением изоспина и гиперзаряда.

Эти изомультиплеты с  $B=0$  и  $J^P = 0^-$  составлены из следующих мезонов:

1. изотриплет  $\pi^{\pm,0}$ -пи-мезонов с  $S=0, C=0, Y=0$  и  $T=1$ ;
2. изосинглет  $\eta^0$ -этта-мезона с  $S=0, C=0, Y=0$  и  $T=0$ ;
3. изодублет странных  $K^{\pm,0}$ -ка-мезонов с  $S=1, C=0, Y=1$  и  $T=1/2$ ;
4. изодублет странных  $\bar{K}^{\pm,0}$ -анти-ка-мезонов с  $S=-1, C=0, Y=-1$  и  $T=1/2$ .

На графике  $(T_3, Y)$ , представленном на рис.8.2, получается опять правильный шестиугольник с 8 мезонами – октет мезонов, которые имеют близкие физические свойства. Такая внешняя симметрия не может быть случайной. Она отражает свойства симметрии сильного взаимодействия. Математический анализ, проведенный Гелл-Манном и Неemanом, подтвердил существование более широкой симметрии, так называемой **унитарной симметрии**, а сам подход получил название **восьмеричным формализмом**.

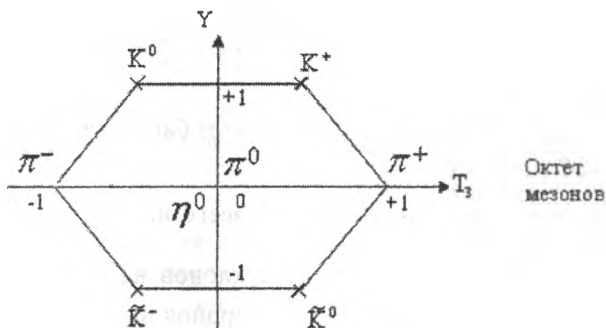


Рис. 8.2 Октет мезонов

В момент создания этой теории унитарной симметрии были известны только 7 мезонов (кроме  $\eta^0$ -мезона). В соответствии с выводами теории было предсказано существование восьмого мезона с его характеристиками. В 1961 г. предсказанный  $\eta^0$ -мезон был обнаружен, причем его свойства оказались в хорошем соответствии с предсказаниями теории.

Успехи унитарной симметрии многочисленны. Она установила глубокие связи между частицами с разными массами, изоспинами и гиперзарядами, разместив реально наблюдаемые адроны. Все они заполняют синглеты, октуплеты и декуплеты.

Приведем пример декуплета адронов с  $B=1$ ,  $J^P=3/2^+$ . Соответствующая диаграмма изображена на рис.8.3.

В период создания этой теории  $\Omega^-$ -гиперон не был известен. Вершина треугольника оставалась незаполненной. Гелл-Манн предсказал, что отвечающей ей частица должна иметь спин, равный

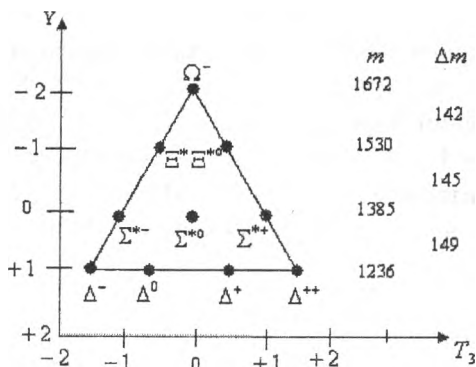


Рис.8.3. Декуплет адронов с  $B=1$ ,  $J^P=3/2^+$ .

$J^P=3/2^+$ , гиперзаряд  $Y=-2$ , массу около 1675 МэВ. В 1964 г. В Брукхэвнской лаборатории был зафиксирован процесс рождения и распада  $\Omega^-$ -гиперона. Ее свойства, в частности, масса в точности совпала с предсказанной теорией. Таким образом, открытие  $\Omega^-$ -гиперона явилось триумфом теории унитарной симметрии.

За эти открытия, связанные с классификацией элементарных частиц, Гелл-Манн был удостоен Нобелевской премии за 1969 г.

## 8.2. Адроны как составные частицы. Кварки и их характеристики: аромат и цвет. Проблема пленения кварков

Как было установлено, что изомультиплет характеризуется одним “внутренним” квантовым числом — изоспином  $T$ , значения которого могут быть полуцелые и целые положительные числа. Размерность изомультиплета, т.е. число частиц в мультиплете, определяется изоспином  $N(T)=2T+1$ . Не существует никаких ограничений на число частиц в мультиплете. Изодублет является элементарной частью, из которой можно сконструировать все другие мультиплеты.

Но унитарный мультиплет характеризуется двумя “внутренними” квантовыми числами: изоспином  $T$  и гиперзарядом  $Y$ , которые обозначим через  $t_1$  и  $t_2$ . Размерность унитарного мультиплета  $T_3$  и  $Y$  определяется формулой:

$$N(t_1, t_2) = (2t_1 + 1)(2t_2 + 1)(t_1 + t_2 + 1) \quad (8.3)$$

Согласно унитарной теории симметрии рассмотренные нами мультиплеты имеют размерность  $N(1/2, 1/2) = 2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$ , отсюда и название восьмеричный формализм. Следующий унитарный мультиплет  $N(3/2, 0) = 4 \cdot 1 \cdot 5/2 = 10$  имеет 10 частиц (декуплет). Но минимальный унитарный мультиплет  $N(0, 1/2) = N(1/2, 0) = 3$  - триплет в природе не существует, так как имеют гиперзаряд, равный дробному числу  $Y = \frac{k}{3}$ , где  $k = 1, 2$ , а также они имеют и дробный электрический заряд.

Но унитарные триплеты важны с точки зрения теории, так как, комбинируя их, можно получить все унитарные мультиплеты, которые физически допустимы. На основе их можно построить «минимальную» (составную) модель, в которой все известные частицы можно сконцентрировать из небольшого числа «фундаментальных» частиц.

Несмотря на такую физическую нелепость, Гелл-Манн и Цвейг (1964 г.) допустили существование триплета частиц с дробным значением гиперзаряда  $Y$ , следовательно, и электрического заряда  $q$ . Члены этого триплета называются **кварки**.

Этим частицам приписывают дробные квантовые числа, которые приведены ниже в табл.8.1.

Табл. 8.1

| Кварки | Название | $J$ | $\eta_3$ | $B$ | $T$ | $T_3$ | $S$ | $Y$  | $q$  |
|--------|----------|-----|----------|-----|-----|-------|-----|------|------|
| $q$    |          |     |          |     |     |       |     |      |      |
| u      | up       | 1/2 | +1       | 1/3 | 1/2 | +1/2  | 0   | 1/3  | +2/3 |
| d      | down     | 1/2 | +1       | 1/3 | 1/2 | -1/2  | 0   | 1/3  | -1/3 |
| s      | strange  | 1/2 | +1       | 1/3 | 0   | 0     | -1  | -2/3 | -1/3 |

Эти кварки обозначаются буквой  $q$  (не путать с  $q$  – электрическим зарядом). Кварки  $u$  и  $d$  сохранили свое английское название. Странный кварк  $s$  имеет квантовое число странность  $S=1$ . На рис.8.4 представлен триплет кварков на плоскости  $(T_3, Y)$ .

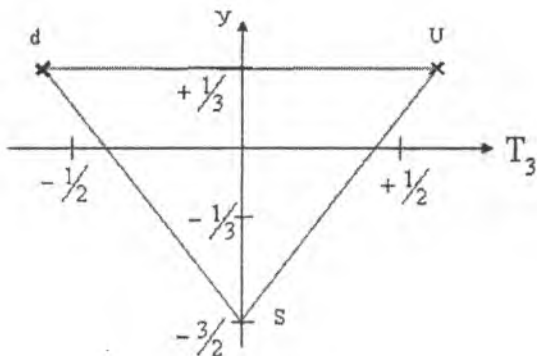


Рис.8.4. Триплет кварков

Из этих 3 кварков были составлены все известные к тому времени частицы. Мезоны состояются из кварка и антикварка  $M = q\bar{q}$ , а барионы из 3 кварков  $B = qq\bar{q}$ . Так, например, протон состоит из  $uud$  – кварков. Тогда электрический заряд протона будет равен сумме зарядов кварков  $q = 2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$ , барионный заряд также  $B = 1/3 + 1/3 + 1/3 = 1$ , но спин состоит из ориентации спина кварков  $J = +1/2 - 1/2 + 1/2 = 1/2$ .

А нейтрон состоит из  $udd$  – кварков и имеет электрический заряд  $q = 2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$ , барионный заряд  $B = 1/3 + 1/3 + 1/3 = 1$  и спин  $J = +1/2 + 1/2 - 1/2 = 1/2$ .

Барионный октет имеет следующий кварковый состав:

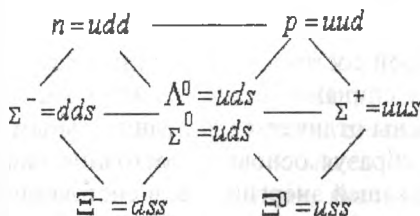


Рис.8.5. Кварковый состав барионного октета

Пи-мезоны, имеющие ранний нулю спин  $J^P = 0^-$ , состоят из кварка и антикварка с противоположно направленными спинами  $J = +1/2 - 1/2 = 0$ . Заряженные пи-мезоны состоят из кварков:  $\pi^+ = \bar{d}u$  и  $\pi^- = \bar{u}d$ . Нейтральный пи-мезон имеет отрицательную четность, поэтому описывается антисимметричной комбинацией  $\pi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\bar{u}u - \bar{d}d)$ . На рис.8.6 представлен кварковый состав мезонного октуплета.

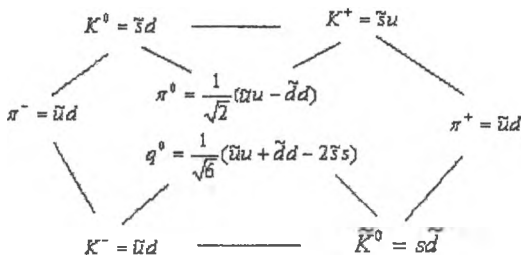


Рис.8.6. Кварковый состав октета мезонов

Барионный декуплет, состоящий из 10 гиперонов ( $\Delta^{\pm 0}, \Sigma^{\pm 0}, \Xi^{\pm 0}, \Omega^-$ ), имеет спин  $J = 3/2$ . Следовательно, спины всех 3-х кварков направлены одинаково. Кварки подчиняются статистике Ферми-Дирака и на них распространяется принцип Паули. Все гипероны, кроме  $\Omega^-$ -гиперона, состоят из разных кварков.

Но  $\Omega^-$ -гиперон состоит из 3 странных кварков  $sss$  с одинаково направленными спинами. Кварки в этом гипероне, являясь фермионами, должны отличаться дополнительным квантовым числом. Эти 3 кварка, образуя основное состояние гиперона, находятся в состоянии наиминимальшей энергии, т.е. в состоянии с орбитальным моментом  $L = 0$ . Поэтому для различения 3 кварков необходимо дополнительное квантовое число, которое принимает 3 значения.

В 1965 году ученые из ОИЯИ (Дубна): Н.Н.Боголюбов, Б.Струминский и А.Н.Тавхелидзе - ввели такое квантовое число,



называемое **цветом**, которое принимает 3 значения: R(red), G(green), B(blue). Понимается, это квантовое число к оптическому цвету никакого отношения не имеет. Но им приписывают известные из оптики свойства: смесь 3 основных цветов дает белый цвет. Антикваркам приписывают антицвета  $\bar{R}, \bar{G}, \bar{B}$ . Смесь цвета и антицвета дает белый цвет, так же как в оптике смесь основного цвета и дополнительного цвета дает белый цвет. При построении адронов из кварков соблюдаются следующие правила:

- а) барионы состоят из 3 кварков с разными цветами и, следовательно, барионы имеют белый цвет;
- б) мезоны состоят из кварка и антикварка, имеющие цвет и дополнительный ему цвет так, что в итоге мезон тоже белого цвета;
- в) все реально наблюдаемые адроны имеют белый цвет, а кварки, обладающие цветом, в свободном виде не наблюдаются;
- г) все известные к 1974 г. адроны можно было описать с помощью кварков всего лишь трех типов - *u, d, s*, при этом каждой комбинации кварков соответствовала экспериментально наблюдаемая частица.

1974 год завершился для физиков сенсацией. Одновременно две группы физиков объявили о наблюдении новой частицы. Теперь ее называют  $J/\psi$ . Масса обнаруженной частицы  $\sim 3.1$  ГэВ. Причиной сенсации было необычайно большое время жизни  $J/\psi$ . Оказалось, что ее время жизни почти в 1000 раз больше, чем у известных частиц такой массы. Дальнейшие исследования показали, что причиной такого долгожития является то, что в ее состав входит новый неизвестный ранее *s*-кварк, названный **очарованным** кварком. Было высказано предположение, что  $J/\psi$  - это мезон, состоящий из *s*-кварка и *s*-антикварка. Так же как с *s*-кварком связано квантовое число *s* - странность, *s*-кварк несет новое квантовое число *c*, названное "**очарованием**". Очарованный кварк должен порождать новое семейство адронов, имеющих в своем составе *s*-кварк или *s*-антикварк. Все эти частицы тяжелые, т.к. масса очарованного кварка больше массы странного кварка. Итак, кварков стало 4, но на этом открытие новых кварков не завершилось.

В 1977 году были открыты нейтральные мезоны с массами около 10 ГэВ. Они получили название  $\Upsilon$ -ипсилон-мезонов. Так же как и  $J/\psi$ -мезоны они наблюдались в реакции образования мюонных пар

в протон-ядерных столкновениях и на электронно-позитронных коллайдерах и также как  $J/\psi$ -мезоны они долго живущие (ширина распада  $\Upsilon$ -мезона 53 кэВ). Это означало открытие 5-го кварка  $b$  (*beauty-красивый*). В состав  $\Upsilon$ -мезона входят  $b$ -кварк и  $b$ -антикварк. В 1995 году был открыт шестой, самый "тяжелый" кварк -  $t$ -кварк (*truth-истинный*).

Таким образом, на современном этапе развития наших представлений о структуре материи система кварков включает уже 6 сортов (*ароматов*). Идея кварков оказалась весьма плодотворной. Она позволила не только систематизировать уже известные частицы, но и предсказать ряд новых частиц, а так же объяснить многие свойства частиц и связать между собой различные процессы (см. табл. 3 Приложения).

В свободном виде кварки не обнаружены. Но эксперименты указывает на реальное существование кварков внутри адронов. Например, опыты Хофштадтера по рассеянию быстрых электронов установили внутреннюю структуру ядер и нуклонов (аналог опытов Резерфорда). Характер рассеяния свидетельствует о наличии внутри

протона точечных рассеивающих центров с зарядами  $\frac{2}{3}e$  и  $\frac{1}{3}e$ .

Итак, кварков, истинно элементарных частиц, имеется всего 6 и столько же лептонов  $e, \nu_e, \mu, \nu_\mu, \tau, \nu_\tau$ , которые являются также истинно элементарными частицами. Теория указывает, что число лептонов и кварков должно совпадать, т.к. между ними существует глубокая внутренняя симметрия. Их подразделяют на 3 поколения. В каждом поколении имеются верхние и нижние частицы (см. Приложение, табл.4). Массивные элементарные частицы - адроны, образованные из кварков второго и третьего поколений, отличаются коротким временем жизни, поэтому они уже не встречаются в природе, хотя могли рождаться в момент Большого взрыва и образования Вселенной. Они были получены на ускорителях при столкновении частиц сверхвысоких энергий. В настоящее время нас окружают частицы, состоящие только из кварков и лептонов первого поколения. Материальное вещество, в конечном счете, состоит из  $u$ - и  $d$ -кварков и электронов. А из космоса нас постоянно пронизывает поток нейтрино  $\nu_e$ .

### 8.3\*. Ускорители заряженных частиц

Современное достижение физики элементарных частиц обязательно в первую очередь конструированию таких мощных сооружений, как синхрофазотроны и коллайдеры. Первые успехи ядерной физики были достигнуты благодаря созданию семейства ускорителей: каскадного генератора Дж. Кокрофтом и Э.Уолтоном, электростатического генератора Р. Ван-де-Граафом, циклотрона Э. Лоуренсом.

Для исследования ядра необходимо иметь пучки ускоренных частиц, длина волны которых порядка размеров ядра. А это достигается для протонов при энергиях, превышающих десятки  $MэВ$ . В ускорителях частица с зарядом  $q = Ze$  ускоряется электрическим полем с напряжением  $U$  и приобретает энергию  $E = qU$ . В генераторе Ван-де-Граафа создается такое высокое электростатическое напряжение. А в остальных ускорителях используется механизм многократного действия, когда частица разгоняется переменными электрическими полями.

В циклических ускорителях это достигается с помощью магнитного поля, которое закручивает траекторию частицы, и она снова проходит через ускоряющее электрическое поле. Когда частица с массой  $m$ , зарядом  $Q$  и скоростью  $V$  влетает в поперечное магнитное поле  $B$ , то она будет двигаться по окружности с радиусом

$$R = mv / qB. \quad (8.4)$$

При этом радиус окружности увеличивается с ростом скорости частицы. А период обращения

$$T_{ц} = 2\pi m / qV \quad (8.5)$$

остается постоянным, а также постоянна частота обращения частицы по круговой орбите

$$\omega = 2\pi / T_{ц} = qB / m \quad (8.6)$$

Для того, чтобы частица непрерывно ускорялась, необходимо, чтобы она попадала в ускоряющий промежуток между дуантами в тот момент, когда электрическое поле изменит свою полярность, т.е. частота изменения полярности ускоряющего электрического поля должна совпадать с частотой циклотрона.



**Лоуренс Эрнест Орландо (1901-1958)** – американский физик, учился в Миннесотском, Чикагском и Йельском ун-тах. Работал в Калифорнийском ун-те в Беркли, с 1936 – директор Радиационной лаборатории (ныне им. Лоуренса). В 1931 построил ускоритель – циклотрон, с помощью которого исследовал структуру атома, получил ряд радиоизотопов, которые использовал для лечения опухолей, щитовидной железы (Нобелевская премия, 1939). Инициатор использования ускоренных частиц в медицине – терапии злокачественных опухолей потоками частиц.

При ускорении частицы до более высоких энергий проявляется релятивистский эффект зависимости массы частицы от скорости и нарушается **условие синхронизации** (8.6). Можно восстановить синхронизацию, изменяя частоту электрического поля  $\omega = \omega(t)$  при постоянном магнитном поле  $B = const$ , что осуществляется в **фазотроне**, или как в **синхротроне** переменным магнитным полем  $B = B(t)$  при постоянной частоте  $\omega = const$ , а в **синхрофазотроне** используется одновременно переменная частота электрического поля  $\omega = \omega(t)$  и переменное во времени магнитное поле  $B = B(t)$ .

Такая синхронизация изменение магнитного поля или частоты с энергией разгоняемой частицы стала возможна благодаря открытию В. Векслером (Дубна) и независимо от него Э. Макмиллан в 1944-45 годах **принципа автофазировки**, позволяющий достигать релятивистских энергий ускоренных частиц. Открытие принципа автофазировки привело к появлению новых типов ускорителей - фазотронов, синхротронов, синхрофазотронов. Разработка **метода сильной фокусировки** позволила получать уникальные по своим параметрам пучки (с малыми поперечными размерами, высокой интенсивностью, большими энергиями)

За счет изменения магнитного поля удается обеспечить постоянство радиуса равновесной орбиты. Это позволяет изготавливать ускорительную камеру в форме кольца, что значительно уменьшает вес магнитов и тем самым резко удешевляет конструкцию.

Для того, чтобы избежать потерь энергии ускоренных частиц на движение центра инерции, строят ускорители на встречных пучках – **коллайдеры**. Можно говорить об ускорителе с неподвижной мишенью, эквивалентном коллайдеру. Если кинетическая энергия каждой из сталкивающихся частиц с одинаковыми массами  $m$  равна  $T_k$ , то кинетическая энергия  $T_\ominus$  частицы в эквивалентном ускорителе с неподвижной мишенью определяется выражением

$$T_\ominus = \frac{2}{mc^2}(T_k^2 + 2T_k mc^2). \quad (8.7)$$

Первые ускорители высоких энергий были построены в Дубне (ОИЯИ), вблизи Женевы (CERN) и Брукхейвене (BNL).

Приведем самые мощные ускорители России:

- В 1967 г. в Новосибирске в ИЯФ СО РАН был построен ускоритель на встречных электронных пучках, который в 1979 г. переконструирован на встречные электрон-позитронные пучки с энергией  $5,5 \times 5,5$  ГэВ, что эквивалентно ускорителю с неподвижной мишенью в  $1,2 \cdot 10^5$  ГэВ. В будущем планируется довести энергию до  $1000 \times 1000$  ГэВ ( $E_\ominus = 4 \cdot 10^9$  ГэВ).
- В 1967 г. ускоритель протонов ОИЯИ (Дубна) с  $E = 10$  ГэВ.
- В 1967 г. в Серпухове ускоритель протонов с энергией 76 ГэВ был в свое время самым мощным ускорителем в мире. Планируется довести его энергию до 3000 ГэВ с диаметром тоннеля 6000 м и сверхпроводящим электромагнитом.

В настоящее время самый мощный ускоритель протонов на  $1000 \times 1000$  ГэВ действует в США (г. Батавия, 1987), запущен в 1972 г. на энергию 500 ГэВ.

А в Европе самый мощный ускоритель построен в 1976 г. в ЦЕРН (Женева) с энергией 500 ГэВ.

Крупнейшие современные центры, предназначенные для исследования физики элементарных частиц, представляют собой многоцелевые комплексы из нескольких ускорителей, связанных между собой. Примером такого ускорительного комплекса является ЦЕРН (Женева). Схема комплекса приведена на рис. 8.7.

Самым крупным ускорителем этого комплекса является Большой Адронный Коллайдер LHC (Large Hadron Collider), на котором будут сталкиваться пучки ускоренных до энергии 7 ТэВ

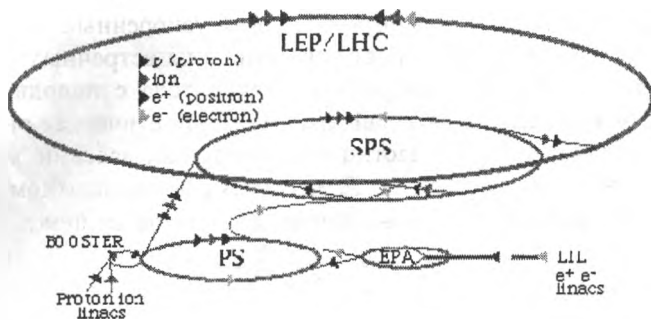


Рис. 8.7 Ускорительный комплекс ЦЕРН (Женева)

протонов, а также ядра свинца. Этот ускоритель сооружается в подземном кольцевом туннеле (его периметр 26.7 км) на месте другого недавно действовавшего крупнейшего  $e^+e^-$  - коллайдера. LEP - Large Electron Positron (Collider), ускорявшего электроны и позитроны до энергии 101 ГэВ.

Для инжекции протонов и ионов в LHC будет использоваться ускоритель SPS (Super Proton Synchrotron), на выходе которого протоны имеют энергию около 450 ГэВ. Его периметр 6.9 км и он расположен под землей на глубине 50 м. В SPS тяжелые частицы поступают от протонного синхротрона PS, в который в свою очередь протоны и ионы попадают из бустера (ускорителя-инжектора).

### Вопросы для закрепления знаний

1. Вычислите гиперзаряд нуклона и пи-мезонов и проверьте для них соотношение Гелл-Мана-Нишиджимы.
2. Из каких членов состоит барионный октет с  $J=1/2, B=1, C=0, b=0, t=0$ ?
3. Из каких членов состоит октет мезонов с  $J=0, B=0, c=0, b=0, t=0$ ?
4. Из каких членов состоит декуплет барионов с  $J=3/2, B=1, c=0, b=0, t=0$ ?
5. Какова кварковая структура протона, нейтрона,  $\pi^+$  и  $\pi^-$  мезонов?

6. Показать, что соотношение Гелл-Мана-Нишиджимы справедливо для кварков.
7. Барионы состоят из 3 кварков. Некоторые барионы имеют одинаковую кварковую структуру. В основном, они относятся к резонансам. Объясните, чем же они различаются.
8. Показать, что существуют следующие возможности получить бесцветные состояния при смешивании цветов кварков и антикварков:  $RGB$ ,  $\bar{R}\bar{G}\bar{B}$ ,  $RR\bar{R}$ ,  $GG\bar{G}$ ,  $B\bar{B}$  и что эти комбинации отвечают соответственно барионам, антибарионам и мезонам.
9. Объяснить, почему всего 8 глюонов, несмотря на то, что можно построить 9 комбинаций из цвета и антицвета глюонов?
10. Какие глюоны ответственны за взаимодействие зеленого и синего кварков?
11. Согласно современным представлениям бесструктурные частицы относят к фундаментальным частицам. Перечислите эти фундаментальные частицы.
12. В чем заключается принцип автофазировки, позволяющий достигать релятивистских энергий ускоренных частиц?
13. В чем преимущества коллайдеров на встречных пучках?

### Примеры решения задач

**Задача 8.1.** Следующие 8 легчайших барионов с  $J=1/2$ ,  $B=1$ ,  $C=0$ ,  $b=0$ ,  $t=0$ :

$N$  - нуклон с  $T=1/2$  и  $S=0$ ,

$\Lambda^0$  - лямда-гиперон с  $T=0$ ,  $S=-1$ ,

$\Sigma^{\pm,0}$  - сигма-гипероны с  $T=1$ ,  $S=-1$ ,

$\Xi^{-,0}$  - кси-гипероны с  $T=1/2$ ,  $S=-2$

составляют октет барионов. Вычислите для этого октета гиперзаряд и расположите все его члены на плоскости  $(T_3, Y)$  - проекции изоспина и гиперзаряда.

**Задача 8.2.** Найти энергию, приобретаемую протонами в электростатическом генераторе Ван-де-Граафа, если известно, что расстояние между центром заряжаемой сферы, диаметр которой  $d = 2 \text{ м}$ , и основанием генератора составляет  $L = 10 \text{ м}$ , а критическая напряженность электрического поля у поверхности сферы

$E_{кр} = 8 \text{ МВ/м}$ . Частицы ускоряются в вертикальной разрядной трубке в пространстве между сферой и основанием генератора. Для простоты считать, что сфера заряжена равномерно, а основание является проводящей плоскостью.

**Решение.** Энергия, приобретаемая протонами, равна работе по разгону заряда  $e$  электрическим полем

$$W = e \int_{d/2}^L E(r) dr \quad (1).$$

Напряженность электрического поля вне шара  $r \geq d/2$  определяется выражением  $E(r) = kq_{шар} / r^2$ . Заряд шара найдем из условия

$E_{кр} = kq_{шар} / (d/2)^2$  и подставим в (1)

$$W = eE_{кр} (d/2)^2 \int_{d/2}^L dr / r^2 = eE_{кр} d(2L - d) / 4L = 7,2 \text{ МэВ}$$

Как видим, максимальная энергия частиц в генераторе Ван-де-Граафа ограничена напряжением пробоя между шаром и окружающей средой.

**Задача 8.3.** Определить частоту  $f$ , приложенную к дуантам разности потенциалов в циклотроне для протонов, дейтронов и  $\alpha$ -частиц. Магнитная индукция поля  $B = 1,26 \text{ Тл}$ .

**Решение:** На заряженную частицу в циклотроне действует сила Лоренца  $F_L = qvB \sin \alpha$ , где  $q$  - заряд частицы,  $B$  - индукция магнитного поля. Под действием этой силы, которая направлена под углом  $\alpha = \pi/2$ , частица движется по окружности радиуса  $R$ . Тогда сила Лоренца

$$F_L = qvB \quad (1).$$

Она является центростремительной силой и сообщает частице центростремительное ускорение  $a_{цс} = v^2 / R$ . По закону Ньютона

$$F_L = ma_{цс} = mv^2 / R \quad (2).$$

Приравняв правые части уравнений (1) и (2), получим

$$qvB = mv^2 / R,$$

откуда имеем

$$R = mv / qB$$



- радиус окружности циклотрона увеличивается с ростом скорости вращения частицы. Период обращения циклотрона

$$T_{ц} = L/v,$$

где  $L = 2\pi R = 2\pi mv/qB$  - длина окружности циклотрона. Тогда период обращения  $T_{ц} = 2\pi m/qB$  и частота обращения частицы по круговой траектории

$$f = 1/T_{ц} = qB/2\pi m.$$

Подставляя числовые данные, получим  $f_p = 19,2$  МГц,

$f_d = 9,6$  МГц,  $f_{\alpha} = 9,6$  МГц.

**Задача 8.4.** Ионный ток в циклотроне при работе с  $\alpha$ -частицами  $I = 15$  мкА. Во сколько раз такой циклотрон продуктивнее массы  $m = 1$  г радия  $^{226}\text{Ra}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 1600$  лет.

**Решение:** По определению ионный ток в циклотроне

$$I = qn \quad (1)$$

где  $n$  - число ускоренных частиц, испускаемых циклотроном в 1 с,

а  $q = 3,2 \cdot 10^{-19}$  Кл - заряд  $\alpha$ -частицы. Активность излучения  $\alpha$ -частиц радием равна

$$A = \lambda N \quad (2)$$

где  $N = mN_A/\mu$  (3)

- число делящихся ядер радия,  $\mu = 226$  г/моль - молярная масса

радия,  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$  - число Авогадро. Постоянная распада равна

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2} \quad (4)$$

Подставляя (3) и (4) в (2), получим

$$A = mN_A \ln 2 / \mu T_{1/2} \quad (5)$$

Из формулы (1) имеем

$$n = I/q \quad (6)$$

Разделив (6) на (5), находим

$$\frac{n}{A} = \frac{IT_{1/2}\mu}{mqN_A \ln 2} = 1270.$$

**Задача 8.5.** В фазотроне увеличение массы частицы при возрастании ее скорости компенсируется уменьшением частоты ускоряющего поля, а магнитная индукция фазотрона остается не измененной. Найти конечную частоту ускоряющего поля для ускорения протонов до энергии  $W = 300 \text{ МэВ}$ , если начальная частота  $f_0 = 25 \text{ МГц}$  и магнитная индукция  $B = 1,62 \text{ Тл}$ .

**Решение:** Центробежной силой в циклотроне является сила Лоренца

$$mv^2 / R = qvB.$$

Отсюда магнитная индукция поля циклотрона равна

$$B = 2\pi mf / q \quad (1)$$

Так как магнитная индукция в начале и конце ускорения остается постоянной, то

$$B = 2\pi m_0 f_0 / q = 2\pi mf / q,$$

откуда имеем

$$m_0 f_0 = mf \quad (2)$$

Конечная частота равна

$$f = (m_0 c^2 / mc^2) f_0 \quad (3).$$

Масса покоя протона  $m_0 c^2 = 938,27 \text{ МэВ}$ , кинетическая энергия ускоренного протона  $W = mc^2 - m_0 c^2$ . Следовательно, конечная

частота равна

$$f = \frac{m_0 c^2}{m_0 c^2 + W} f_0 = 18,9 \text{ МГц}.$$

**Задача 8.6.** Крупнейшим построенным протон-антипротонным коллайдером является TEVATRON (Лаборатория им. Ферми, США). Энергия каждого из его пучков 1000 ГэВ (1 ТэВ). Определить энергию пучка протонов эквивалентного ускорителя с неподвижной мишенью.

**Решение:** Выпишем реакцию рождения протон-антипротон в реакции столкновения встречных пучков протонов

$$p_1 + p_2 \rightarrow p'_1 + p'_2 + p'_3 + \bar{p}'_4 \quad (1)$$

и закон сохранения энергии этой реакции

$$E_1 + E_2 = E'_1 + E'_2 + E'_3 + E'_4$$

В релятивистском случае кинетическая энергия частицы связана с полной энергией следующим образом  $T = E - mc^2$ .

Определим энергию реакции  $Q$ :

$$Q = \sum_i^2 m_i c^2 - \sum_i^4 m_i' c^2 = \sum_i^4 T_i' - \sum_i^2 T_i < 0 \quad (2)$$

Очевидно, реакция идет с поглощением энергии и происходит при энергиях выше пороговой

$$E_{\text{пор}} = (T_1 + T_2)_{\text{min}} = (T_1' + T_2' + T_3' + T_4')_{\text{min}} - Q \quad (3)$$

Величина порога зависит от системы координат. Она минимальна в системе центра инерции (СЦИ), где

$$E_{\text{пор}}(\text{СЦИ}) = -Q = |Q| \quad (4)$$

Действительно, в СЦИ центр инерции покоится и сумма импульсов частиц (как до, так и после реакции) равна нулю

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_1' + \vec{p}_2' + \vec{p}_3' + \vec{p}_4' = 0$$

Это выполняется и в частном случае, когда  $T_1' + T_2' + T_3' + T_4' = 0$ , т.е. когда  $T_1' = T_2' = T_3' = T_4' = 0$ . Когда образовавшиеся частицы покоятся друг относительно друга, порог минимален.

Получим пороговую энергию в лабораторной системе координат (ЛСК). В ЛСК в реакции (1) частица 1 движется, а частица 2 покоится. Запишем законы сохранения импульса и энергии

$$\begin{aligned} \vec{p}_1 &= \vec{p}_1' + \vec{p}_2' + \vec{p}_3' + \vec{p}_4' \\ E_1 &= E_1' + E_2' + E_3' + E_4' \end{aligned} \quad (5)$$

где полные энергии  $E$ , связаны с соответствующими импульсами релятивистскими соотношениями  $E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$ .

В теории относительности величина

$$\left( \sum_i E_i \right)^2 - \left( \sum_i \vec{p}_i \right)^2 c^2 = \text{inv} \quad (6)$$

т. е. одинакова во всех инерциальных системах координат. Теперь воспользуемся тем, что «на пороге» все частицы в конечном состоянии в СЦИ покоятся относительно друг друга, и вычислим инвариант в начальном состоянии в лабораторной системе, а в конечном состоянии - в системе центра инерции. В результате получим

$$(E_1 + m_2 c^2)^2 - \vec{p}_1^2 c^2 = \left( \sum_i^4 m_i' \right)^2 c^4 \quad (7)$$

Теперь выразим импульс первой частицы через ее полную энергию

$$\vec{p}_1^2 c^2 = E_1^2 - m_1^2 c^4 \quad (8)$$

и перейдем от полной энергии к кинетической

$$E_1 = m_1 c^2 + T_1 \quad (9)$$

Подставим (9) в (8) и (7) и учтем, что вошедшая в левую часть соотношения (7) величина отвечает порогу в ЛСК, т. е. она является минимально возможной кинетической энергией в этой системе  $(T_1)_{\min}$ , а значит это пороговая энергия  $E_{\text{пор}}$  в ЛСК. Нетрудно получить окончательную формулу для пороговой кинетической энергии налетающей частицы в ЛСК:

$$E_{\text{пор}}(\text{ЛСК}) = (T_1)_{\min} = \frac{(\sum_i^4 m_i')^2 c^4 - (\sum_i^2 m_i)^2 c^4}{2m_2 c^2} \quad (10)$$

С учетом (2) выражение (10) можно представить в виде

$$E_{\text{пор}}(\text{ЛСК}) = |Q| \left( 1 + \frac{m_1}{m_2} + \frac{|Q|}{2m_2 c^2} \right) \quad (11)$$

Из (4) имеем минимальную кинетическую энергию протонов ускорителя на встречных пучках

$$E_{\text{пор}}(\text{СЦИ}) = T_k = |Q|, \quad (12)$$

и на основании (11) обозначим эквивалентную энергию протонов ускорителя с неподвижной мишенью

$$E_{\text{пор}}(\text{ЛСК}) = T_{\text{Э}} \quad (13)$$

получим связь между ними при  $m_1 = m_2$

$$T_{\text{Э}} = \frac{2}{mc^2} (T_k^2 + 2T_k mc^2) \quad (14)$$

Подставляя в (14) числовые данные:  $mc^2 = 938,27 \text{ МэВ} \approx 10^3 \text{ МэВ}$ , а кинетическая энергия ускоренных протонов коллайдером  $T_k = 10^6 \text{ МэВ}$ , получим

$$T_{\text{Э}} = 2 \cdot 10^{-3} (10^{12} + 2 \cdot 10^6 \cdot 10^3) \approx 6 \cdot 10^9 \text{ МэВ}.$$

Следовательно, энергия протонов в 1 ТэВ коллайдера эквивалентна энергии 6000 ТэВ ускорителя с неподвижной мишенью.

### Задание для самостоятельной работы

**Задача 8.7.** Следующие 8 стабильных мезонов с  $J=0$ ,  $B=0$ ,  $c=0$ ,  $b=0$ ,  $t=0$ :

$\pi^{\pm,0}$  - пи-мезоны с  $T=1$ ,  $S=0$ ,

$\eta^0$  - эта-мезон с  $T=0$ ,  $S=0$ ,

$K^{+,0}$  - странные ка-мезоны с  $T=1/2$ ,  $S=1$ ,

$\bar{K}^{+,0}$  - странные анти-ка мезоны с  $T=1/2$ ,  $S=-1$

составляют октет мезонов. Вычислите для них гиперзаряд и расположите их на плоскости с осями координат  $(T_3, Y)$  - проекции изоспина и гиперзаряда.

**Задача 8.8.** Рассмотреть взаимодействие зеленого и красного кварков. Определить цветовые характеристики глюонов, ответственные за это взаимодействие.

**Задача 8.9.** Максимальный радиус траектории частиц в циклотроне  $R = 35$  см, а частота приложенной к дуантам разности потенциалов  $f = 13,8$  МГц. Найти магнитную индукцию  $B$  поля, необходимую для синхронной работы циклотрона, и максимальную энергию  $W$  вылетающих протонов.

**Ответ:**  $B = 0,9$  Тл,  $W = 4,8$  МэВ.

**Задача 8.10.** Протоны ускоряются в фазотроне до энергии  $W = 660$  МэВ. Во сколько раз необходимо увеличить период ускоряющего поля фазотрона для того, чтобы скомпенсировать увеличение массы?

**Ответ:**  $T/T_0 = 1,7$

**Задача 8.11.** Крупнейшим электрон-позитронным коллайдером является LEP (CERN, Швейцария). Энергия каждого из его пучков достигает 100 ГэВ. Определить энергию пучка электронов эквивалентного ускорителя с неподвижной мишенью.

**Ответ:**  $T_3 = 4 \cdot 10^7$  ГэВ =  $4 \cdot 10^4$  ТэВ = 40 ПэВ.

## Глава 9. Великое объединение. Современное представление о структуре материи

### 9.1 Обменный характер фундаментальных взаимодействий

Во все времена мыслители стремились свести многообразие природы к минимальному числу фундаментальных концепций. Уже в древности поднимался вопрос о составных элементах материи, и теперь этот вопрос актуален. Существование в физике нескольких фундаментальных взаимодействий: электромагнитного, слабого, сильного и гравитационного – вызывает желание их упорядочить, объединить и построить единую теорию.

Как известно, еще исследования Фарадея и Максвелла выявили, что два разных явления: электрические и магнитные – родственны, и они были объединены одним понятием электромагнитного поля в единую теорию – **электродинамику**. В дальнейшем А. Эйнштейн, построив теорию гравитации, известную под названием общей теории относительности, в течение второй половины жизни пытался объединить гравитационное и электромагнитное поля, построить **единую теорию этих полей**, но безрезультатно. Также В. Гейзенберг посвятил свои два последних десятилетия построению единой теории материи, и безуспешно.

И только в 1967г. удалось несколько продвинуться в этом направлении – построить единую теорию **электрослабого** взаимодействия, объединив теории электромагнитного и слабого взаимодействий. Это стало возможным после построения квантовой электродинамики и выяснения общего механизма фундаментальных взаимодействий, что все они имеют **обменный характер**. Эти исследования продолжают дальше, в направлении объединения всех взаимодействий, включая сильное взаимодействие и даже гравитационное. Это направление исследований получило название **Великого объединения и Суперобъединение**. Прежде чем познакомиться с этими работами необходимо знакомство с современным состоянием теории электромагнетизма – с квантовой электродинамикой.

## 9.2 Квантовая электродинамика. Диаграммы Фейнмана

Квантовая теория электромагнитных взаимодействий, называемая **квантовой электродинамикой**, была создана работами С. Тононага, Р. Фейнмана и Ю. Швингера, за что они удостоены Нобелевской премии за 1965 г.

Электромагнитное взаимодействие между электрически заряженными частицами осуществляется через электромагнитное поле этих частиц. С квантовой точки зрения электромагнитное взаимодействие осуществляется отдельными **элементарными актами**, состоящими из акта испускания и поглощения фотонов, т.е. обмена фотонами между заряженными частицами. Эти элементарные акты удобно представить графически **диаграммами Фейнмана**, которые символически представлены на рис.9.1. Сплошными линиями представлены фермионы: электроны и позитроны. Для различения частиц от античастиц указана ось времени: вдоль оси времени движутся частицы, противоположно античастицы. Бозоны, в частности фотоны, представлены волнистой линией. Так как фотон и антифотон совпадают, то волнистые линии не снабжаются стрелками направления распространения. Эти элементарные акты-процессы, имеющие только одну точку-вершину, в реальности не могут протекать, так как запрещены законами сохранения энергии и импульса.

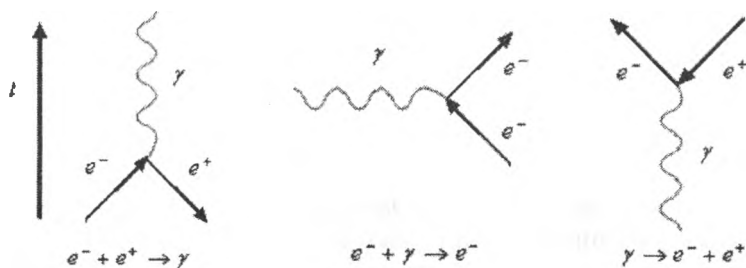
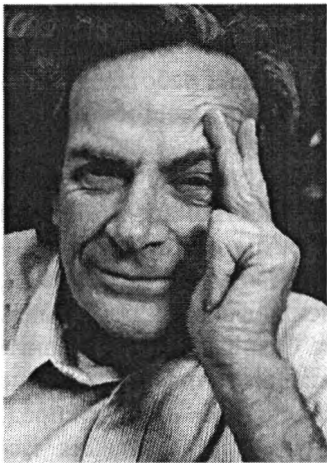


Рис.9.1. Элементарные акты-процессы

Для доказательства этого положения рассмотрим конкретный процесс рождения пары электрона и позитрона из одного фотона:

$$\gamma = e^- + e^+.$$



**Фейнман Ричард Филип** – американский физик-теоретик, родился в 1918 г. в Нью-Йорке, окончил Массачусетский технологический ин-т (1939), работал в Принстонском, Корнеллском, Калифорнийском ун-тах, в 1943-45 – в Лос-Аламосской лаб-рии. В 1948 независимо от Ю. Швингера и С. Томанаги построил современную квантовую электродинамику (Нобелевская премия, 1965). Разработал способ объяснения возможных превращений частиц – диаграммы Фейнмана. Вместе с Гелл-Маном создал количественную теорию слабых взаимодействий. Предложил партонную модель нуклона.

Выпишем законы сохранения энергии:

$$h\nu = 2 \frac{m_e c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (9.1)$$

и импульса

$$P_\gamma = P_e \cos \alpha + P_{e^-} \cos \alpha$$

или

$$\frac{h\nu}{c} = 2 \frac{mv \cos \alpha}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (9.2)$$

Разделив (9.1) на (9.2), получим

$$c = \frac{c^2}{v \cos \alpha}, \quad \text{или} \quad c = v \cos \alpha,$$

что невозможно, так как  $c > v$ . Элементарные процессы являются **виртуальными процессами** – они входят в качестве составных элементов во все реальные электромагнитные процессы. В реальности могут осуществляться процессы, состоящие из двух и более элементарных актов, так называемые процессы второго и выше порядков. На рис. 9.2 представлены реальные процессы второго порядка: рассеяние электрона на электроне, рассеяние фотона на электроне, аннигиляция электрона и позитрона с образованием двух фотонов и образование пары электрона и позитрона из двух фотонов. Из первого процесса явно следует, что электромагнитное



взаимодействие имеет **обменный характер** - рассеяние электрона на электроне происходит за счет обмена фотоном между электронами.

Диаграммы второго порядка имеют уже две вершины, в которых сходятся линии. Эти вершины соответствуют взаимодействию частиц. Линии, один из концов которых свободный, соответствуют свободным частицам. Линии, соединяющие две вершины, соответствуют виртуальным частицам. Взаимодействие двух частиц происходит через обмен виртуальным фотоном, для которого

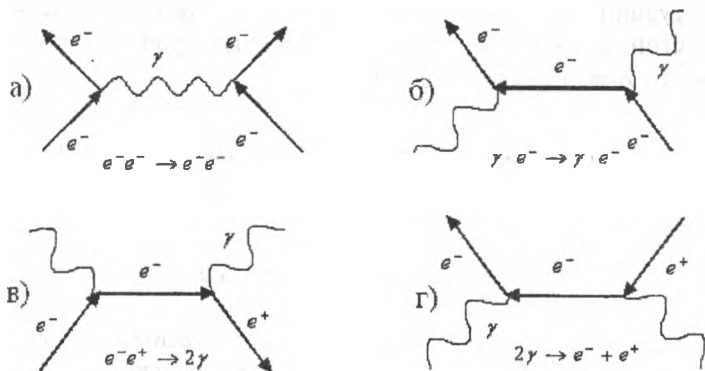


Рис.9.2. Диаграммы Феймана для реальных процессов: а - рассеяние электрона на электроне, б - рассеяние фотона на электроне, в - аннигиляция электрона и позитрона с образованием двух фотонов и г - образование пары электрона и позитрона из двух фотонов.

может нарушаться закон сохранения энергии на величину  $\Delta E$  на время  $\Delta t \leq \hbar / \Delta E$ , определяемое через соотношение неопределенностей  $\Delta E \Delta t \leq \hbar$ . За это время виртуальная частица может удалиться на расстояние

$$R = c \cdot \Delta t = \frac{\hbar}{mc}, \quad (9.3)$$

которое определяет радиус действия взаимодействия. Таким образом, радиус действия взаимодействия тем больше, чем меньше мас-

са виртуальной частицы. Для фотона с нулевой массой  $m_\gamma = 0$  имеем бесконечный радиус действия электромагнитных взаимодействий  $R_{\text{эл.м}} \approx \infty$ .

Из элементарных графов можно построить более сложные диаграммы Фейнмана. Из множества диаграмм рассмотрим лишь следующие. На рис.9.3 приведена диаграмма, соответствующая **флуктуациям вакуума**, в котором постоянно происходят виртуальные процессы рождения электрон-позитронной пары и ее аннигиляция. Эти флуктуации указывают на то, что физический вакуум не является пустотой, а в ней происходят виртуальные процессы, которые обуславливают **поляризацию вакуума**.



Рис.9.3. Поляризация вакуума

На рис 9.4. представлена диаграмма, соответствующая распространению электрона, который испускает виртуальный фотон, из фотона рождается электрон-позитронная пара, затем происходит ее аннигиляция с рождением фотона, который поглощается электроном. Такие виртуальные процессы одевают «голый» электрон в «шубу».

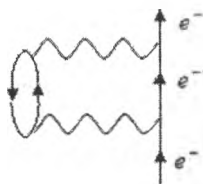


Рис. 9.4. Одевание электрона в «шубу»

Эти виртуальные процессы определяют размер области локализации электрона. Действительно, задавая неопределенность энергии электрона порядка его энергии покоя  $\Delta E \approx mc^2$ , имеем неопреде-

ленность в импульсе порядка  $\Delta p \approx \Delta E/c \approx mc$ . Из соотношения неопределенностей получаем неопределенность локализации электрона  $\Delta r \approx \hbar / \Delta p \approx \hbar / mc$ , а это есть комptonовская длина волны электрона

$$\lambda_e = \frac{\hbar}{m_e c}. \quad (9.4)$$

Т.е. электрон не может быть локализован с точностью, превышающей комptonовской длины волны, в пределах которого электрон, испуская и поглощая фотон, «дрожит», перескакивая из одной точки в пространстве в другую.

Диаграммы Фейнмана не только наглядно представляют возможный процесс, но и позволяет рассчитать вероятность любого процесса в рамках квантовой электродинамики. В квантовой электродинамике исходят из гамильтониана системы электронов, которые взаимодействуют через электромагнитное поле

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_{вз}, \quad (9.5)$$

где  $\hat{H}_0$  - гамильтониан свободных электронов и фотонов,  $\hat{H}_{вз} = e \langle \psi^+ \Gamma_\mu \psi \rangle \hat{A}_\mu$  - взаимодействие 4-мерного тока  $\hat{j}_\mu = e \langle \psi^+ \Gamma_\mu \psi \rangle$  с электромагнитным полем  $A^\mu = (i\phi, \vec{A})$ . Каждой вершине диаграммы соответствует оператор взаимодействия. Например, процесс поглощения и излучения фотона электроном, показанный на рис.9.1, описывается оператором взаимодействия

$$\hat{H}_{вз} = e \langle \psi^+ \Gamma_\mu \psi \rangle \hat{A}_\mu,$$

где оператор  $\hat{A}_\mu$  рождает (поглощает) фотон, оператор  $\psi$  уничтожает электрон в начальном состоянии,  $\psi^+$  - рождает электрон в конечном состоянии, оператор  $\Gamma_\mu$  - спинорная матрица, действующая на спиновые переменные, а множитель  $e$  - электрический заряд рассматривают как интенсивность взаимодействия. Так как последняя мала (точнее безразмерный параметр  $\alpha = e^2 / \hbar c = 1/137$  - постоянная тонкой структуры), то гамильтониан взаимодействия  $\hat{H}_{вз}$  рассматривают как возмущение, т.е. можно воспользоваться теорией возмущения, и решение задачи значительно упрощается.

Для релятивистского электрона уравнение Шредингера заменяется уравнением Дирака

$$i\gamma_{\mu} \frac{\partial \psi}{\partial x_{\mu}} - \kappa \psi = 0, \quad (9.6)$$

где  $\gamma_{\mu}$  - 4-мерная матрица Дирака, параметр  $\kappa = mc/\hbar$  связан с массой частицы.

В микромире не возможно проследить за распространением отдельной частицы, большей частью определяют вероятность определенного процесса. В качестве примера рассмотрим сечение комptonовского рассеяние фотона на электроне, представленное на рис.9.2.б. Сечение рассеяния определяется квадратом матричного элемента оператора возмущения  $\hat{H}_{вз}$ . Впервые расчет сечения комptonовского рассеяния фотона на электроне провели О. Клей и У. Нишина (1929 г.) и И. Е. Тамм (1930 г.). Здесь не приводим полученное ими громоздкое выражение, а только оценим значение сечения. Сечение рассеяния на электроне пропорционально квадрату его размера. Характерным размером электрона может служить комptonовская длина волны электрона  $\lambda_e$ . Рассматриваемая диаграмма имеет две вершины, каждая вершина дает вклад, пропорциональный интенсивности взаимодействия  $\alpha$ . В итоге получаем оценочное значение сечения рассеяния фотона на электроне:

$$\sigma_c \approx \alpha^2 \lambda_e^2 = \left( \frac{e^2}{\hbar c} \right)^2 \left( \frac{\hbar}{mc} \right)^2 = \left( \frac{e^2}{mc^2} \right)^2 = r_e^2, \quad (9.7)$$

где  $r_e = \frac{e^2}{mc^2}$  - классический радиус электрона.

Благодаря достижениям экспериментальной физики были обнаружены новые явления, которые не укладывались в прежнюю теорию Дирака. Было обнаружено небольшое смещение в уровнях атома водорода (лэмбовский сдвиг) и небольшое отличие магнитного момента электрона от боровского значения. Для теоретического описания этих явлений необходимо было учитывать высшие порядки теории возмущения, т.е. учитывать вклад более сложных диаграмм с большим числом узлов. Но их учет приводил к бесконечным значениям, так называемым **расходимостям**. Эту пробле-

му можно сравнить с ультрафиолетовой катастрофой, с которой встретились в оптике при описании излучения абсолютно черного тела. Для устранения расходимостей была разработана специальная методика (проблема перенормировки) и создана современная квантовая электродинамика, которая позволяет рассчитать любой процесс с электромагнитным взаимодействием со сколь угодно высокой точностью.

Аномальный магнитный момент электрона объяснили взаимодействием электрона с поляризацией вакуума, и результат теоретических вычислений магнитного момента электрона совпадает с экспериментальным значением до 10 значащих цифр. При этом точность ограничена не точностью вычислений, а ошибками измерений. К настоящему времени справедливость квантовой электродинамики проверена на экспериментах с ускорителями электронов до расстояний  $10^{-18}$  м. Эта теория служит эталоном, по которому сейчас строятся теории всех других фундаментальных взаимодействий.

### 9.3 Электрослабое взаимодействие и промежуточные бозоны

Слабое взаимодействие характеризуется очень малым радиусом действия, малой интенсивностью и относительно большими временами протекания этих процессов и, следовательно, большими в рамках микромира временами жизни частиц, участвующих в этих взаимодействиях. Как известно, отличительной чертой слабого взаимодействия является явление несохранения пространственной четности. Оказалось, что не сохраняются в процессах слабого взаимодействия и новые квантовые числа, как странность и др.

Первоначальная теория  $\beta$ -распада нуклонов была построена итальянским физиком-теоретиком Э. Ферми в 1934 г. по аналогии с квантовой электродинамикой. Но впоследствии были открыты новые слабые процессы с участием  $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$  - лептонов и оказалось, что нейтрино, участвующие в этих процессах, различны  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ . Теория Ферми была обобщена и превратилась в теорию слабого взаимодействия элементарных частиц. А затем с установлением представлений о кварковой структуре адронов эта теория была совершенствована. Было выяснено, что в слабом взаимодействии уча-

ствуют не сами нуклоны, а отдельные составляющие кварки, и число кварков и лептонов должно совпадать. Далее, теория Ферми рассматривала слабый процесс, как контактный процесс, на диаграмме Фейнмана имеющий одну вершину. Эта теория встретила с непреодолимой проблемой неперенормируемости, приводящей к расходимостям.

Важным шагом на этом пути была теория, предложенная Ю. Швингером в 1957 г., в которой постулировалось существование новых частиц, играющих роль фотонов в электромагнитных взаимодействиях, именуемых **промежуточными бозонами**  $W^+$ ,  $W^-$  и  $Z^0$ . Элементарными актами слабого взаимодействия являются процессы испускания и поглощения промежуточных бозонов фермионами: лептонами и кварками. Как и фотоны, промежуточные бозоны являются векторными частицами со спином  $J=1$  (четность не приписывается, так как она не сохраняется). Но в отличие от фотонов, они отличаются короткодействием, следовательно, обладают большой массой, и для обеспечения закона сохранения электрического заряда могут обладать и электрическим зарядом.

Приведем диаграмму Фейнмана для распада нейтрона

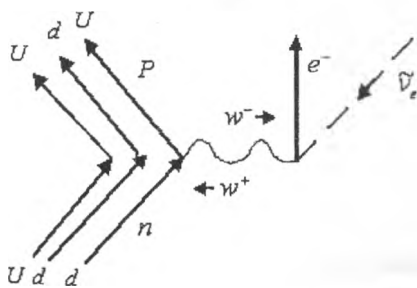
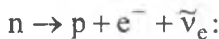


Рис.9.5. Распад нейтрона в кварковой схеме

Распад нейтрона происходит через две стадии и описывается двух-вершинной диаграммой Фейнмана. На первой стадии испускается  $W^-$  (или поглощается  $W^+$ ) - промежуточный бозон по схеме

$$d(q = -1/3) \rightarrow u(q = +2/3) + W^-, \quad (9.8)$$

где d-кварк превращается в u-кварк с испусканием  $W^-$  - бозона (или поглощением  $W^+$  - бозона, если смотреть в противоположном направлении). Затем  $W^-$  - бозон распадается с испусканием электрона и антинейтрино:

$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e. \quad (9.9)$$

При этом промежуточный бозон может менять сорт (аромат) кварка, но не цвет кварка, т.е. промежуточный бозон не обладает цветом.

Теория предсказывала очень большие массы промежуточных бозонов  $m_W \approx 80 \text{ ГэВ}$ ,  $m_Z \approx 90 \text{ ГэВ}$ , для сравнения напомним массу протона  $m_p \approx 980 \text{ МэВ} \approx 1 \text{ ГэВ}$ . Поэтому для генерации промежуточных бозонов требуются огромные энергии. Специально для открытия промежуточных бозонов был построен в ЦЕРНе коллайдер со встречными  $p - \bar{p}$  - пучками с энергией  $270 \times 270 \text{ ГэВ}$ . Коллайдер был запущен в 1983 г. и были зарегистрированы первые промежуточные бозоны. За это открытие Нобелевской премии удостоились в 1984 году К. Руббиа – руководитель научного проекта и С. Ван дер Меер – создатель метода стохастического охлаждения антипротонов. Экспериментальные значения масс промежуточных бозонов оказались равными  $m_W \approx 81 \pm 2 \text{ ГэВ}$ ,  $m_Z \approx 94 \pm 2 \text{ ГэВ}$ , полностью согласующимися с предсказаниями теории.

Таким образом, выяснилось, что электромагнитное взаимодействие и слабое взаимодействие имеют много общих черт. Главное сходство в том, что они имеют обменный характер. Переносчиками этих взаимодействий являются векторные частицы со спином  $J = 1$ : фотоны в электромагнитном взаимодействии и промежуточные бозоны в слабом взаимодействии. Это сходство указывало на то, что их можно объединить на единой основе.

Такое **единое описание слабого и электромагнитного взаимодействий** предложили в 1967 году С. Вайнберг и А. Салам. Но эта теория не сразу была принята физиками. Общее признание она получила после подтверждения на опыте многочисленных предсказаний. И только в 1979 г. они удостоились Нобелевской премии.

Теория Вайнберга и Салама в математическом отношении очень сложна для общедоступного изложения. Поэтому ограничимся указанием основных концепций этой теории, которыми являются: а) локальная калибровочная инвариантность, б) спонтанное нарушение симметрии и в) перенормируемость теории.

Требование калибровочной инвариантности основного уравнения поля означает, что уравнение Дирака не должно изменяться при глобальном калибровочном преобразовании операторов поля:

$$\Psi(X) = e^{-iq\alpha} \Psi(X). \quad (9.10)$$

Из этого требования следует закон сохранения параметра  $q$  - электрического заряда. Но в релятивистской теории глобальное калибровочное преобразование заменяется локальным калибровочным преобразованием

$$\Psi(X) = e^{-iq\alpha(X)} \Psi(X), \quad (9.11)$$

где фаза  $\alpha(X)$  зависит от локальной точки  $X$ . Требование локальной калибровочной инвариантности приводит к необходимости введении векторной функции  $A(X)$ , называемой **калибровочными полями**. При наложении на эти функции необходимых требований таких, как релятивистской инвариантности и градиентной инвариантности, функции  $A(X)$  оказываются 4-мерным потенциалом электромагнитного поля и подчиняются уравнениям Максвелла.

В теории Вайнберга и Салама идея локальной калибровочной инвариантности обобщается на изоспиновое преобразование, и в результате требования инвариантности возникают четыре безмассовые векторные калибровочные поля: триплет  $\vec{A} = (A_1, A_2, A_3)$  и синглет  $B$ . Затем по идеологии спонтанного нарушения симметрии смешивают калибровочные поля в следующие комбинации:

$$W^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} (A_1 \pm iA_2), \quad (9.12)$$

$$Z^0 = -B \sin \theta_w + A_3 \cos \theta_w, \quad (9.13)$$

$$\gamma = B \cos \theta_w + A_3 \sin \theta_w. \quad (9.14)$$



Здесь  $\theta_w$  - угол Вайнберга является параметром, значение которого эксперименты с участием нейтрино дают  $\theta_w \approx 30^\circ$ . Частицы  $W^\pm$  и  $Z^0$  за счет механизма Хиггса обретают массы и отождествляются с промежуточными бозонами, частица  $\gamma$  остается безмассовой и отождествляется с фотоном. Массы промежуточных бозонов выражаются через угол Вайнберга  $\theta_w$ , постоянную Ферми  $G$  и постоянную тонкой структуры  $\alpha$  :

$$m_w = \frac{1}{\sin \theta_w} \left( \frac{\pi \alpha}{\sqrt{2G}} \right) \approx 80 \text{ ГэВ}, \quad (9.15)$$

$$m_z = \frac{m_w}{\cos \theta_w} \approx 90 \text{ ГэВ}. \quad (9.16)$$

Теория оказывается перенормируемой только тогда, число ароматов кварков (6) равно общему числу лептонов, то есть когда имеет место **кварк – лептонная симметрия**.

Одно из крупнейших достижений теории Вайнберга и Салама – единое описание слабого и электромагнитного взаимодействий. Переносчики этих взаимодействий – промежуточные бозоны и фотоны – имеют общее происхождение и тесно связаны друг с другом. Интенсивность их взаимодействий характеризуется одной и той же фундаментальной константой  $e$ . Причиной малой интенсивности слабого взаимодействия является то, что массы промежуточных бозонов очень большие. Это взаимодействие слабо при малых энергиях, но в области  $E > m_w c^2$  его интенсивность сравнивается с интенсивностью электромагнитного взаимодействия.

#### 9.4 Сильное взаимодействие. Квантовая хромодинамика

В сильном взаимодействии участвуют адроны: барионы и мезоны. Лептоны и фотоны в нем не участвуют. Первоначально, когда были известны из адронов только нуклоны и пионы, пытались построить теорию сильного взаимодействия по образцу квантовой электродинамики: нуклоны рассматривались как аналоги электрона, а пионы как аналог фотона. При таком подходе ядерные силы возникают как результат обмена нуклонов пионами. Такая теория

встретилась с трудностью - константа сильного взаимодействия  $g/\hbar c > 1$  оказалась не малой, и не применима теория возмущений. Только после успехов теории электрослабого взаимодействия, когда выяснилась плодотворность концепции кварков, были заложены основы новой теории сильного взаимодействия – **квантовой хромодинамики**. Квантовая хромодинамика исходит из следующих основных положений:

1. Адроны состоят из кварков, которые имеют 6 ароматов ( $u, d, s, c, b, t$ ) и 3 цвета (R,G,B).
2. Барионы состоят из 3 кварков разных цветов, а мезоны из кварка и антикварка с одинаковым цветом.
3. Переносчиками сильного взаимодействия являются глюоны  $g$  (glue – клей), которые имеют следующие характеристики:

$$J^\pi = 1^-, m = 0, L = 0, B = 0, T = 0, S = 0, C = 0, q = 0.$$

4. Глюоны состоят из цвета и антицвета:

$$\begin{aligned} g_1 &= \tilde{R}G, & g_2 &= \tilde{R}B, & g_3 &= \tilde{G}R, \\ g_4 &= \tilde{G}B, & g_5 &= \tilde{B}R, & g_6 &= \tilde{B}G, \\ g_7 &= \frac{1}{\sqrt{2}}(\tilde{R}R - \tilde{G}G), & g_8 &= \frac{1}{\sqrt{6}}(\tilde{R}R + \tilde{G}G - 2\tilde{B}B), \\ g_9 &= \frac{1}{\sqrt{3}}(\tilde{R}R + \tilde{G}G + \tilde{B}B). \end{aligned} \quad (9.17)$$

Последняя комбинация  $g_9$  является цветовым синглетом и к глюонам не относится. Таким образом, кварков всего 8, из которых 6 недиагональных, изменяющих цвет кварков, и 2 диагональных – не меняющих цвет кварков. Недиagonalные глюоны изменяют цвет кварка по следующей схеме:

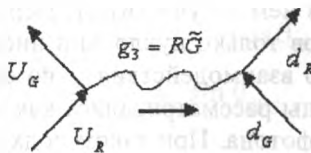


Рис.9.6. Диаграмма Фейнмана для взаимодействия кварков

Красный  $u$ -кварк превращается в зеленый  $u$ -кварк, испуская  $g_3 = \bar{G}R$  глюон, который поглощается зеленым  $d$ -кварком, и последний превращается в красный  $d$ -кварк. В результате обмена глюоном  $u$ - и  $d$ -кварки рассеиваются друг на друга. Следовательно, ядерные силы осуществляются испусканием и поглощением цветными кварками глюонов, несущих цвет и антицвет.

Известное взаимодействие нуклонов через обмен пионами на кварковом уровне выглядит так:

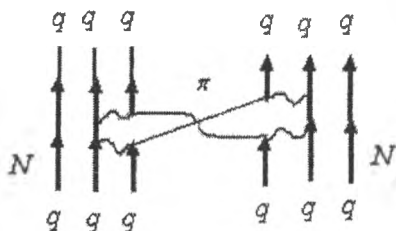


Рис.9.7. Взаимодействие нуклонов через обмен пионами

Как видно, во взаимодействии нуклоны участвуют не целиком, а только частью – кварками.

Аналогично тому, как электрон за счет виртуальных процессов покрывается облаком виртуальных фотонов, электронов и позитронов, так же и кварк в адроне покрывается облаком глюонов и кварк-антикварковых пар. Такие «одетые» кварки имеют массу порядка  $350 \text{ МэВ}$  и входят в состав адронов. Таким образом, адроны состоят из большого числа точечных объектов, которые объединяют общим названием **партон** (part – часть). Еще до появления кварковой концепции такие точечные образования в нуклонах обнаружил Хофштадтер в экспериментах по рассеянию высокоэнергичных электронов. В этих реакциях выявлено, что партоны в адронах ведут себя совершенно независимо, свободно. Отсюда приходят к представлению об **асимптотической свободе** партонов.

Многочисленные опыты по обнаружению кварков в свободном виде не увенчались успехом. Поэтому пришли к выводу, что в природе не наблюдаются цветные кварки и глюоны в свободном

виде, наблюдаются только бесцветные адроны, лептоны и фотоны. Объяснение этому находят в том, что силы между кварками с удалением друг от друга не уменьшаются, как в случае кулоновского взаимодействия, а наоборот увеличиваются. Кварки оказываются запертыми внутри адронов, такое представление известно как **конфайнмент** (пленение, удержание).

Для описания механизма удержания кварков внутри адронов предложен ряд феноменологических моделей, основанных на предположении, что интенсивность сильного взаимодействия растет беспредельно с увеличением расстояния между кварками. При разнесении на большое расстояние двух кварков глюонное поле между ними сжимается в тонкую трубку (струну). Дальнейшее разнесение кварков приводит к увеличению энергии струны, и она обрывается, и на ее свободных концах образуется кварк и антикварк, которые вместе составляют мезон. Таким образом, рождаются мезоны. Можно сказать, что кварки и антикварки в адроне ведут себя подобно полюсам магнита. Если разделить магнит на две части, то не образуется отдельно северный и южный полюсы, а получится два новых магнита.

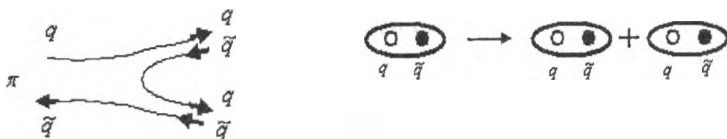


Рис.9. 8. Аналогия между попытками разделить пион или магнит на части

В этих моделях для описания взаимодействия между кварками предлагается феноменологический потенциал следующего типа

$$U(r) = -\frac{a}{r} + br,$$

где  $a > 0$  и  $b > 0$  подгоночные параметры, первый член описывает квазикулоновское взаимодействие, а второй - плоское поле струны. С помощью такого потенциала удалось рассчитать спектры масс целого семейства мезонов, получившее название **чармония**,

так как состоят из двух  $s\bar{s}$  кварков. Основным состоянием этого семейства является  $J/\psi$  - мезон, а десяток близких к нему по свойствам частиц – резонансов рассматриваются как его возбужденные состояния. Изучение спектра масс этого семейства, подобно изучению спектра водорода в квантовой механике, позволило получить информацию о природе сильного взаимодействия.

Квантовая хромодинамика коренным образом изменила взгляды на природу сильного взаимодействия. Теперь истинно сильным взаимодействием считается взаимодействие между кварками путем обмена глюонами. Но в отличие от фотонов, которые электрически нейтральны, глюоны имеют цветовой заряд, поэтому должны сами испускать и поглощать глюоны. Это приводит к принципиально новому поведению системы кварков и глюонов. При увеличении расстояния между кварками их энергия взаимодействия возрастает. В результате не наблюдается свободных кварков и глюонов, они "заперты" внутри бесцветных адронов. А ядерное взаимодействие между нуклонами является производным от истинно сильного взаимодействия, по аналогии с силами Ван-дер-Ваальса, связывающими атомы в молекулы и являющимися производными от истинно электромагнитных взаимодействий, действующих между заряженными частицами.

В настоящее время квантовая хромодинамика, как теория сильного взаимодействия, полностью еще не завершена, но имеет многочисленные экспериментальные подтверждения, и получила признание среди физиков. Существующие проблемы теории считаются не принципиального характера, а трудности, которые в большей частью являются вычислительного характера, в скором будущем будут решены.

### **9.5 Великое объединение. Проблема нестабильности протона**

Успех теории электрослабого взаимодействия стимулировал работы по объединению сильного взаимодействия с электрослабым взаимодействием в **единую теорию электроядерного взаимодействия**. Такое построение получило название **великого объединения**. Было предложено много вариантов такой теории, но основные надежды возлагаются на теорию Х. Джорджи и С. Глешоу, предложенную в 1974 году. Она основана на тех же известных принципах.

Размещают все лептоны и кварки в мультиплеты, преобразования симметрии переводят эти частицы друг в друга, так что различие между ними как бы стираются. Требование локальной калибровочной симметрии приводит к появлению безмассовых калибровочных полей – прообразов фотона, промежуточных бозонов и глюонов. Через механизм Хиггса исходные калибровочные частицы перемешиваются, и некоторые из них обретают массы. В итоге возникают 24 векторных бозона: 8 глюонов  $g$ , 3 промежуточных бозона  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ , 1 фотон  $\gamma$  и 12 новых  $X$  и  $Y$  частиц с необычными свойствами, роль которых полностью еще не выяснена. Но, тем не менее, эта теория уже имеет определенные достижения, и из нее вытекает ряд важных следствий.

Электрический заряд  $q$  появляется как квантовое число, и, наконец, теоретически устанавливается факт квантованности электрического заряда. А сумма электрических зарядов любого мультиплета оказывается равной нулю, отсюда получает объяснение дробность заряда кварков.

Модель Джорджи-Глешоу также позволяет вычислить угол Вайнберга, который был в теории электрослабого взаимодействия параметром. Теория предсказала значение  $\sin^2 \theta_w = 0,2$ , поразительно близкое к опытному значению.

Особый интерес вызвало предсказание теории о нестабильности протона. Согласно этой теории, протон, до этого считавшийся стабильным, может распасться по каналу  $p \rightarrow \pi^0 + e^+$ . Оценки времени распада протона дают очень большую величину  $\tau_p \approx 10^{30 \pm 3}$  лет, во много превосходящую время существования самой Вселенной. Тем не менее, экспериментаторы во многих странах бросились проверять этот вывод, и к настоящему установлено, что если протон распадается, то его время жизни должно быть выше  $\tau_p > 6,5 \cdot 10^{31}$  лет – предела экспериментальной возможности наших дней.

Следующее достижение теории связано с анализом зависимости эффективных констант фундаментальных взаимодействий от пере-

даваемого импульса  $Q$  частиц. Эта зависимость представлена на рис. 9.9, где показано, что

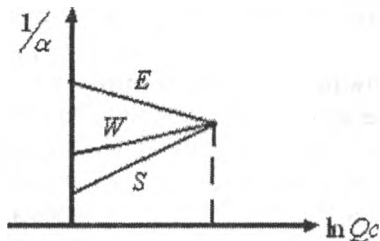


Рис.9.9. Зависимость констант взаимодействий от передаваемого импульса

с увеличением передаваемого импульса  $Q$  константы взаимодействий:  $\alpha_w$  слабого,  $\alpha_E$  электромагнитного и  $\alpha_s$  сильного - сходятся в одну точку, то есть сила взаимодействий становится одинаковой, и взаимодействия - неразличимы. Координаты этой точки равны

$$Q_0 c \equiv E_0 \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ ГэВ} \quad \text{и} \quad \alpha_0 \approx 0,02.$$

Этим энергиям  $E_0$  соответствуют расстояния порядка  $r_0 \approx 4 \cdot 10^{-31} \text{ м}$ . Величины  $E_0$  и  $r_0$  задают энергетический и пространственный масштабы великого объединения. Масштаб  $E_0$  практически совпадает с массой бозонов  $X$  и  $Y$ . А пространственный масштаб  $r_0$  приближается к так называемой **длине Планка**

$$l_P = \sqrt{\hbar G / c^2} \approx 1,6 \cdot 10^{-35} \text{ м},$$

где  $G$  - гравитационная постоянная. На расстояниях  $r \sim l_P$  должны сказываться квантовые эффекты, не учтенные великим объединением.

Эти масштабы энергии и пространства не достигаемы эксперименту, даже в далеком будущем. Такие масштабы энергии и пространства имела Вселенная в первые мгновения после сотворения Мира, т.е. **Большого Взрыва**. Тогда вся материя находилась в чрезвычайно сжатом состоянии на сверхмалом расстоянии и при предельно высоких энергиях. Именно в этой области проявляются

основные следствия великого объединения, следы которых должны сохраняться до сих пор. Таким образом, объектом исследований физики элементарных частиц стали астрофизические объекты.

### 9.6. Супергравитация и суперобъединение

На самом деле великое объединение является не столь великим, так как не включает гравитационное взаимодействие. Дело в том, что общая теория относительности, описывающая гравитацию, является классической теорией, и долгое время попытки создания квантовой теории гравитации оставались безуспешными. Но в последние годы стала успешно развиваться так называемая **теория супергравитации**. Она основана на тех же стандартных принципах: локальной калибровочной инвариантности, спонтанного нарушения симметрии и суперсимметрии. Если до сих пор рассматриваемые мультиплеты состояли только из фермионов, либо только из бозонов, то суперсимметричные мультиплеты включают фермионы и бозоны, которые переходят друг в друга при соответствующих преобразованиях.

В процессе локализации преобразований Пуанкаре возникают разные поля. Одно из них описывает безмассовые тензорные частицы со спином  $J^{\text{П}} = 2^+$  - **гравитоны**  $G$ . Другое поле порождается локализацией преобразований, связывающих фермионы с бозонами, в результате чего возникает новая частица со спином  $J = 3/2$ , названная **гравитино**  $V_G$ . Она первоначально – безмассовая, но за счет механизма Хиггса может иметь массу и более интенсивное взаимодействие, что позволяет надеяться на экспериментальное обнаружение.

На этом направлении можно в принципе построить унифицированную теорию, объединяющую гравитацию с остальными взаимодействиями - **суперобъединение**. Такие исследования ведутся интенсивно и привели к обнадеживающим результатам. Пока супергравитация дает единственное предсказание существования гравитино, которое можно попытаться проверить на опыте. Теперь можно утверждать, что, наконец открыт прямой путь к той цели единого описания физических явлений, к которому стремились все крупные мыслители.



## 9.7. Современное представление о структуре материи

В заключение резюмируем современные взгляды на структуру материи.

1. Вещество состоит из атомов, каждый из которых включает массивное положительно заряженное ядро, окруженное электронной оболочкой.
2. Электронная оболочка атома ответственна за химические и физические свойства вещества.
3. Атомное ядро состоит из нейтронов и протонов, связанных ядерными силами. Ядра могут претерпевать ряд спонтанных (самопроизвольных) превращений и участвовать в большом количестве ядерных реакциях.
4. Основными кирпичиками, из которых состоит вещество, являются протоны, нейтроны и электроны. В свободном виде еще наблюдаются фотоны и нейтрино, которые рождаются в ядерных реакциях. Остальные частицы являются нестабильными и получаются в космических излучениях или в лаборатории.
5. Основное свойство элементарных частиц – способность претерпевать самые разные взаимопревращения. Все эти процессы управляются тремя фундаментальными взаимодействиями: сильным, электромагнитным и слабым. Существует четвертое взаимодействие – гравитационное, но оно непосредственно в мире элементарных частиц не проявляется.
6. Все частицы подразделяют на тех, которые участвуют в сильном взаимодействии, их называют адронами, на тех, которые не могут участвовать в сильных взаимодействиях – это фотоны, промежуточные бозоны и лептоны. В адроны входят барионы, мезоны и резонансы.
7. В экспериментах по упругому рассеянию адроны проявляют внутреннюю, зернистую структуру. Они состоят из кварков: барионы из 3 кварков, а мезоны из кварка и антикварка. А фотоны и лептоны не проявляют внутреннюю структуру. Они считаются бесструктурными, истинно элементарными частицами – фундаментальными частицами.
8. По динамике взаимодействий частицы подразделяются на участников и переносчиков взаимодействий. Участниками взаимодействий являются фермионы: в гравитационном взаимодействии – все частицы, наделенные массами, в электромагнитном и слабом взаи-

модействиях – электрически заряженные лептоны, в сильном взаимодействии – кварки, наделенные цветом.

9. Переносчиками взаимодействий являются бозоны с  $J^P = 1^-$ :  $g$ -глюоны в сильном взаимодействии,  $W^\pm, Z^0$  - промежуточные бозоны в слабом взаимодействии,  $\gamma$  - фотоны в электромагнитном взаимодействии,  $G(J^P = 2^+)$  - гравитоны в гравитационном взаимодействии.

10. Кварк имеет 3 цвета:  $R, G, B$  и соответствующие им антицвета (в оптике дополнительные цвета). Мезоны состоят из кварка и антикварка  $q\bar{q}$ , а барионы состоят из 3 кварков  $qqq$  разных цветов так, что они становятся бесцветными (белыми). В природе наблюдаются в свободном виде только бесцветные частицы, а цветные кварки не наблюдаемы.

11. В настоящее время известно 3 дублета лептонов, в каждый из которых входит заряженная частица и нейтрино ( $e^-, \nu_e$ ), ( $\mu^-, \nu_\mu$ ) и ( $\tau^-, \nu_\tau$ ). У каждого лептона есть свой антилептон. Существует также 3 дублета (поколения) кварков: ( $u, d$ ), ( $c, s$ ) и ( $t, b$ ). Из теории следует эта кварк-лептонная симметрия.

12. Обменный характер взаимодействий дает надежду на построение единой теории, объединяющей все фундаментальные взаимодействия. Практически завершенной считается теория электрослабого взаимодействия, имеющая на своем счету большое количество результатов и подтвержденных предсказаний.

13. Довольно успешны попытки великого объединения электрослабого и сильного взаимодействий. Такая теория предсказывает очень малую нестабильность протона, которую ждет экспериментальное подтверждение.

14. Предпринимаются попытки объединить все 4 фундаментальные взаимодействия, включая и гравитационное взаимодействие. При этом возникает расширенная супергравитация, находящаяся пока в самой начальной стадии развития.

### Вопросы для закрепления знаний

1. Почему при аннигиляции электрона и позитрона возникает не один фотон, а больше фотонов?

2. Как из соотношений неопределенностей следует масса переносчика взаимодействия и радиус действия взаимодействия?
3. Что такое «голый» электрон и как происходит «одевание» электрона в шубу?
4. Что такое поляризация вакуума?
5. Выпишите уравнение Дирака для релятивистского электрона и поясните физические величины, входящие в это уравнение.
6. Почему магнитный момент электрона отличается от Боровского значения?
7. Оцените значение сечения рассеяния фотона на электроне?
8. Перечислить процессы с участием электрона, соответствующие диаграммам Фейнмана первого порядка.
9. Перечислить процессы с участием электрона, соответствующие диаграммам Фейнмана второго порядка.
10. Составьте диаграмму Фейнмана для  $\beta$  - распада нейтрона по теории Ферми, как одновершинный контактный процесс.
11. Приведите диаграмму Фейнмана для  $\beta$  - распада нейтрона по кварковой схеме с участием промежуточного бозона.
12. Приведите диаграмму Фейнмана для взаимодействия двух кварков через обмен цветом.
13. Приведите диаграмму Фейнмана для взаимодействия нуклонов через обмен пионами, используя кварковую схему.
14. Константы фундаментальных взаимодействий зависят от передаваемого импульса и при некотором его значении они совпадают. Какое следствие вытекает из этого?
15. Что такое супергравитация и суперобъединение?
16. Чем отличается гравитон от гравитино?

## ПРИЛОЖЕНИЯ

**Таблица 1. Значения некоторых физических величин**

### Универсальные физические постоянные

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Скорость света            | $c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ м/с}$                                  |
| Гравитационная постоянная | $G = 6,6726 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ |
| Электрическая постоянная  | $\varepsilon_0 = 1 / \mu_0 c^2 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  |
| Постоянная Авогадро       | $N_A = 6,0221 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$                       |
| Газовая постоянная        | $R = 8,3145 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$                          |
| Постоянная Больцмана      | $k = R / N_A = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$                   |
| Элементарный заряд        | $e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$                               |
| Постоянная Планка         | $h = 6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$                |
|                           | $\hbar = h / 2\pi = 1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ |
| Масса электрона           | $m_e = 9,1094 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$                             |
|                           | $m_e = 0,5110 \text{ МэВ} / c^2$                                     |
|                           | $m_e = 5,4858 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.}$                          |
| Масса протона             | $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$                             |
|                           | $m_p = 938,2723 \text{ МэВ} / c^2$                                   |
|                           | $m_p = 1,0072 \text{ а.е.м.}$  |
| Масса нейтрона            | $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$                             |
|                           | $m_n = 939,5656 \text{ МэВ} / c^2$                                   |
|                           | $m_n = 1,0087 \text{ а.е.м.}$  |
| Магнетон Бора             | $\mu_B = e\hbar / 2m_e c = 9,2740 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$      |
| Ядерный магнетон          | $\mu_N = e\hbar / 2m_p c = 5,0508 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл}$      |

### Единицы измерения некоторых величин

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Атомная единица массы, $m$ | $1 \text{ а.е.м.} = m(^{12}\text{C}) / 12 = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ |
|                            | $1 \text{ а.е.м.} = m(^{12}\text{C}) / 12 = 931,4943 \text{ МэВ} / c^2$       |
| Длина, $r$                 | $1 \text{ Фм(ферми)} = 10^{-15} \text{ м}$                                    |
| Энергия, $E$               | $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$                                |
|                            | $1 \text{ эВ} = 7,7 \cdot 10^3 \text{ К}^\circ$                               |

|  |   |
|--|---|
| Эффективное сечение, $\sigma$                          | 1 б(барн) = $10^{-28}$ м <sup>2</sup>     |
| Активность изотопа, $A$                                | 1 Бк(беккерель) = 1 распад/с              |
|  | 1 Бк(беккерель) = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Ки |
|  | 1 Ки(кюри) = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк       |
| Поглощенная доза, $D$                                  | 1 Гр(грей) = 1 Дж/кг                      |
|  | 1 Гр(грей) = 100 рад                      |
|  | 1 рад = $10^{-2}$ Дж/кг                   |
|  | 1 рад = $10^{-2}$ Гр                      |
| Поглощенная доза рентгеновского и гамма-излучения, $X$ | 1 Р(рентген) = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг |
|  | 1 Зв(зиверт) = 1 Гр/к                     |
| Эквивалентная доза, $H$                                | 1 бэр = 1 рад/к                           |

### Значения $k$ - коэффициента качества для излучений:

|   |   |
|---|---|
| Рентгеновское и $\gamma$ -излучение.....1 | Нейтроны $E \leq 10$ МэВ ..... 10           |
| $\beta$ -излучение .....1                 | Протоны $E \leq 10$ МэВ ..... 10            |
| Нейтроны с $E \leq 20$ кэВ .....3         | $\alpha$ -излучение $E \leq 10$ МэВ .....20 |

### Приставки для десятичных кратных и дольных единиц

| Множитель | Обозначение |      | Наименование | Множитель  | Обозначение |      | Наименование |
|-----------|-------------|------|--------------|------------|-------------|------|--------------|
|           | латин.      | рус. |              |            | латин.      | рус. |              |
| $10^1$    | da          | да   | дека         | $10^{-1}$  | d           | д    | деци         |
| $10^2$    | g           | г    | гекто        | $10^{-2}$  | c           | с    | санти        |
| $10^3$    | k           | к    | кило         | $10^{-3}$  | m           | м    | милли        |
| $10^6$    | M           | М    | мега         | $10^{-6}$  | mk          | мк   | микро        |
| $10^9$    | G           | Г    | гига         | $10^{-9}$  | n           | н    | нано         |
| $10^{12}$ | T           | Т    | тера         | $10^{-12}$ | p           | п    | пико         |
| $10^{15}$ | P           | П    | пета         | $10^{-15}$ | f           | ф    | фемто        |

## Таблица 2. Характеристики атомных ядер

В таблице собраны известные к настоящему времени изотопы химических элементов с их свойствами. Таблица составлена О.Ю. Панищевым на основе данных, взятых из интернет-сайта <http://cdfc.sinp.msu.ru/services/gsp.en.html>.

В первой графе таблицы приведены химические элементы в порядке возрастания атомного номера  $Z$ , названия которых утверждены решением Генеральной Ассамблеи чистой и прикладной химии от 1997 года.

Во второй графе расположены изотопы химического элемента в порядке возрастания массового числа с указанием атомного номера  $Z$ , символа элемента и массового числа  $A$ .

В третьей графе указаны периоды полураспада  $T_{1/2}$  для радиоактивных изотопов или процентное содержание в естественной смеси для стабильных изотопов и для изотопов с очень большими периодами распада. В случае очень коротких периодов полураспада приводятся ширины состояний  $\Gamma$  в  $MэВ$ .

В четвертой графе – спин и четность основного состояния ядра  $J^P$ .

В пятой графе дается масса атома в *а.е.м.* - атомных единицах массы.

1 *а.е.м.* соответствует  $1/12$  части массы атома углерода  $^{12}C$ .

В шестой графе приведен дефект массы  $\Delta = M - A$  в  $MэВ$ .

В седьмой графе дана энергия связи ядра в  $MэВ$ .

Работа частично поддержана грантом РНП.2.1.1.741.

| Название хим. элемента | Z-символ-А | $T_{1/2}$ или Г или относит. распространенность | Спин-четность основного состояния | Масса, а.е.м. | Дефект массы $\Delta = M - A$ МэВ | Энергия связи, МэВ |
|------------------------|------------|---|-----------------------------------|---------------|-----------------------------------|--------------------|
| Водород                | 0-N-1      | 10.24 мин                                       | 1/2+                              | 1,009         | 8,071                             | 0,0000             |
|                        | 1-H-1      | 99.985%   | 1/2+                              | 1,008         | 7,289                             | 0,0000             |
|                        | 1-H-2      | 0.015%  | 1+                                | 2,014         | 13,136                            | 2,2246             |
|                        | 1-H-3      | 12.33 лет                                       | 1/2+                              | 3,016         | 14,950                            | 8,4818             |
|                        | 1-H-4      | 4.6 МэВ   | 2-                                | 4,028         | 25,928                            | 5,5752             |
|                        | 1-H-5      | 5.7 МэВ   |                                   | 5,040         | 36,834                            | 2,7403             |
| Гелий                  | 1-H-6      | 1.4 МэВ   |                                   | 6,045         | 41,864                            | 5,7818             |
|                        | 2-He-3     | 0.000137%                                       | 1/2+                              | 3,016         | 14,931                            | 7,7181             |
|                        | 2-He-4     | 99.999863%                                      | 0+                                | 4,003         | 2,425                             | 28,2957            |
|                        | 2-He-5     | 0.60 МэВ  | 3/2-                              | 5,012         | 11,386                            | 27,4057            |
|                        | 2-He-6     | 806.7 мс  | 0+                                | 6,019         | 17,594                            | 29,2691            |
|                        | 2-He-7     | 160 кэВ   | (3/2)-                            | 7,028         | 26,110                            | 28,8243            |
|                        | 2-He-8     | 119.0 мс  | 0+                                | 8,034         | 31,598                            | 31,4079            |
|                        | 2-He-9     | 65 кэВ  | (1/2-)                            | 9,044         | 40,818                            | 30,2588            |
|                        | 2-He-10    | 0.17 МэВ  | 0+                                | 10,052        | 48,810                            | 30,3385            |
| Литий                  | 3-Li-4     | 6.03 МэВ  | 2-                                | 4,027         | 25,320                            | 4,6181             |
|                        | 3-Li-5     | 1.5 МэВ   | 3/2-                              | 5,013         | 11,679                            | 26,3307            |
|                        | 3-Li-6     | 7.59%   | 1+                                | 6,015         | 14,086                            | 31,9946            |
|                        | 3-Li-7     | 92.41%  | 3/2-                              | 7,016         | 14,908                            | 39,2445            |
|                        | 3-Li-8     | 838 мс  | 2+                                | 8,022         | 20,946                            | 41,2773            |
|                        | 3-Li-9     | 178.3 мс  | 3/2-                              | 9,027         | 24,954                            | 45,3409            |
|                        | 3-Li-10    | 1.2 МэВ   | (1-,2-)                           | 10,035        | 33,050                            | 45,3159            |
|                        | 3-Li-11    | 8.5 мс  | 3/2-                              | 11,044        | 40,796                            | 45,6416            |
|                        | 3-Li-12    | 10 нс   |                                   | 12,054        | 50,096                            | 44,4130            |
| Бериллий               | 4-Be-5     |   | (1/2+)                            | 5,041         | 37,996                            | -0,7680            |
|                        | 4-Be-6     | 92 кэВ  | 0+                                | 6,020         | 18,374                            | 26,9241            |
|                        | 4-Be-7     | 53.29 дн.                                       | 3/2-                              | 7,017         | 15,769                            | 37,6004            |
|                        | 4-Be-8     | 6.8 эВ  | 0+                                | 8,005         | 4,942                             | 56,4995            |
|                        | 4-Be-9     | 100%  | 3/2-                              | 9,012         | 11,348                            | 58,1649            |
|                        | 4-Be-10    | 1.51e+6 лет                                     | 0+                                | 10,014        | 12,607                            | 64,9772            |
|                        | 4-Be-11    | 13.81 с   | 1/2+                              | 11,022        | 20,174                            | 65,4812            |
|                        | 4-Be-12    | 21.3 мс   | 0+                                | 12,027        | 25,076                            | 68,6501            |
|                        | 4-Be-13    | 0.17 МэВ  | (1/2-)                            | 13,036        | 33,658                            | 68,1393            |
|                        | 4-Be-14    | 4.35 мс   | 0+                                | 14,043        | 39,882                            | 69,9867            |
|                        | Бор        | 5-B-7   | 1.4 МэВ                           | (3/2-)        | 7,030                             | 27,868             |
| 5-B-8                  |            | 770 мс  | 2+                                | 8,025         | 22,921                            | 37,7378            |
| 5-B-9                  |            | 0.54 кэВ  | 3/2-                              | 9,013         | 12,416                            | 56,3144            |
| 5-B-10                 |            | 19.8%   | 3+                                | 10,013        | 12,051                            | 64,7507            |
| 5-B-11                 |            | 80.2%   | 3/2-                              | 11,009        | 8,668                             | 76,2048            |
| 5-B-12                 |            | 20.20 мс  | 1+                                | 12,014        | 13,369                            | 79,5752            |
| 5-B-13                 |            | 17.36 мс  | 3/2-                              | 13,018        | 16,562                            | 84,4532            |
| 5-B-14                 |            | 12.3 мс   | 2-                                | 14,025        | 23,664                            | 85,4230            |
| 5-B-15                 |            | 9.87 мс   |                                   | 15,031        | 28,967                            | 88,1911            |
| 5-B-16                 |            | 190 пс  | 0-                                | 16,040        | 37,082                            | 88,1477            |
| 5-B-17                 |            | 5.08 мс   | (3/2-)                            | 17,047        | 43,716                            | 89,5844            |
| 5-B-18                 |            | 26 нс   | (4-)                              | 18,056        | 52,322                            | 89,0500            |
| 5-B-19                 |            | 200 нс  | (3/2-)                            | 19,064        | 59,364                            | 90,0790            |
| Углерод                |            | 6-C-8   | 230 кэВ                           | 0+            | 8,038                             | 35,094             |

|        |          |            |                |        |          |          |          |
|--------|----------|------------|----------------|--------|----------|----------|----------|
|        | 6-C-9    | 126.5 мс   | (3/2-)         | 9,031  | 28,914   | 39,0341  |          |
|        | 6-C-10   | 19.255 с   | 0+             | 10,017 | 15,699   | 60,3205  |          |
|        | 6-C-11   | 20.39 МИН  | 3/2-           | 11,011 | 10,651   | 73,4399  |          |
|        | 6-C-12   | 98.89%     | 0+             | 12,000 | 0,000    | 92,1618  |          |
|        | 6-C-13   | 1.11%      | 1/2-           | 13,003 | 3,125    | 97,1081  |          |
|        | 6-C-14   | 5730 лет   | 0+             | 14,003 | 3,020    | 105,2845 |          |
|        | 6-C-15   | 2.449 с    | 1/2+           | 15,011 | 9,873    | 106,5026 |          |
|        | 6-C-16   | 0.747 с    | 0+             | 16,015 | 13,694   | 110,7529 |          |
|        | 6-C-17   | 193 мс     |                | 17,023 | 21,037   | 111,4818 |          |
|        | 6-C-18   | 95 мс      | 0+             | 18,027 | 24,924   | 115,6657 |          |
|        | 6-C-19   | 49 мс      |                | 19,035 | 32,833   | 115,8276 |          |
|        | 6-C-20   | 14 мс      | 0+             | 20,040 | 37,560   | 119,1723 |          |
|        | 6-C-21   | 30 нс      | (1/2+)         | 21,049 | 45,960   | 118,8440 |          |
|        | 6-C-22   | 200 нс     | 0+             | 22,056 | 52,583   | 120,2920 |          |
| Азот   | 7-N-10   |            | (1-)           | 10,043 | 39,699   | 35,5380  |          |
|        | 7-N-12   | 11.000 мс  | 1+             | 12,019 | 17,338   | 74,0413  |          |
|        | 7-N-13   | 9.965 МИН  | 1/2-           | 13,006 | 5,345    | 94,1053  |          |
|        | 7-N-14   | 99.634%    | 1+             | 14,003 | 2,863    | 104,6586 |          |
|        | 7-N-15   | 0.366%     | 1/2-           | 15,000 | 0,101    | 115,4919 |          |
|        | 7-N-16   | 7.13 с     | 2-             | 16,006 | 5,683    | 117,9813 |          |
|        | 7-N-17   | 4.173 с    | 1/2-           | 17,008 | 7,871    | 123,8652 |          |
|        | 7-N-18   | 624 мс     | 1-             | 18,014 | 13,117   | 126,6902 |          |
|        | 7-N-19   | 290 мс     |                | 19,017 | 15,860   | 132,0182 |          |
|        | 7-N-20   | 142 мс     |                | 20,023 | 21,766   | 134,1835 |          |
|        | 7-N-21   | 87 мс      | (1/2-)         | 21,027 | 25,232   | 138,7894 |          |
|        | 7-N-22   | 18 мс      |                | 22,034 | 32,081   | 140,0117 |          |
| 7-N-23 | 200 нс   | (1/2-)     | 23,041         | 37,735 | 142,4290 |          |          |
|        | 7-N-24   | 52 нс      |                | 24,051 | 47,040   | 141,1950 |          |
|        | Кислород | 8-O-12     | 0.40 МэВ       | 0+     | 12,034   | 32,048   | 58,5492  |
|        |          | 8-O-13     | 8.58 мс        | (3/2-) | 13,025   | 23,111   | 75,5576  |
|        |          | 8-O-14     | 70.606 с       | 0+     | 14,009   | 8,006    | 98,7332  |
|        |          | 8-O-15     | 122.24 с       | 1/2-   | 15,003   | 2,855    | 111,9556 |
| 8-O-16 |          | 99.762%    | 0+             | 15,995 | -4,737   | 127,6193 |          |
| 8-O-17 |          | 0.038%     | 5/2+           | 16,999 | -0,809   | 131,7627 |          |
| 8-O-18 |          | 0.200%     | 0+             | 17,999 | -0,782   | 139,8070 |          |
| 8-O-19 |          | 26.91 с    | 5/2+           | 19,004 | 3,334    | 143,7627 |          |
| 8-O-20 |          | 13.51 с    | 0+             | 20,004 | 3,797    | 151,3707 |          |
| 8-O-21 |          | 3.42 с     | (1/2,3/2,5/2)+ | 21,009 | 8,062    | 155,1772 |          |
| 8-O-22 |          | 2.25 с     | 0+             | 22,010 | 9,284    | 162,0259 |          |
| 8-O-23 |          | 82 мс      | (1/2+)         | 23,016 | 14,616   | 164,7652 |          |
| 8-O-24 |          | 61 мс      | 0+             | 24,020 | 18,974   | 168,4785 |          |
| 8-O-25 |          | 50 нс      | (3/2+)         | 25,029 | 27,144   | 168,3810 |          |
| 8-O-26 | 40 нс    | 0+         | 26,038         | 35,164 | 168,4320 |          |          |
| Фтор   | 9-F-14   |            | (2-)           | 14,036 | 33,608   | 72,3490  |          |
|        | 9-F-15   | 1.0 МэВ    | (1/2+)         | 15,018 | 16,777   | 97,2517  |          |
|        | 9-F-16   | 40 кэВ     | 0-             | 16,011 | 10,680   | 111,4197 |          |
|        | 9-F-17   | 64.49 с    | 5/2+           | 17,002 | 1,952    | 128,2196 |          |
|        | 9-F-18   | 109.77 МИН | 1+             | 18,001 | 0,873    | 137,3692 |          |
|        | 9-F-19   | 100%       | 1/2+           | 18,998 | -1,487   | 147,8014 |          |
|        | 9-F-20   | 11.163 с   | 2+             | 20,000 | -0,017   | 154,4027 |          |
|        | 9-F-21   | 4.158 с    | 5/2+           | 21,000 | -0,048   | 162,5042 |          |
|        | 9-F-22   | 4.23 с     | 4+,(3+)        | 22,003 | 2,794    | 167,7341 |          |



|          |          |            |            |        |          |          |
|----------|----------|------------|------------|--------|----------|----------|
|          | 9-F-23   | 2.23 с     | (3/2,5/2)+ | 23,004 | 3,330    | 175,2697 |
|          | 9-F-24   | 0.34 с     | (1,2,3)+   | 24,008 | 7,545    | 179,1261 |
|          | 9-F-25   | 59 мс      | (5/2+)     | 25,012 | 11,266   | 183,4755 |
|          | 9-F-26   | 190 мс     |            | 26,020 | 18,288   | 184,5250 |
|          | 9-F-27   | 200 нс     | (5/2+)     | 27,027 | 25,050   | 185,8345 |
|          | 9-F-28   | 40 нс      |            | 28,036 | 33,226   | 185,7290 |
|          | 9-F-29   | 200 нс     | (5/2+)     | 29,043 | 40,296   | 186,7310 |
| Неон     | 10-Ne-16 | 122 кЭВ    | 0+         | 16,026 | 23,992   | 97,3252  |
|          | 10-Ne-17 | 109.2 мс   | 1/2-       | 17,018 | 16,485   | 112,9038 |
|          | 10-Ne-18 | 1672 мс    | 0+         | 18,006 | 5,307    | 132,1535 |
|          | 10-Ne-19 | 17.22 с    | 1/2+       | 19,002 | 1,751    | 143,7805 |
|          | 10-Ne-20 | 90.48%     | 0+         | 19,992 | -7,042   | 160,6449 |
|          | 10-Ne-21 | 0.27%      | 3/2+       | 20,994 | -5,732   | 167,4060 |
|          | 10-Ne-22 | 9.25%      | 0+         | 21,991 | -8,024   | 177,7699 |
|          | 10-Ne-23 | 37.24 с    | 5/2+       | 22,994 | -5,154   | 182,9705 |
|          | 10-Ne-24 | 3.38 мин   | 0+         | 23,994 | -5,948   | 191,8357 |
|          | 10-Ne-25 | 602 мс     | (1/2,3/2)+ | 24,998 | -2,059   | 196,0182 |
|          | 10-Ne-26 | 0.197 с    | 0+         | 26,000 | 0,430    | 201,6010 |
|          | 10-Ne-27 | 32 мс      | (3/2+)     | 27,008 | 7,094    | 203,0087 |
|          | 10-Ne-28 | 17 мс      | 0+         | 28,012 | 11,279   | 206,8949 |
|          | 10-Ne-29 | 200 мс     | (3/2+)     | 29,019 | 18,021   | 208,2242 |
|          | 10-Ne-30 | 200 нс     | 0+         | 30,024 | 22,237   | 212,0795 |
|          | 10-Ne-31 | 260 нс     | (7/2-)     | 31,033 | 30,842   | 211,5460 |
|          | 10-Ne-32 | 200 нс     | 0+         | 32,040 | 37,176   | 213,2830 |
| Натрий   | 11-Na-18 |            | (1-)       | 18,027 | 25,318   | 111,3600 |
|          | 11-Na-19 | 40 нс      | (5/2+)     | 19,014 | 12,929   | 131,8206 |
|          | 11-Na-20 | 447.9 мс   | 2+         | 20,007 | 6,845    | 145,9757 |
|          | 11-Na-21 | 22.49 с    | 3/2+       | 20,998 | -2,184   | 163,0762 |
|          | 11-Na-22 | 2.6019 лет | 3+         | 21,994 | -5,182   | 174,1453 |
|          | 11-Na-23 | 100%       | 3/2+       | 22,990 | -9,529   | 186,5640 |
|          | 11-Na-24 | 14.9512 ч  | 4+         | 23,991 | -8,418   | 193,5235 |
|          | 11-Na-25 | 59.1 с     | 5/2+       | 24,990 | -9,357   | 202,5346 |
|          | 11-Na-26 | 1.072 с    | 3+         | 25,993 | -6,902   | 208,1510 |
|          | 11-Na-27 | 301 мс     | 5/2+       | 26,994 | -5,581   | 214,9007 |
|          | 11-Na-28 | 30.5 мс    | 1+         | 27,999 | -1,034   | 218,4247 |
|          | 11-Na-29 | 44.9 мс    | 38778      | 29,003 | 2,619    | 222,8438 |
|          | 11-Na-30 | 48 мс      | 2+         | 30,009 | 8,594    | 224,9394 |
|          | 11-Na-31 | 17.0 мс    | 3/2+       | 31,014 | 12,664   | 228,9414 |
|          | 11-Na-32 | 13.2 мс    | (3-,4-)    | 32,020 | 18,304   | 231,3728 |
| 11-Na-33 | 8.2 мс   |            | 33,027     | 25,510 | 232,2379 |          |
| 11-Na-34 | 5.5 мс   |            | 34,035     | 32,509 | 233,3100 |          |
| 11-Na-35 | 1.5 мс   |            | 35,044     | 41,153 | 232,7370 |          |
| Магний   | 12-Mg-20 | 90.8 мс    | 0+         | 20,019 | 17,571   | 134,4677 |
|          | 12-Mg-21 | 122 мс     | (3/2,5/2)+ | 21,012 | 10,912   | 149,1979 |
|          | 12-Mg-22 | 3.857 с    | 0+         | 22,000 | -0,397   | 168,5776 |
|          | 12-Mg-23 | 11.317 с   | 3/2+       | 22,994 | -5,473   | 181,7249 |
|          | 12-Mg-24 | 78.99%     | 0+         | 23,985 | -13,933  | 198,2569 |
|          | 12-Mg-25 | 10.00%     | 5/2+       | 24,986 | -13,193  | 205,5876 |
|          | 12-Mg-26 | 11.01%     | 0+         | 25,983 | -16,214  | 216,6806 |
|          | 12-Mg-27 | 9.458 мин  | 1/2+       | 26,984 | -14,587  | 223,1240 |
|          | 12-Mg-28 | 20.915 ч   | 0+         | 27,984 | -15,019  | 231,6276 |
|          | 12-Mg-29 | 1.30 с     | 3/2+       | 28,989 | -10,661  | 235,3413 |

|          |          |              |            |        |          |          |
|----------|----------|--------------|------------|--------|----------|----------|
|          | 12-Mg-30 | 335 мс       | 0+         | 29,990 | -8,882   | 241,6337 |
|          | 12-Mg-31 | 230 мс       |            | 30,997 | -3,215   | 244,0379 |
|          | 12-Mg-32 | 120 мс       | 0+         | 31,999 | -0,796   | 249,6897 |
|          | 12-Mg-33 | 90 мс        |            | 33,006 | 5,204    | 251,7612 |
|          | 12-Mg-34 | 20 мс        | 0+         | 34,009 | 8,451    | 256,5858 |
|          | 12-Mg-35 | 70 мс        | (7/2-)     | 35,017 | 16,292   | 256,8160 |
|          | 12-Mg-36 | 200 нс       | 0+         | 36,022 | 20,912   | 260,2670 |
|          | 12-Mg-37 | 260 нс       | (7/2-)     | 37,031 | 29,100   | 260,1510 |
| Алюминий | 13-Al-21 | 35 нс        | (1/2+)     | 21,028 | 26,119   | 133,2080 |
|          | 13-Al-22 | 59 мс        |            | 22,020 | 18,183   | 149,2160 |
|          | 13-Al-23 | 0.47 с       | (5/2+)     | 23,007 | 6,767    | 168,7026 |
|          | 13-Al-24 | 2.053 с      | 4+         | 24,000 | -0,055   | 183,5962 |
|          | 13-Al-25 | 7.183 с      | 5/2+       | 24,990 | -8,916   | 200,5282 |
|          | 13-Al-26 | 7.17e+5 лет  | 5+         | 25,987 | -12,210  | 211,8941 |
|          | 13-Al-27 | 100%         | 5/2+       | 26,982 | -17,197  | 224,9520 |
|          | 13-Al-28 | 2.2414 мин   | 3+         | 27,982 | -16,851  | 232,6770 |
|          | 13-Al-29 | 6.56 мин     | 5/2+       | 28,980 | -18,216  | 242,1133 |
|          | 13-Al-30 | 3.60 с       | 3+         | 29,983 | -15,872  | 247,8415 |
|          | 13-Al-31 | 644 мс       | (3/2,5/2)+ | 30,984 | -14,954  | 254,9946 |
|          | 13-Al-32 | 33 мс        | 1+         | 31,988 | -11,062  | 259,1738 |
|          | 13-Al-33 | 1 мкс        |            | 32,991 | -8,505   | 264,6880 |
|          | 13-Al-34 | 60 мс        |            | 33,997 | -2,862   | 267,1166 |
|          | 13-Al-35 | 150 мс       |            | 35,000 | -0,058   | 272,3838 |
|          | 13-Al-36 | 90 мс        |            | 36,006 | 5,916    | 274,4806 |
| 13-Al-37 |          |              | 37,010     | 9,604  | 278,8646 |          |
| 13-Al-38 | 200 нс   |              | 38,017     | 15,742 | 280,7970 |          |
| 13-Al-39 | 200 нс   | (3/2+)       | 39,022     | 20,400 | 284,2110 |          |
| 13-Al-40 | 260 нс   |              |            | 0,000  |          |          |
| Кремний  | 14-Si-22 | 29 мс        | 0+         | 22,035 | 32,164   | 134,4520 |
|          | 14-Si-23 | 200 нс       | (3/2+)     | 23,026 | 23,772   | 150,9160 |
|          | 14-Si-24 | 102 мс       | 0+         | 24,012 | 10,755   | 172,0040 |
|          | 14-Si-25 | 220 мс       | 5/2+       | 25,004 | 3,825    | 187,0048 |
|          | 14-Si-26 | 2.234 с      | 0+         | 25,992 | -7,145   | 206,0461 |
|          | 14-Si-27 | 4.16 с       | 5/2+       | 26,987 | -12,384  | 219,3572 |
|          | 14-Si-28 | 92.230%      | 0+         | 27,977 | -21,493  | 236,5369 |
|          | 14-Si-29 | 4.683%       | 1/2+       | 28,976 | -21,895  | 245,0104 |
|          | 14-Si-30 | 3.087%       | 0+         | 29,974 | -24,433  | 255,6196 |
|          | 14-Si-31 | 157.3 мин    | 3/2+       | 30,975 | -22,949  | 262,2070 |
|          | 14-Si-32 | 172 лет      | 0+         | 31,974 | -24,081  | 271,4102 |
|          | 14-Si-33 | 6.332 с      |            | 32,978 | -20,492  | 275,8931 |
|          | 14-Si-34 | 2.77 с       | 0+         | 33,979 | -19,957  | 283,4286 |
|          | 14-Si-35 | 0.78 с       |            | 34,985 | -14,360  | 285,9031 |
|          | 14-Si-36 | 0.45 с       | 0+         | 35,987 | -12,401  | 292,0153 |
|          | 14-Si-37 | 90 мс        | (7/2-)     | 36,993 | -6,524   | 294,2102 |
|          | 14-Si-38 | 1 мкс        | 0+         | 37,996 | -3,745   | 299,5019 |
|          | 14-Si-39 | 1 мкс        | (7/2-)     | 39,002 | 2,142    | 301,6860 |
| 14-Si-40 | 200 нс   | 0+           | 40,006     | 5,403  | 306,4970 |          |
| 14-Si-41 | 200 нс   |              | 41,013     | 11,830 | 308,1410 |          |
| 14-Si-42 | 200 нс   | 0+           | 42,016     | 14,997 | 313,0460 |          |
| Фосфор   | 15-P-24  |              | (1+)       | 24,034 | 31,997   | 149,9800 |
|          | 15-P-25  | 30 нс        | (1/2+)     | 25,020 | 18,872   | 171,1760 |
|          | 15-P-26  | 20 мс +35-15 | (3+)       | 26,012 | 10,973   | 187,1460 |

|         |          |              |                |        |          |          |
|---------|----------|--------------|----------------|--------|----------|----------|
|         | 15-P-27  | 260 мс       | (1/2+)         | 26,999 | -0,753   | 206,9434 |
|         | 15-P-28  | 270.3 мс     | 3+             | 27,992 | -7,161   | 221,4228 |
|         | 15-P-29  | 4.142 с      | 1/2+           | 28,982 | -16,952  | 239,2850 |
|         | 15-P-30  | 2.498 мин    | 1+             | 29,978 | -20,201  | 250,6049 |
|         | 15-P-31  | 100%         | 1/2+           | 30,974 | -24,441  | 262,9167 |
|         | 15-P-32  | 14.262 дн.   | 1+             | 31,974 | -24,305  | 270,8523 |
|         | 15-P-33  | 25.34 дн.    | 1/2+           | 32,972 | -26,338  | 280,9561 |
|         | 15-P-34  | 12.43 с      | 1+             | 33,974 | -24,558  | 287,2472 |
|         | 15-P-35  | 47.3 с       | 1/2+           | 34,973 | -24,858  | 295,6186 |
|         | 15-P-36  | 5.6 с        |                | 35,978 | -20,251  | 299,0832 |
|         | 15-P-37  | 2.31 с       |                | 36,980 | -18,995  | 305,8984 |
|         | 15-P-38  | 0.64 с       |                | 37,984 | -14,466  | 309,4411 |
|         | 15-P-39  | 0.16 с+30-10 |                | 38,986 | -12,650  | 315,6960 |
|         | 15-P-40  | 260 мс       |                | 39,991 | -8,337   | 319,4545 |
|         | 15-P-41  | 120 мс       |                | 40,995 | -4,844   | 324,0327 |
|         | 15-P-42  | 110 мс       |                | 42,000 | 0,084    | 327,1760 |
|         | 15-P-43  | 33 мс        |                | 43,003 | 3,083    | 332,2480 |
|         | 15-P-44  | 200 нс       |                | 44,010 | 9,203    | 334,2000 |
|         | 15-P-45  | 200 нс       |                | 45,015 | 14,103   | 337,3710 |
|         | 15-P-46  | 200 нс       |                | 46,024 | 22,197   | 337,3480 |
| Серя    | 16-S-26  | 10 мс        | 0+             | 26,028 | 25,970   | 171,3670 |
|         | 16-S-27  | 21 мс        | (5/2+)         | 27,019 | 17,507   | 187,9010 |
|         | 16-S-28  | 125 мс       | 0+             | 28,004 | 4,073    | 209,4063 |
|         | 16-S-29  | 187 мс       | 5/2+           | 28,997 | -3,159   | 224,7096 |
|         | 16-S-30  | 1.178 с      | 0+             | 29,985 | -14,063  | 243,6848 |
|         | 16-S-31  | 2.572 с      | 1/2+           | 30,980 | -19,045  | 256,7383 |
|         | 16-S-32  | 95.02%       | 0+             | 31,972 | -26,016  | 271,7807 |
|         | 16-S-33  | 0.75%        | 3/2+           | 32,971 | -26,586  | 280,4222 |
|         | 16-S-34  | 4.21%        | 0+             | 33,968 | -29,932  | 291,8392 |
|         | 16-S-35  | 87.38 дн.    | 3/2+           | 34,969 | -28,846  | 298,8250 |
|         | 16-S-36  | 0.02%        | 0+             | 35,967 | -30,664  | 308,7139 |
|         | 16-S-37  | 5.05 мин     | 7/2-           | 36,971 | -26,896  | 313,0175 |
|         | 16-S-38  | 170.3 мин    | 0+             | 37,971 | -26,861  | 321,0537 |
|         | 16-S-39  | 11.5 с       | (3/2,5/2,7/2)- | 38,975 | -23,161  | 325,4253 |
|         | 16-S-40  | 8.8 с        | 0+             | 39,975 | -22,850  | 333,1848 |
|         | 16-S-41  | 2.6 с        | (7/2-)         | 40,980 | -18,602  | 337,0085 |
|         | 16-S-42  | 0.56 с       | 0+             | 41,981 | -17,242  | 343,7199 |
|         | 16-S-43  | 220 мс       |                | 42,987 | -12,482  | 347,0312 |
|         | 16-S-44  | 123 мс       | 0+             | 43,988 | -10,880  | 353,5000 |
|         | 16-S-45  | 82 мс        |                | 44,995 | -4,825   | 355,5170 |
| 16-S-46 | 200 нс   | 0+           | 46,000         | -0,401 | 359,1640 |          |
| 16-S-47 | 200 нс   |              | 47,008         | 7,098  | 359,7370 |          |
| 16-S-48 | 200 нс   | 0+           | 48,013         | 12,100 | 362,8060 |          |
| 16-S-49 | 200 нс   |              | 49,022         | 20,502 | 362,4750 |          |
| Хлор    | 17-Cl-28 |              | (1+)           | 28,029 | 26,557   | 186,1400 |
|         | 17-Cl-29 | 20 нс        | (3/2+)         | 29,014 | 13,143   | 207,6250 |
|         | 17-Cl-30 | 30 нс        | (3+)           | 30,005 | 4,443    | 224,3960 |
|         | 17-Cl-31 | 150 мс       |                | 30,992 | -7,064   | 243,9754 |
|         | 17-Cl-32 | 298 мс       | 1+             | 31,986 | -13,331  | 258,3130 |
|         | 17-Cl-33 | 2.511 с      | 3/2+           | 32,977 | -21,004  | 274,0572 |
|         | 17-Cl-34 | 1.5264 с     | 0+             | 33,974 | -24,441  | 285,5655 |
|         | 17-Cl-35 | 75.77%       | 3/2+           | 34,969 | -29,014  | 298,2098 |

|          |          |              |             |         |          |          |
|----------|----------|--------------|-------------|---------|----------|----------|
|          | 17-Cl-36 | 3.01e+5 лет  | 2+          | 35,968  | -29,522  | 306,7895 |
|          | 17-Cl-37 | 24.23%       | 3/2+        | 36,966  | -31,762  | 317,1005 |
|          | 17-Cl-38 | 37.24 мин    | 2-          | 37,968  | -29,798  | 323,2082 |
|          | 17-Cl-39 | 55.6 мин     | 3/2+        | 38,968  | -29,801  | 331,2822 |
|          | 17-Cl-40 | 1.35 мин     | 2-          | 39,970  | -27,558  | 337,1106 |
|          | 17-Cl-41 | 38.4 с       | (1/2,3/2)+  | 40,971  | -27,339  | 344,9634 |
|          | 17-Cl-42 | 6.8 с        |             | 41,973  | -24,987  | 350,6829 |
|          | 17-Cl-43 | 3.3 с        |             | 42,974  | -24,029  | 357,7963 |
|          | 17-Cl-44 | 0.56 с       |             | 43,979  | -19,991  | 361,8293 |
|          | 17-Cl-45 | 400 мс       |             | 44,980  | -18,909  | 368,8188 |
|          | 17-Cl-46 | 223 мс       |             | 45,984  | -14,792  | 372,7730 |
|          | 17-Cl-47 | 200 нс       |             | 46,988  | -11,225  | 377,2770 |
|          | 17-Cl-48 | 200 нс       |             | 47,995  | -4,797   | 378,9210 |
|          | 17-Cl-49 | 170 нс       |             | 49,000  | -0,102   | 382,2970 |
|          | 17-Cl-51 | 200 нс       | (3/2+)      | 51,014  | 12,603   | 385,7340 |
| Аргон    | 18-Ar-30 | 20 нс        | 0+          | 30,022  | 20,083   | 207,9740 |
|          | 18-Ar-31 | 15.1 мс      | (5/2+,3/2+) | 31,012  | 11,296   | 224,8330 |
|          | 18-Ar-32 | 98 мс        | 0+          | 31,998  | -2,179   | 246,3790 |
|          | 18-Ar-33 | 173.0 мс     | 1/2+        | 32,990  | -9,381   | 261,6526 |
|          | 18-Ar-34 | 844.5 мс     | 0+          | 33,980  | -18,378  | 278,7209 |
|          | 18-Ar-35 | 1.775 с      | 3/2+        | 34,975  | -23,048  | 291,4621 |
|          | 18-Ar-36 | 0.3365%      | 0+          | 35,968  | -30,230  | 306,7157 |
|          | 18-Ar-37 | 35.04 дн.    | 3/2+        | 36,967  | -30,948  | 315,5046 |
|          | 18-Ar-38 | 0.0632%      | 0+          | 37,963  | -34,715  | 327,3427 |
|          | 18-Ar-39 | 269 лет      | 7/2-        | 38,964  | -33,242  | 333,9411 |
|          | 18-Ar-40 | 99.6003%     | 0+          | 39,962  | -35,040  | 343,8104 |
|          | 18-Ar-41 | 109.34 мин   | 7/2-        | 40,965  | -33,067  | 349,9091 |
|          | 18-Ar-42 | 32.9 лет     | 0+          | 41,963  | -34,422  | 359,3353 |
|          | 18-Ar-43 | 5.37 мин     | (3/2,5/2)   | 42,966  | -31,978  | 364,9621 |
|          | 18-Ar-44 | 11.87 мин    | 0+          | 43,965  | -32,262  | 373,3179 |
|          | 18-Ar-45 | 21.48 с      |             | 44,968  | -29,719  | 378,8465 |
|          | 18-Ar-46 | 8.4 с        | 0+          | 45,968  | -29,721  | 386,9192 |
|          | 18-Ar-47 | 700 мс       |             | 46,972  | -25,908  | 391,1782 |
|          | 18-Ar-48 |              | 0+          | 47,975  | -23,222  | 396,5630 |
|          | 18-Ar-49 | 170 нс       |             | 48,982  | -16,599  | 398,0120 |
| 18-Ar-50 | 170 нс   | 0+           | 49,986      | -13,097 | 402,5810 |          |
| 18-Ar-51 | 200 нс   |              | 50,993      | -6,297  | 403,8520 |          |
| 18-Ar-52 | 10 мс    | 0+           | 51,998      | -1,705  | 407,3310 |          |
| 18-Ar-53 | 3 мс     | (5/2-)       | 53,006      | 5,800   | 407,8970 |          |
| Калий    | 19-K-32  |              |             | 32,022  | 20,418   | 222,9990 |
|          | 19-K-33  | 25 нс        | (3/2+)      | 33,007  | 6,763    | 244,7260 |
|          | 19-K-34  | 25 нс        | (1+)        | 33,998  | -1,481   | 261,0410 |
|          | 19-K-35  | 190 мс       | 3/2+        | 34,988  | -11,167  | 278,7987 |
|          | 19-K-36  | 342 мс       | 2+          | 35,981  | -17,425  | 293,1280 |
|          | 19-K-37  | 1.226 с      | 3/2+        | 36,973  | -24,799  | 308,5735 |
|          | 19-K-38  | 7.636 мин    | 3+          | 37,969  | -28,802  | 320,6472 |
|          | 19-K-39  | 93.2581%     | 3/2+        | 38,964  | -33,807  | 333,7237 |
|          |          | 0.0117%      |             |         |          |          |
|          | 19-K-40  | 1.277e+9 лет | 4-          | 39,964  | -33,535  | 341,5232 |
|          | 19-K-41  | 6.7302%      | 3/2+        | 40,962  | -35,559  | 351,6184 |
|          | 19-K-42  | 12.360 ч     | 2-          | 41,962  | -35,021  | 359,1522 |
|          | 19-K-43  | 22.3 ч       | 3/2+        | 42,961  | -36,593  | 368,7952 |

|          |          |                           |             |         |          |          |
|----------|----------|---------------------------|-------------|---------|----------|----------|
|          | 19-K-44  | 22.13 мин                 | 2-          | 43,962  | -35,810  | 376,0837 |
|          | 19-K-45  | 17.3 мин                  | 3/2+        | 44,961  | -36,608  | 384,9528 |
|          | 19-K-46  | 105 с                     | (2-)        | 45,962  | -35,419  | 391,8351 |
|          | 19-K-47  | 17.50 с                   | 1/2+        | 46,962  | -35,697  | 400,1843 |
|          | 19-K-48  | 6.8 с                     | (2-)        | 47,966  | -32,124  | 404,6833 |
|          | 19-K-49  | 1.26 с                    | (3/2+)      | 48,967  | -30,320  | 410,9502 |
|          | 19-K-50  | 472 мс                    | (0-,1,2-)   | 49,973  | -25,353  | 414,0541 |
|          | 19-K-51  | 365 мс                    | (1/2+,3/2+) | 50,976  | -22,002  | 418,7750 |
|          | 19-K-52  | 105 мс                    | 2-          | 51,983  | -16,199  | 421,0430 |
|          | 19-K-53  | 30 мс                     | (3/2+)      | 52,987  | -11,998  | 424,9130 |
|          | 19-K-54  | 10 мс                     |             | 53,994  | -5,598   | 426,5850 |
| Кальций  | 20-Ca-34 | 35 нс                     | 0+          | 34,014  | 13,153   | 245,6250 |
|          | 20-Ca-35 | 25.7 мс                   |             | 35,005  | 4,439    | 262,4110 |
|          | 20-Ca-36 | 102 мс                    | 0+          | 35,993  | -6,439   | 281,3598 |
|          | 20-Ca-37 | 181.1 мс                  | 3/2+        | 36,986  | -13,161  | 296,1525 |
|          | 20-Ca-38 | 440 мс                    | 0+          | 37,976  | -22,059  | 313,1222 |
|          | 20-Ca-39 | 859.6 мс                  | 3/2+        | 38,971  | -27,276  | 326,4108 |
|          | 20-Ca-40 | 96.94%                    | 0+          | 39,963  | -34,846  | 342,0520 |
|          | 20-Ca-41 | 1.03e+5 лет               | 7/2-        | 40,962  | -35,137  | 350,4147 |
|          | 20-Ca-42 | 0.647%                    | 0+          | 41,959  | -38,547  | 361,8953 |
|          | 20-Ca-43 | 0.135%                    | 7/2-        | 42,959  | -38,408  | 369,8283 |
|          | 20-Ca-44 | 2.09%                     | 0+          | 43,955  | -41,469  | 380,9602 |
|          | 20-Ca-45 | 162.61 дн.<br>0.004%      | 7/2-        | 44,956  | -40,813  | 388,3750 |
|          | 20-Ca-46 | 0.28e+16 лет              | 0+          | 45,954  | -43,135  | 398,7687 |
|          | 20-Ca-47 | 4.536 дн.<br>0.187% 4e+19 | 7/2-        | 46,955  | -42,340  | 406,0448 |
|          | 20-Ca-48 | лет                       | 0+          | 47,953  | -44,215  | 415,9912 |
|          | 20-Ca-49 | 8.718 мин                 | 3/2-        | 48,956  | -41,290  | 421,1378 |
|          | 20-Ca-50 | 13.9 с                    | 0+          | 49,958  | -39,571  | 427,4905 |
|          | 20-Ca-51 | 10.0 с                    | (3/2-)      | 50,961  | -35,887  | 431,8769 |
|          | 20-Ca-52 | 4.6 с                     | 0+          | 51,965  | -32,509  | 436,5709 |
|          | 20-Ca-53 | 90 мс                     | (3/2-,5/2-) | 52,970  | -27,898  | 440,0310 |
| 20-Ca-54 |          | 0+                        | 53,975      | -23,585 | 443,7900 |          |
| 20-Ca-56 | 10 мс    | 0+                        | 55,986      | -13,237 | 449,5840 |          |
| Скандий  | 21-Sc-37 |                           |             | 37,003  | 2,841    | 279,3680 |
|          | 21-Sc-38 | 300 нс                    | (2-)        | 37,995  | -4,937   | 295,2180 |
|          | 21-Sc-39 | 300 нс                    |             | 38,985  | -14,168  | 312,5202 |
|          | 21-Sc-40 | 182.3 мс                  | 4-          | 39,978  | -20,526  | 326,9499 |
|          | 21-Sc-41 | 596.3 мс                  | 7/2-        | 40,969  | -28,642  | 343,1370 |
|          | 21-Sc-42 | 680.67 мс                 | 0+          | 41,966  | -32,121  | 354,6871 |
|          | 21-Sc-43 | 3.891 ч                   | 7/2-        | 42,961  | -36,188  | 366,8251 |
|          | 21-Sc-44 | 3.97 ч                    | 2+          | 43,959  | -37,816  | 376,5246 |
|          | 21-Sc-45 | 100%                      | 7/2-        | 44,956  | -41,069  | 387,8494 |
|          | 21-Sc-46 | 83.79 дн.                 | 4+          | 45,955  | -41,759  | 396,6101 |
|          | 21-Sc-47 | 3.3492 дн.                | 7/2-        | 46,952  | -44,332  | 407,2544 |
|          | 21-Sc-48 | 43.67 ч                   | 6+          | 47,952  | -44,493  | 415,4869 |
|          | 21-Sc-49 | 57.2 мин                  | 7/2-        | 48,950  | -46,552  | 425,6177 |
|          | 21-Sc-50 | 102.5 с                   | 5+          | 49,952  | -44,538  | 431,6742 |
|          | 21-Sc-51 | 12.4 с                    | (7/2-)      | 50,954  | -43,219  | 438,4268 |
|          | 21-Sc-52 | 8.2 с                     | 3+          | 51,957  | -40,380  | 443,6596 |
|          | 21-Sc-53 | 3 с                       | (7/2-)      | 52,959  | -37,968  | 449,3180 |

|          |          |                   |        |         |          |          |
|----------|----------|-------------------|--------|---------|----------|----------|
|          | 21-Sc-54 | 225 мс            |        | 53,963  | -34,465  | 453,8873 |
|          | 21-Sc-55 | 120 мс            | (7/2-) | 54,967  | -30,339  | 457,8320 |
|          | 21-Sc-56 | 80 мс             | 3+     | 55,973  | -25,467  | 461,0320 |
|          | 21-Sc-57 |                   |        | 56,977  | -21,387  | 465,0230 |
| Титан    | 22-Ti-38 | 120 нс            | 0+     | 38,010  | 9,101    | 280,3980 |
|          | 22-Ti-39 | 26 мс             |        | 39,001  | 1,232    | 296,3380 |
|          | 22-Ti-40 | 50 мс             | 0+     | 39,990  | -8,850   | 314,4913 |
|          | 22-Ti-41 | 80 мс             | 3/2+   | 40,983  | -15,713  | 329,4260 |
|          | 22-Ti-42 | 199 мс            | 0+     | 41,973  | -25,121  | 346,9047 |
|          | 22-Ti-43 | 509 мс            | 7/2-   | 42,969  | -29,320  | 359,1754 |
|          | 22-Ti-44 | 60.0 лет          | 0+     | 43,960  | -37,548  | 375,4747 |
|          | 22-Ti-45 | 184.8 мин         | 7/2-   | 44,958  | -39,007  | 385,0047 |
|          | 22-Ti-46 | 8.25%             | 0+     | 45,953  | -44,125  | 398,1944 |
|          | 22-Ti-47 | 7.44%             | 5/2-   | 46,952  | -44,932  | 407,0721 |
|          | 22-Ti-48 | 73.72%            | 0+     | 47,948  | -48,487  | 418,6987 |
|          | 22-Ti-49 | 5.41%             | 7/2-   | 48,948  | -48,558  | 426,8411 |
|          | 22-Ti-50 | 5.18%             | 0+     | 49,945  | -51,426  | 437,7802 |
|          | 22-Ti-51 | 5.76 мин          | 3/2-   | 50,947  | -49,727  | 444,1525 |
|          | 22-Ti-52 | 1.7 мин           | 0+     | 51,947  | -49,464  | 451,9610 |
|          | 22-Ti-53 | 32.7 с            | (3/2)- | 52,950  | -46,825  | 457,3929 |
|          | 22-Ti-54 | 1 мкс             | 0+     | 53,951  | -45,764  | 464,4040 |
|          | 22-Ti-55 | 0.32 с            | (3/2-) | 54,955  | -41,805  | 468,5164 |
| 22-Ti-56 | 0.19 с   | 0+                | 55,958 | -39,132 | 473,9144 |          |
| 22-Ti-57 | 0.18 с   |                   | 56,963 | -34,558 | 477,4120 |          |
| 22-Ti-58 | 150 нс   | 0+                | 57,966 | -31,568 | 482,4930 |          |
| 22-Ti-61 | 10 мс    |                   | 60,982 | -16,750 | 491,8890 |          |
| Ванадий  | 23-V-40  |                   |        | 40,011  | 10,330   | 294,5290 |
|          | 23-V-41  |                   |        | 41,000  | -0,242   | 313,1720 |
|          | 23-V-42  | 55 нс             | (2-)   | 41,991  | -8,169   | 329,1710 |
|          | 23-V-43  | 800 мс            |        | 42,981  | -18,024  | 347,0970 |
|          | 23-V-44  | 111 мс            | (2+)   | 43,974  | -23,846  | 360,9900 |
|          | 23-V-45  | 547 мс            | 7/2-   | 44,966  | -31,874  | 377,0890 |
|          | 23-V-46  | 422.50 мс         | 0+     | 45,960  | -37,074  | 390,3607 |
|          | 23-V-47  | 32.6 мин          | 3/2-   | 46,955  | -42,004  | 403,3620 |
|          | 23-V-48  | 15.9735 дн.       | 4+     | 47,952  | -44,475  | 413,9040 |
|          | 23-V-49  | 330 дн.<br>0.250% | 7/2-   | 48,949  | -47,956  | 425,4569 |
|          | 23-V-50  | 1.4e+17 лет       | 6+     | 49,947  | -49,218  | 434,7895 |
|          | 23-V-51  | 99.750%           | 7/2-   | 50,944  | -52,198  | 445,8408 |
|          | 23-V-52  | 3.743 мин         | 3+     | 51,945  | -51,437  | 453,1521 |
|          | 23-V-53  | 1.60 мин          | 7/2-   | 52,944  | -51,845  | 461,6306 |
|          | 23-V-54  | 49.8 с            | 3+     | 53,946  | -49,887  | 467,7440 |
|          | 23-V-55  | 6.54 с            | (7/2-) | 54,947  | -49,147  | 475,0759 |
|          | 23-V-56  | 0.24 с            | 3+     | 55,950  | -46,239  | 480,2393 |
|          | 23-V-57  | 0.34 с            | (7/2-) | 56,952  | -44,376  | 486,4476 |
|          | 23-V-58  | 205 мс            |        | 57,957  | -40,380  | 490,5229 |
|          | 23-V-59  | 118 мс            |        | 58,959  | -37,912  | 496,1257 |
|          | 23-V-60  | 0.20 с            | (3+)   | 59,965  | -33,068  | 499,3533 |
|          | 23-V-61  | 150 нс            |        | 60,967  | -30,357  | 504,7140 |
|          | 23-V-62  | 150 нс            | (3+)   | 61,973  | -25,020  | 507,4480 |
| 23-V-63  | 150 нс   | (7/2-)            | 62,977 | -21,657 | 512,1560 |          |
| 23-V-64  | 150 нс   |                   |        | 0,000   |          |          |

|          |          |                    |                  |         |          |          |          |
|----------|----------|--------------------|------------------|---------|----------|----------|----------|
| Хром     | 24-Сг-42 | 350 нс             | 0+               | 42,006  | 5,990    | 314,2300 |          |
|          | 24-Сг-43 | 21 мс +4-3         | (3/2+)           | 42,998  | -2,136   | 330,4260 |          |
|          | 24-Сг-44 | 53 мс +4-3         | 0+               | 43,985  | -13,535  | 349,8960 |          |
|          | 24-Сг-45 | 50 мс              |                  | 44,979  | -19,412  | 363,8450 |          |
|          | 24-Сг-46 | 0.26 с             | 0+               | 45,968  | -29,471  | 381,9753 |          |
|          | 24-Сг-47 | 500 мс             | 3/2-             | 46,963  | -34,552  | 395,1280 |          |
|          | 24-Сг-48 | 21.56 ч            | 0+               | 47,954  | -42,815  | 411,4623 |          |
|          | 24-Сг-49 | 42.3 мин<br>4.345% | 5/2-             | 48,951  | -45,325  | 422,0438 |          |
|          | 24-Сг-50 | 1.8e+17 лет        | 0+               | 49,946  | -50,255  | 435,0441 |          |
|          | 24-Сг-51 | 27.7025 дн.        | 7/2-             | 50,945  | -51,445  | 444,3057 |          |
|          | 24-Сг-52 | 83.789%            | 0+               | 51,941  | -55,413  | 456,3451 |          |
|          | 24-Сг-53 | 9.501%             | 3/2-             | 52,941  | -55,281  | 464,2843 |          |
|          | 24-Сг-54 | 2.365%             | 0+               | 53,939  | -56,928  | 474,0033 |          |
|          | 24-Сг-55 | 3.497 мин          | 3/2-             | 54,941  | -55,103  | 480,2496 |          |
|          | 24-Сг-56 | 5.94 мин           | 0+               | 55,941  | -55,289  | 488,5062 |          |
|          | 24-Сг-57 | 21.1 с             | 3/2-, 5/2-, 7/2- | 56,944  | -52,393  | 493,6819 |          |
|          | 24-Сг-58 | 7.0 с              | 0+               | 57,944  | -51,931  | 501,2910 |          |
|          | 24-Сг-59 | 0.74 с             |                  | 58,949  | -47,851  | 505,2824 |          |
|          | 24-Сг-60 | 0.57 с             | 0+               | 59,950  | -46,826  | 512,3291 |          |
|          | 24-Сг-61 | 0.27 с             |                  | 60,954  | -42,765  | 516,3391 |          |
|          | 24-Сг-62 | 0.19 с             | 0+               | 61,956  | -41,172  | 522,8176 |          |
|          | 24-Сг-63 | 0.11 с             |                  | 62,962  | -35,527  | 525,2440 |          |
|          | 24-Сг-64 | 1 мкс              | 0+               | 63,964  | -33,347  | 531,1360 |          |
|          | 24-Сг-65 | 150 нс             | (1/2-)           | 64,970  | -27,600  | 533,4600 |          |
|          | 24-Сг-66 | 150 нс             | 0+               |         | 0,000    |          |          |
|          | 24-Сг-67 | 50 мс              |                  |         | 0,000    |          |          |
|          | Марганец | 25-Мп-44           | 105 нс           | (2-)    | 44,007   | 6,399    | 329,1800 |
|          |          | 25-Мп-45           | 70 нс            | (7/2-)  | 44,995   | -5,114   | 348,7650 |
| 25-Мп-46 |          | 41 мс +7-6         | (4+)             | 45,987  | -12,370  | 364,0920 |          |
| 25-Мп-47 |          | 100 мс             |                  | 46,976  | -22,263  | 382,0560 |          |
| 25-Мп-48 |          | 158.1 мс           | 4+               | 47,969  | -28,997  | 396,8620 |          |
| 25-Мп-49 |          | 382 мс             | 5/2-             | 48,960  | -37,611  | 413,5465 |          |
| 25-Мп-50 |          | 283.29 мс          | 0+               | 49,954  | -42,622  | 426,6288 |          |
| 25-Мп-51 |          | 46.2 мин           | 5/2-             | 50,948  | -48,237  | 440,3156 |          |
| 25-Мп-52 |          | 5.591 дн.          | 6+               | 51,946  | -50,701  | 450,8511 |          |
| 25-Мп-53 |          | 3.74e+6 лет        | 7/2-             | 52,941  | -54,684  | 462,9049 |          |
| 25-Мп-54 |          | 312.11 дн.         | 3+               | 53,940  | -55,551  | 471,8439 |          |
| 25-Мп-55 |          | 100%               | 5/2-             | 54,938  | -57,706  | 482,0703 |          |
| 25-Мп-56 |          | 2.5789 ч           | 3+               | 55,939  | -56,906  | 489,3408 |          |
| 25-Мп-57 |          | 85.4 с             | 5/2-             | 56,938  | -57,485  | 497,9914 |          |
| 25-Мп-58 |          | 3.0 с              | 1+               | 57,940  | -55,902  | 504,4801 |          |
| 25-Мп-59 |          | 4.6 с              | 3/2-, 5/2-       | 58,940  | -55,473  | 512,1223 |          |
| 25-Мп-60 |          | 51 с               | 0+               | 59,943  | -52,914  | 517,6350 |          |
| 25-Мп-61 |          | 0.67 с             | (5/2-)           | 60,944  | -51,735  | 524,5270 |          |
| 25-Мп-62 |          | 671 мс             | (3+)             | 61,948  | -48,466  | 529,3288 |          |
| 25-Мп-63 |          | 275 мс             |                  | 62,950  | -46,752  | 535,6862 |          |
| 25-Мп-64 |          | 89 мс              |                  | 63,954  | -43,100  | 540,1060 |          |
| 25-Мп-65 |          | 88 мс              |                  | 64,956  | -40,893  | 545,9697 |          |
| 25-Мп-66 | 66 мс    |                    | 65,961           | -36,496 | 549,6440 |          |          |
| 25-Мп-67 | 42 мс    | (5/2-)             | 66,964           | -33,701 | 554,9210 |          |          |
| 25-Мп-68 | 28 мс    |                    |                  | 0,000   |          |          |          |

|          | 25-Mn-69 | 14 мс              | 5/2-       |        | 0,000   |          |
|----------|----------|--------------------|------------|--------|---------|----------|
| Железо   | 26-Fe-45 | 350 нс             | (3/2+)     | 45,015 | 13,563  | 329,3060 |
|          | 26-Fe-46 | 20 мс +20-8        | 0+         | 46,001 | 0,755   | 350,1850 |
|          | 26-Fe-47 | 27 мс +32-10       |            | 46,993 | -6,623  | 365,6340 |
|          | 26-Fe-48 | 44 мс              | 0+         | 47,981 | -18,108 | 385,1910 |
|          | 26-Fe-49 | 70 мс              | (7/2-)     | 48,974 | -24,582 | 399,7360 |
|          | 26-Fe-50 | 155 мс             | 0+         | 49,963 | -34,472 | 417,6965 |
|          | 26-Fe-51 | 305 мс             | 5/2-       | 50,957 | -40,217 | 431,5136 |
|          | 26-Fe-52 | 8.275 ч            | 0+         | 51,948 | -48,329 | 447,6967 |
|          | 26-Fe-53 | 8.51 мин<br>5.845% | 7/2-       | 52,945 | -50,941 | 458,3802 |
|          | 26-Fe-54 | 3.1e+22 лет        | 0+         | 53,940 | -56,248 | 471,7587 |
|          | 26-Fe-55 | 2.73 лет           | 3/2-       | 54,938 | -57,475 | 481,0566 |
|          | 26-Fe-56 | 91.754%            | 0+         | 55,935 | -60,601 | 492,2539 |
|          | 26-Fe-57 | 2.119%             | 1/2-       | 56,935 | -60,176 | 499,8999 |
|          | 26-Fe-58 | 0.282%             | 0+         | 57,933 | -62,149 | 509,9444 |
|          | 26-Fe-59 | 44.472 дн.         | 3/2-       | 58,935 | -60,658 | 516,5253 |
|          | 26-Fe-60 | 1.5e+6 лет         | 0+         | 59,934 | -61,407 | 525,3451 |
|          | 26-Fe-61 | 5.98 мин           | 3/2-, 5/2- | 60,937 | -58,918 | 530,9270 |
|          | 26-Fe-62 | 68 с               | 0+         | 61,937 | -58,898 | 538,9787 |
|          | 26-Fe-63 | 6.1 с              | (5/2)-     | 62,940 | -55,779 | 543,9315 |
|          | 26-Fe-64 | 2.0 с              | 0+         | 63,941 | -55,079 | 551,3027 |
|          | 26-Fe-65 | 0.4 с              |            | 64,945 | -51,288 | 555,5828 |
|          | 26-Fe-66 | 0.44 с             | 0+         | 65,946 | -50,319 | 562,6854 |
|          | 26-Fe-67 | 0.47 с             |            | 66,950 | -46,575 | 567,0121 |
|          | 26-Fe-68 | 0.10 с             | 0+         | 67,953 | -44,237 | 572,7450 |
|          | 26-Fe-69 | 0.17 с             | 1/2-       | 68,958 | -39,402 | 575,9820 |
|          | 26-Fe-70 | 150 нс             | 0+         |        | 0,000   |          |
|          | 26-Fe-71 | 150 нс             | (7/2+)     |        | 0,000   |          |
| 26-Fe-72 | 150 нс   | 0+                 |            | 0,000  |         |          |
| Кобальт  | 27-Co-48 |                    |            | 48,002 | 1,639   | 364,6610 |
|          | 27-Co-49 | 35 нс              |            | 48,990 | -9,576  | 383,9470 |
|          | 27-Co-50 | 44 мс              | (6+)       | 49,982 | -17,195 | 399,6380 |
|          | 27-Co-51 | 200 нс             | (7/2-)     | 50,971 | -27,274 | 417,7880 |
|          | 27-Co-52 | 115 мс             | 6+         | 51,964 | -33,916 | 432,5010 |
|          | 27-Co-53 | 240 мс             | (7/2-)     | 52,954 | -42,639 | 449,2957 |
|          | 27-Co-54 | 193.28 мс          | 0+         | 53,948 | -48,005 | 462,7332 |
|          | 27-Co-55 | 17.53 ч            | 7/2-       | 54,942 | -54,024 | 476,8229 |
|          | 27-Co-56 | 77.233 дн.         | 4+         | 55,940 | -56,035 | 486,9055 |
|          | 27-Co-57 | 271.74 дн.         | 7/2-       | 56,936 | -59,340 | 498,2815 |
|          | 27-Co-58 | 70.86 дн.          | 2+         | 57,936 | -59,841 | 506,8546 |
|          | 27-Co-59 | 100%               | 7/2-       | 58,933 | -62,224 | 517,3081 |
|          | 27-Co-60 | 1925.1 дн.         | 5+         | 59,934 | -61,644 | 524,8000 |
|          | 27-Co-61 | 1.650 ч            | 7/2-       | 60,932 | -62,895 | 534,1222 |
|          | 27-Co-62 | 1.50 мин           | 2+         | 61,934 | -61,428 | 540,7266 |
|          | 27-Co-63 | 27.4 с             | (7/2)-     | 62,934 | -61,837 | 549,2068 |
|          | 27-Co-64 | 0.30 с             | 1+         | 63,936 | -59,789 | 555,2304 |
|          | 27-Co-65 | 1.20 с             | (7/2)-     | 64,936 | -59,164 | 562,6767 |
|          | 27-Co-66 | 0.233 с            | (3+)       | 65,940 | -56,052 | 567,6360 |
|          | 27-Co-67 | 0.425 с            | (7/2-)     | 66,941 | -55,321 | 574,9765 |
|          | 27-Co-68 | 0.18 с             |            | 67,944 | -51,828 | 579,5547 |
|          | 27-Co-69 | 0.27 с             | 7/2-       | 68,945 | -51,046 | 586,8436 |



|          |          |              |        |         |          |          |
|----------|----------|--------------|--------|---------|----------|----------|
|          | 27-Co-70 | 0.15 с       |        | 69,950  | -46,752  | 590,6210 |
|          | 27-Co-71 | 0.21 с       |        | 70,952  | -44,963  | 596,9040 |
|          | 27-Co-72 | 0.09 с       |        | 71,956  | -40,604  | 600,6160 |
|          | 27-Co-73 | 150 нс       | (7/2-) |         | 0,000    |          |
|          | 27-Co-74 | 150 нс       | 0+     |         | 0,000    |          |
|          | 27-Co-75 | 150 нс       | (7/2-) |         | 0,000    |          |
| Никель   | 28-Ni-49 | 350 нс       |        |         | 0,000    |          |
|          | 28-Ni-50 | 300 нс       | 0+     | 49,996  | -3,791   | 385,4510 |
|          | 28-Ni-51 | 200 нс       | (7/2-) | 50,988  | -11,439  | 401,1700 |
|          | 28-Ni-52 | 38 мс        | 0+     | 51,976  | -22,654  | 420,4570 |
|          | 28-Ni-53 | 45 мс        | (7/2-) | 52,968  | -29,379  | 435,2540 |
|          | 28-Ni-54 | 143 мс       | 0+     | 53,958  | -39,206  | 453,1516 |
|          | 28-Ni-55 | 204 мс       | 7/2-   | 54,951  | -45,330  | 467,3468 |
|          | 28-Ni-56 | 6.075 дн.    | 0+     | 55,942  | -53,900  | 483,9878 |
|          | 28-Ni-57 | 35.60 ч      | 3/2-   | 56,940  | -56,076  | 494,2350 |
|          | 28-Ni-58 | 68.077%      | 0+     | 57,935  | -60,223  | 506,4538 |
|          | 28-Ni-59 | 7.6с+4 лет   | 3/2-   | 58,934  | -61,151  | 515,4533 |
|          | 28-Ni-60 | 26.223%      | 0+     | 59,931  | -64,468  | 526,8416 |
|          | 28-Ni-61 | 1.140%       | 3/2-   | 60,931  | -64,217  | 534,6616 |
|          | 28-Ni-62 | 3.634%       | 0+     | 61,928  | -66,743  | 545,2588 |
|          | 28-Ni-63 | 100.1 лет    | 1/2-   | 62,930  | -65,509  | 552,0967 |
|          | 28-Ni-64 | 0.926%       | 0+     | 63,928  | -67,096  | 561,7547 |
|          | 28-Ni-65 | 2.5172 ч     | 5/2-   | 64,930  | -65,123  | 567,8527 |
|          | 28-Ni-66 | 54.6 ч       | 0+     | 65,929  | -66,029  | 576,8301 |
|          | 28-Ni-67 | 21 с         | (1/2-) | 66,932  | -63,743  | 582,6152 |
|          | 28-Ni-68 | 29 с         | 0+     | 67,932  | -63,486  | 590,4301 |
|          | 28-Ni-69 | 11.4 с       | 9/2+   | 68,935  | -60,378  | 595,3931 |
|          | 28-Ni-70 | 6.0 с        | 0+     | 69,936  | -59,485  | 602,5719 |
|          | 28-Ni-71 | 2.56 с       |        | 70,940  | -55,890  | 607,0477 |
|          | 28-Ni-72 | 1.57 с       | 0+     | 71,941  | -54,679  | 613,9080 |
|          | 28-Ni-73 | 0.84 с       |        | 72,946  | -50,226  | 617,5270 |
|          | 28-Ni-74 | 0.9 с        | 0+     | 73,948  | -48,522  | 623,8940 |
|          | 28-Ni-75 | 0.6 с        | (7/2+) | 74,953  | -43,808  | 627,2510 |
|          | 28-Ni-76 | 0.24 с+55-24 | 0+     | 75,955  | -41,610  | 633,1240 |
| 28-Ni-77 | 150 нс   |              | 76,961 | -36,487 | 636,0730 |          |
| 28-Ni-78 | 150 нс   | 0+           | 77,964 | -33,720 | 641,3770 |          |
| Медь     | 29-Cu-52 |              | 3+     | 51,997  | -2,627   | 399,6470 |
|          | 29-Cu-53 | 300 нс       | (3/2-) | 52,986  | -13,460  | 418,5520 |
|          | 29-Cu-54 | 75 нс        | (3+)   | 53,977  | -21,694  | 434,8580 |
|          | 29-Cu-55 | 200 нс       |        | 54,966  | -31,624  | 452,8590 |
|          | 29-Cu-56 | 78 мс        | 4+     | 55,959  | -38,601  | 467,9070 |
|          | 29-Cu-57 | 196.3 мс     | 3/2-   | 56,949  | -47,305  | 484,6824 |
|          | 29-Cu-58 | 3.204 с      | 1+     | 57,945  | -51,660  | 497,1084 |
|          | 29-Cu-59 | 81.5 с       | 3/2-   | 58,940  | -56,352  | 509,8713 |
|          | 29-Cu-60 | 23.7 мин     | 2+     | 59,937  | -58,341  | 519,9323 |
|          | 29-Cu-61 | 3.333 ч      | 3/2-   | 60,933  | -61,980  | 531,6420 |
|          | 29-Cu-62 | 9.67 мин     | 1+     | 61,933  | -62,795  | 540,5283 |
|          | 29-Cu-63 | 69.17%       | 3/2-   | 62,930  | -65,576  | 551,3813 |
|          | 29-Cu-64 | 12.700 ч     | 1+     | 63,930  | -65,421  | 559,2972 |
|          | 29-Cu-65 | 30.83%       | 3/2-   | 64,928  | -67,260  | 569,2075 |
|          | 29-Cu-66 | 5.120 мин    | 1+     | 65,929  | -66,254  | 576,2734 |
|          | 29-Cu-67 | 61.83 ч      | 3/2-   | 66,928  | -67,300  | 585,3905 |

|        |          |             |            |        |         |          |          |
|--------|----------|-------------|------------|--------|---------|----------|----------|
|        | 29-Cu-68 | 31.1 с      | 1+         | 67,930 | -65,542 | 591,7036 |          |
|        | 29-Cu-69 | 2.85 мин    | 3/2-       | 68,929 | -65,740 | 599,9729 |          |
|        | 29-Cu-70 | 4.5 с       | 1+         | 69,932 | -62,960 | 605,2647 |          |
|        | 29-Cu-71 | 19.5 с      | (3/2-)     | 70,933 | -62,764 | 613,1399 |          |
|        | 29-Cu-72 | 6.6 с       | (1+)       | 71,936 | -60,063 | 618,5100 |          |
|        | 29-Cu-73 | 3.9 с       |            | 72,936 | -59,159 | 625,6770 |          |
|        | 29-Cu-74 | 1.594 с     | (1+,3+)    | 73,940 | -55,703 | 630,2930 |          |
|        | 29-Cu-75 | 1.224 с     | (3/2-)     | 74,942 | -54,306 | 636,9670 |          |
|        | 29-Cu-77 | 0.469 с     |            | 76,948 | -48,484 | 647,2880 |          |
|        | 29-Cu-78 | 342 мс      |            | 77,953 | -43,957 | 650,8320 |          |
|        | 29-Cu-79 | 188 мс      |            | 78,955 | -41,656 | 656,6030 |          |
|        | 29-Cu-80 | 150 нс      |            | 79,962 | -35,499 | 658,5170 |          |
| Цинк   | 30-Zn-54 |             | 0+         | 53,993 | -6,567  | 418,9480 |          |
|        | 30-Zn-55 |             |            | 54,984 | -14,923 | 435,3750 |          |
|        | 30-Zn-56 | 36 мс       | 0+         | 55,972 | -25,728 | 454,2510 |          |
|        | 30-Zn-57 | 40 мс       | (7/2-)     | 56,965 | -32,686 | 469,2810 |          |
|        | 30-Zn-58 | 86 мс       | 0+         | 57,955 | -42,293 | 486,9592 |          |
|        | 30-Zn-59 | 182.0 мс    | 3/2-       | 58,949 | -47,257 | 499,9949 |          |
|        | 30-Zn-60 | 2.38 мин    | 0+         | 59,942 | -54,183 | 514,9919 |          |
|        | 30-Zn-61 | 89.1 с      | 3/2-       | 60,940 | -56,342 | 525,2225 |          |
|        | 30-Zn-62 | 9.186 ч     | 0+         | 61,934 | -61,167 | 538,1188 |          |
|        | 30-Zn-63 | 38.47 мин   | 3/2-       | 62,933 | -62,209 | 547,2320 |          |
|        | 30-Zn-64 | 48.63%      | 0+         | 63,929 | -66,000 | 559,0936 |          |
|        | 30-Zn-65 | 244.26 дн.  | 5/2-       | 64,929 | -65,908 | 567,0732 |          |
|        | 30-Zn-66 | 27.90%      | 0+         | 65,926 | -68,896 | 578,1330 |          |
|        | 30-Zn-67 | 4.10%       | 5/2-       | 66,927 | -67,877 | 585,1852 |          |
|        | 30-Zn-68 | 18.75%      | 0+         | 67,925 | -70,004 | 595,3834 |          |
|        | 30-Zn-69 | 56.4 мин    | 1/2-       | 68,927 | -68,415 | 601,8656 |          |
|        |          | 0.62% 5e+14 |            |        |         |          |          |
|        |          | 30-Zn-70    | лет        | 0+     | 69,925  | -69,559  | 611,0814 |
|        |          | 30-Zn-71    | 2.45 мин   | 1/2-   | 70,928  | -67,322  | 616,9150 |
|        |          | 30-Zn-72    | 46.5 ч     | 0+     | 71,927  | -68,128  | 625,7931 |
|        |          | 30-Zn-73    | 23.5 с     | (1/2-) | 72,930  | -65,410  | 631,1460 |
|        |          | 30-Zn-74    | 95.6 с     | 0+     | 73,929  | -65,709  | 639,5165 |
|        |          | 30-Zn-75    | 10.2 с     | (7/2+) | 74,933  | -62,468  | 644,3470 |
|        |          | 30-Zn-76    | 5.7 с      | 0+     | 75,933  | -62,043  | 651,9928 |
|        |          | 30-Zn-77    | 2.08 с     | (7/2+) | 76,937  | -58,604  | 656,6254 |
|        |          | 30-Zn-78    | 1.47 с     | 0+     | 77,939  | -57,222  | 663,3146 |
|        |          | 30-Zn-79    | 0.995 с    | (9/2+) | 78,943  | -53,398  | 667,5620 |
|        | 30-Zn-80 | 0.545 с     | 0+         | 79,944 | -51,777 | 674,0126 |          |
|        | 30-Zn-81 | 0.29 с      |            | 80,950 | -46,128 | 676,4340 |          |
|        | 30-Zn-82 | 150 нс      | 0+         | 81,955 | -42,066 | 680,4440 |          |
|        | 30-Zn-83 | 150 нс      | (5/2+)     |        | 0,000   |          |          |
| Галлий | 31-Ga-56 |             |            | 55,995 | -4,741  | 432,4820 |          |
|        | 31-Ga-57 |             |            | 56,983 | -15,901 | 451,7130 |          |
|        | 31-Ga-58 |             |            | 57,974 | -23,986 | 467,8700 |          |
|        | 31-Ga-59 |             |            | 58,963 | -34,121 | 486,0760 |          |
|        | 31-Ga-60 | 1.2 мкс     |            | 59,957 | -39,998 | 500,0250 |          |
|        | 31-Ga-61 | 0.15 с      | 3/2-       | 60,949 | -47,348 | 515,4460 |          |
|        | 31-Ga-62 | 116.12 мс   | 0+         | 61,944 | -51,996 | 528,1654 |          |
|        | 31-Ga-63 | 32.4 с      | 3/2-, 5/2- | 62,939 | -56,689 | 540,9297 |          |
|        | 31-Ga-64 | 2.627 мин   | 0+         | 63,937 | -58,835 | 551,1464 |          |

|          |          |                    |         |         |          |          |
|----------|----------|--------------------|---------|---------|----------|----------|
|          | 31-Ga-65 | 15.2 мин           | 3/2-    | 64,933  | -62,653  | 563,0359 |
|          | 31-Ga-66 | 9.49 ч             | 0+      | 65,932  | -63,721  | 572,1757 |
|          | 31-Ga-67 | 3.2612 дн.         | 3/2-    | 66,928  | -66,877  | 583,4024 |
|          | 31-Ga-68 | 67.629 мин         | 1+      | 67,928  | -67,083  | 591,6799 |
|          | 31-Ga-69 | 60.108%            | 3/2-    | 68,926  | -69,321  | 601,9892 |
|          | 31-Ga-70 | 21.14 мин          | 1+      | 69,926  | -68,905  | 609,6443 |
|          | 31-Ga-71 | 39.892%            | 3/2-    | 70,925  | -70,137  | 618,9478 |
|          | 31-Ga-72 | 14.10 ч            | 3-      | 71,926  | -68,587  | 625,4688 |
|          | 31-Ga-73 | 4.86 ч             | 3/2-    | 72,925  | -69,704  | 634,6575 |
|          | 31-Ga-74 | 8.12 мин           | (3-)    | 73,927  | -68,054  | 641,0789 |
|          | 31-Ga-75 | 126 с              | (3/2-)  | 74,927  | -68,464  | 649,5605 |
|          | 31-Ga-76 | 32.6 с             | (2+,3+) | 75,929  | -66,203  | 655,3705 |
|          | 31-Ga-77 | 13.2 с             | (3/2-)  | 76,929  | -65,874  | 663,1130 |
|          | 31-Ga-78 | 5.09 с             | (3+)    | 77,932  | -63,662  | 668,9723 |
|          | 31-Ga-79 | 2.847 с            | (3/2-)  | 78,933  | -62,488  | 675,8695 |
|          | 31-Ga-80 | 1.697 с            | -3      | 79,937  | -59,068  | 680,5206 |
|          | 31-Ga-81 | 1.217 с            | (5/2-)  | 80,938  | -57,983  | 687,5069 |
|          | 31-Ga-82 | 0.599 с            | (1,2,3) | 81,943  | -52,946  | 690,5420 |
|          | 31-Ga-83 | 0.31 с             |         | 82,947  | -49,490  | 695,1570 |
|          | 31-Ga-84 | 0.085 с            |         | 83,952  | -44,395  | 698,1330 |
|          | 31-Ga-85 | 150 нс             | (3/2-)  |         | 0,000    |          |
|          | 31-Ga-86 | 150 нс             |         |         | 0,000    |          |
| Германий | 32-Gr-58 |                    | 0+      | 57,991  | -8,374   | 451,4760 |
|          | 32-Gr-59 |                    |         | 58,982  | -17,000  | 468,1720 |
|          | 32-Gr-60 | 30 мс              | 0+      | 59,970  | -27,768  | 487,0120 |
|          | 32-Gr-61 | 40 мс              | (3/2-)  | 60,964  | -33,729  | 501,0450 |
|          | 32-Gr-62 | 150 нс             | 0+      | 61,955  | -42,243  | 517,6300 |
|          | 32-Gr-63 | 95 мс +23-20       |         | 62,950  | -46,910  | 530,3680 |
|          | 32-Gr-64 | 63.7 с             | 0+      | 63,942  | -54,425  | 545,9541 |
|          | 32-Gr-65 | 30.9 с             | (3/2-)  | 64,939  | -56,411  | 556,0112 |
|          | 32-Gr-66 | 2.26 ч             | 0+      | 65,934  | -61,621  | 569,2933 |
|          | 32-Gr-67 | 18.9 мин           | 1/2-    | 66,933  | -62,654  | 578,3971 |
|          | 32-Gr-68 | 270.8 дн.          | 0+      | 67,928  | -66,977  | 590,7916 |
|          | 32-Gr-69 | 39.05 ч            | 5/2-    | 68,928  | -67,094  | 598,9796 |
|          | 32-Gr-70 | 20.37%             | 0+      | 69,924  | -70,560  | 610,5176 |
|          | 32-Gr-71 | 11.43 дн.          | 1/2-    | 70,925  | -69,905  | 617,9335 |
|          | 32-Gr-72 | 27.31%             | 0+      | 71,922  | -72,586  | 628,6855 |
|          | 32-Gr-73 | 7.76%              | 9/2+    | 72,923  | -71,297  | 635,4684 |
|          | 32-Gr-74 | 36.73%             | 0+      | 73,921  | -73,422  | 645,6646 |
|          | 32-Gr-75 | 82.78 мин<br>7.83% | 1/2-    | 74,923  | -71,856  | 652,1698 |
|          | 32-Gr-76 | 0.8e+25 лет        | 0+      | 75,921  | -73,213  | 661,5981 |
|          | 32-Gr-77 | 11.30 ч            | 7/2+    | 76,924  | -71,214  | 667,6707 |
|          | 32-Gr-78 | 88.0 мин           | 0+      | 77,923  | -71,862  | 676,3899 |
|          | 32-Gr-79 | 18.98 с            | (1/2-)  | 78,925  | -69,488  | 682,0872 |
|          | 32-Gr-80 | 29.5 с             | 0+      | 79,925  | -69,448  | 690,1183 |
|          | 32-Gr-81 | 7.6 с              | (9/2+)  | 80,929  | -66,303  | 695,0446 |
|          | 32-Gr-82 | 4.60 с             | 0+      | 81,930  | -65,623  | 702,4366 |
|          | 32-Gr-83 | 1.85 с             | (5/2+)  | 82,935  | -61,004  | 705,8880 |
| 32-Gr-84 | 0.947 с  | 0+                 | 83,937  | -58,395 | 711,3510 |          |
| 32-Gr-85 | 535 мс   |                    | 84,943  | -53,384 | 714,4110 |          |
| 32-Gr-86 | 150 нс   | 0+                 | 85,946  | -50,049 | 719,1480 |          |

|          |          |              |              |        |         |          |          |
|----------|----------|--------------|--------------|--------|---------|----------|----------|
|          | 32-Gr-87 | 150 нс       | (5/2+)       |        | 0,000   |          |          |
|          | 32-Gr-88 | 150 нс       | 0+           |        | 0,000   |          |          |
|          | 32-Gr-89 | 150 нс       |              |        | 0,000   |          |          |
| Мышьяк   | 33-As-60 |              |              |        | 59,993  | -6,399   | 464,8610 |
|          | 33-As-61 |              |              |        | 60,981  | -18,052  | 484,5850 |
|          | 33-As-62 |              |              |        | 61,973  | -24,964  | 499,5680 |
|          | 33-As-63 |              |              |        | 62,964  | -33,823  | 516,4980 |
|          | 33-As-64 | 1.2 мкс      |              |        | 63,958  | -39,521  | 530,2680 |
|          | 33-As-65 | 0.19 с +11-7 |              |        | 64,949  | -47,056  | 545,8740 |
|          | 33-As-66 | 95.77 мс     |              |        | 65,944  | -51,821  | 558,7110 |
|          | 33-As-67 | 42.5 с       | (5/2-)       |        | 66,939  | -56,644  | 571,6047 |
|          | 33-As-68 | 151.6 с      | 3+           |        | 67,937  | -58,877  | 581,9092 |
|          | 33-As-69 | 15.2 мин     | 5/2-         |        | 68,932  | -63,081  | 594,1842 |
|          | 33-As-70 | 52.6 мин     | 4(+)         |        | 69,931  | -64,340  | 603,5153 |
|          | 33-As-71 | 65.28 ч      | 5/2-         |        | 70,927  | -67,892  | 615,1384 |
|          | 33-As-72 | 26.0 ч       | 2-           |        | 71,927  | -68,230  | 623,5470 |
|          | 33-As-73 | 80.30 дн.    | 3/2-         |        | 72,924  | -70,956  | 634,3452 |
|          | 33-As-74 | 17.77 дн.    | 2-           |        | 73,924  | -70,860  | 642,3198 |
|          | 33-As-75 | 100%         | 3/2-         |        | 74,922  | -73,033  | 652,5640 |
|          | 33-As-76 | 1.0778 дн.   | 2-           |        | 75,922  | -72,290  | 659,8924 |
|          | 33-As-77 | 38.83 ч      | 3/2-         |        | 76,921  | -73,916  | 669,5904 |
|          | 33-As-78 | 90.7 мин     | 2-           |        | 77,922  | -72,816  | 676,5617 |
|          | 33-As-79 | 9.01 мин     | 3/2-         |        | 78,921  | -73,636  | 685,4528 |
|          | 33-As-80 | 15.2 с       | 1+           |        | 79,923  | -72,118  | 692,0061 |
|          | 33-As-81 | 33.3 с       | 3/2-         |        | 80,922  | -72,533  | 700,4922 |
|          | 33-As-82 | 19.1 с       | (1+)         |        | 81,925  | -70,323  | 706,3542 |
|          | 33-As-83 | 13.4 с       | (5/2-, 3/2-) |        | 82,925  | -69,880  | 713,9822 |
|          | 33-As-84 | 3.24 с       | (3-)         |        | 83,929  | -66,080  | 718,2540 |
|          | 33-As-85 | 2.021 с      | (3/2-)       |        | 84,932  | -63,519  | 723,7630 |
|          | 33-As-86 | 0.945 с      |              |        | 85,936  | -59,401  | 727,7170 |
| 33-As-87 | 0.48 с   | (3/2-)       |              | 86,940 | -56,281 | 732,6680 |          |
| 33-As-88 | 150 нс   |              |              | 87,945 | -51,642 | 736,1010 |          |
| 33-As-89 |          |              |              | 88,949 | -47,292 | 739,8220 |          |
| 33-As-90 | 150 нс   |              |              |        | 0,000   |          |          |
| 33-As-91 | 150 нс   |              |              |        | 0,000   |          |          |
| 33-As-92 | 150 нс   |              |              |        | 0,000   |          |          |
| Селен    | 34-Se-65 | 50 мс        |              |        | 64,965  | -32,919  | 530,9550 |
|          | 34-Se-66 | 1.2 мкс      | 0+           |        | 65,955  | -41,722  | 547,8290 |
|          | 34-Se-67 | 60 мс +17-11 |              |        | 66,950  | -46,491  | 560,6690 |
|          | 34-Se-68 | 35.5 с       | 0+           |        | 67,942  | -54,148  | 576,3980 |
|          | 34-Se-69 | 27.4 с       | (1/2-, 3/2-) |        | 68,940  | -56,298  | 586,6187 |
|          | 34-Se-70 | 41.1 мин     | 0+           |        | 69,934  | -61,940  | 600,3330 |
|          | 34-Se-71 | 4.74 мин     | 5/2-         |        | 70,932  | -63,092  | 609,5560 |
|          | 34-Se-72 | 8.40 дн.     | 0+           |        | 71,927  | -67,894  | 622,4297 |
|          | 34-Se-73 | 7.15 ч       | 9/2+         |        | 72,927  | -68,216  | 630,8228 |
|          | 34-Se-74 | 0.89%        | 0+           |        | 73,922  | -72,213  | 642,8905 |
|          | 34-Se-75 | 119.779 дн.  | 5/2+         |        | 74,923  | -72,169  | 650,9180 |
|          | 34-Se-76 | 9.37%        | 0+           |        | 75,919  | -75,252  | 662,0721 |
|          | 34-Se-77 | 7.63%        | 1/2-         |        | 76,920  | -74,599  | 669,4909 |
|          | 34-Se-78 | 23.77%       | 0+           |        | 77,917  | -77,026  | 679,9888 |
|          | 34-Se-79 | 1.1с+6 лет   | 7/2+         |        | 78,918  | -75,917  | 686,9514 |
| 34-Se-80 | 49.61%   | 0+           |              | 79,917 | -77,759 | 696,8652 |          |

|          |          |                    |        |         |          |          |
|----------|----------|--------------------|--------|---------|----------|----------|
|          | 34-Se-81 | 18.45 мин<br>8.73% | 1/2-   | 80,918  | -76,389  | 703,5662 |
|          | 34-Se-82 | 0.83e+20 лет       | 0+     | 81,917  | -77,593  | 712,8419 |
|          | 34-Se-83 | 22.3 мин           | 9/2+   | 82,919  | -75,340  | 718,6599 |
|          | 34-Se-84 | 3.10 мин           | 0+     | 83,918  | -75,950  | 727,3409 |
|          | 34-Se-85 | 31.7 с             | (5/2+) | 84,922  | -72,429  | 731,8910 |
|          | 34-Se-86 | 15.3 с             | 0+     | 85,924  | -70,541  | 738,0747 |
|          | 34-Se-87 | 5.29 с             | (5/2+) | 86,929  | -66,583  | 742,1876 |
|          | 34-Se-88 | 1.53 с             | 0+     | 87,931  | -63,878  | 747,5545 |
|          | 34-Se-89 | 0.41 с             | (5/2+) | 88,936  | -59,597  | 751,3450 |
|          | 34-Se-90 | 150 нс             | 0+     | 89,939  | -56,430  | 756,2490 |
|          | 34-Se-91 | 0.27 с             |        | 90,945  | -50,888  | 758,7780 |
|          | 34-Se-92 | 150 нс             | 0+     | 91,949  | -47,199  | 763,1600 |
|          | 34-Se-93 | 150 нс             | (1/2+) |         | 0,000    |          |
|          | 34-Se-94 | 150 нс             | 0+     |         | 0,000    |          |
| Бром     | 35-Br-67 |                    |        | 66,965  | -32,798  | 546,1940 |
|          | 35-Br-68 | 1.2 мкс            |        | 67,958  | -38,892  | 560,3590 |
|          | 35-Br-69 | 24 нс              |        | 68,950  | -46,409  | 575,9480 |
|          | 35-Br-70 | 79.1 мс            |        | 69,945  | -51,590  | 589,2010 |
|          | 35-Br-71 | 21.4 с             | (5/2)- | 70,939  | -56,592  | 602,2740 |
|          | 35-Br-72 | 78.6 с             | 3+     | 71,936  | -59,153  | 612,9056 |
|          | 35-Br-73 | 3.4 мин            | 1/2-   | 72,932  | -63,533  | 625,3568 |
|          | 35-Br-74 | 25.4 мин           | (0-)   | 73,930  | -65,306  | 635,2015 |
|          | 35-Br-75 | 96.7 мин           | 3/2-   | 74,926  | -69,139  | 647,1057 |
|          | 35-Br-76 | 16.2 ч             | 1-     | 75,925  | -70,289  | 656,3269 |
|          | 35-Br-77 | 57.036 ч           | 3/2-   | 76,921  | -73,234  | 667,3434 |
|          | 35-Br-78 | 6.46 мин           | 1+     | 77,921  | -73,452  | 675,6327 |
|          | 35-Br-79 | 50.69%             | 3/2-   | 78,918  | -76,068  | 686,3201 |
|          | 35-Br-80 | 17.68 мин          | 1+     | 79,919  | -75,889  | 694,2123 |
|          | 35-Br-81 | 49.31%             | 3/2-   | 80,916  | -77,974  | 704,3691 |
|          | 35-Br-82 | 35.30 ч            | 5-     | 81,917  | -77,496  | 711,9620 |
|          | 35-Br-83 | 2.40 ч             | 3/2-   | 82,915  | -79,009  | 721,5465 |
|          | 35-Br-84 | 31.80 мин          | 2-     | 83,917  | -77,776  | 728,3851 |
|          | 35-Br-85 | 2.90 мин           | 3/2-   | 84,916  | -78,611  | 737,2907 |
|          | 35-Br-86 | 55.1 с             | (2-)   | 85,919  | -75,640  | 742,3913 |
|          | 35-Br-87 | 55.60 с            | 3/2-   | 86,921  | -73,858  | 748,6802 |
| 35-Br-88 | 16.29 с  | (1,2-)             | 87,924 | -70,732 | 753,6262 |          |
| 35-Br-89 | 4.40 с   | (3/2-, 5/2-)       | 88,926 | -68,570 | 759,5352 |          |
| 35-Br-90 | 1.91 с   |                    | 89,931 | -64,613 | 763,6498 |          |
| 35-Br-91 | 0.541 с  |                    | 90,934 | -61,511 | 768,6189 |          |
| 35-Br-92 | 0.343 с  | (2-)               | 91,939 | -56,583 | 771,7627 |          |
| 35-Br-93 | 102 мс   | (5/2-)             | 92,943 | -53,002 | 776,2530 |          |
| 35-Br-94 | 70 мс    |                    | 93,949 | -47,804 | 779,1260 |          |
| 35-Br-95 | 150 нс   | (3/2-)             |        | 0,000   |          |          |
| 35-Br-96 | 150 нс   |                    |        | 0,000   |          |          |
| 35-Br-97 | 150 нс   | (3/2-)             |        | 0,000   |          |          |
| Криптон  | 36-Kr-69 | 32 мс              |        | 68,965  | -32,304  | 561,0610 |
|          | 36-Kr-70 | 1.2 мкс            | 0+     | 69,956  | -40,976  | 577,8040 |
|          | 36-Kr-71 | 100 мс             | (5/2)- | 70,951  | -46,100  | 590,9990 |
|          | 36-Kr-72 | 17.2 с             | 0+     | 71,942  | -54,113  | 607,0833 |
|          | 36-Kr-73 | 27.0 с             | 5/2-   | 72,939  | -56,885  | 617,9271 |
|          | 36-Kr-74 | 11.50 мин          | 0+     | 73,933  | -62,170  | 631,2827 |

|         |           |                      |        |        |         |          |
|---------|-----------|----------------------|--------|--------|---------|----------|
|         | 36-Кг-75  | 4.29 мин             | 5/2+   | 74,931 | -64,242 | 641,4261 |
|         | 36-Кг-76  | 14.8 ч               | 0+     | 75,926 | -68,979 | 654,2345 |
|         | 36-Кг-77  | 74.4 мин<br>0.35%    | 5/2+   | 76,925 | -70,171 | 663,4985 |
|         | 36-Кг-78  | 0.9е+20 лет          | 0+     | 77,920 | -74,160 | 675,5582 |
|         | 36-Кг-79  | 35.04 ч              | 1/2-   | 78,920 | -74,442 | 683,9120 |
|         | 36-Кг-80  | 2.28%                | 0+     | 79,916 | -77,893 | 695,4344 |
|         | 36-Кг-81  | 2.29е+5 лет          | 7/2+   | 80,917 | -77,694 | 703,3061 |
|         | 36-Кг-82  | 11.58%               | 0+     | 81,913 | -80,589 | 714,2723 |
|         | 36-Кг-83  | 11.49%               | 9/2+   | 82,914 | -79,982 | 721,7369 |
|         | 36-Кг-84  | 57.00%               | 0+     | 83,912 | -82,431 | 732,2574 |
|         | 36-Кг-85  | 3934.4 дн.           | 9/2+   | 84,913 | -81,481 | 739,3783 |
|         | 36-Кг-86  | 17.30%               | 0+     | 85,911 | -83,266 | 749,2350 |
|         | 36-Кг-87  | 76.3 мин             | 5/2+   | 86,913 | -80,710 | 754,7503 |
|         | 36-Кг-88  | 2.84 ч               | 0+     | 87,914 | -79,692 | 761,8038 |
|         | 36-Кг-89  | 3.15 мин             | 3/2(+) | 88,918 | -76,725 | 766,9078 |
|         | 36-Кг-90  | 32.32 с              | 0+     | 89,920 | -74,963 | 773,2174 |
|         | 36-Кг-91  | 8.57 с               | 5/2(+) | 90,923 | -71,313 | 777,6386 |
|         | 36-Кг-92  | 1.840 с              | 0+     | 91,926 | -68,788 | 783,1852 |
|         | 36-Кг-93  | 1.286 с              | 1/2+   | 92,931 | -64,026 | 786,4943 |
|         | 36-Кг-94  | 0.20 с               | 0+     | 93,934 | -61,141 | 791,6810 |
|         | 36-Кг-95  | 0.78 с               | 38719  | 94,940 | -56,039 | 794,6500 |
|         | 36-Кг-96  | 50 мс                | 0+     | 95,943 | -53,030 | 799,7120 |
|         | 36-Кг-97  | 150 нс               |        | 96,949 | -47,916 | 802,6700 |
|         | 36-Кг-98  | 150 нс               | 0+     |        | 0,000   |          |
|         | 36-Кг-99  | 150 нс               | (3/2+) |        | 0,000   |          |
|         | 36-Кг-100 | 150 нс               | 0+     |        | 0,000   |          |
| Рубидий | 37-Rb-71  |                      |        | 70,965 | -32,304 | 576,4210 |
|         | 37-Rb-72  | 1.2 мкс              | (3+)   | 71,959 | -38,117 | 590,3050 |
|         | 37-Rb-73  | 30 нс                | (5/2-) | 72,950 | -46,234 | 606,4930 |
|         | 37-Rb-74  | 64.9 мс              | (0+)   | 73,944 | -51,726 | 620,0563 |
|         | 37-Rb-75  | 19.0 с               | (3/2-) | 74,939 | -57,222 | 633,6245 |
|         | 37-Rb-76  | 36.5 с               | 1(-)   | 75,935 | -60,481 | 644,9540 |
|         | 37-Rb-77  | 3.77 мин             | 3/2-   | 76,930 | -64,826 | 657,3706 |
|         | 37-Rb-78  | 17.66 мин            | 0(+)   | 77,928 | -66,936 | 667,5519 |
|         | 37-Rb-79  | 22.9 мин             | 5/2+   | 78,924 | -70,797 | 679,4840 |
|         | 37-Rb-80  | 33.4 с               | 1+     | 79,923 | -72,173 | 688,9315 |
|         | 37-Rb-81  | 4.576 ч              | 3/2-   | 80,919 | -75,456 | 700,2865 |
|         | 37-Rb-82  | 1.273 мин            | 1+     | 81,918 | -76,189 | 709,0904 |
|         | 37-Rb-83  | 86.2 дн.             | 5/2-   | 82,915 | -79,073 | 720,0454 |
|         | 37-Rb-84  | 32.77 дн.            | 2-     | 83,914 | -79,750 | 728,7942 |
|         | 37-Rb-85  | 72.17%               | 5/2-   | 84,912 | -82,168 | 739,2831 |
|         | 37-Rb-86  | 18.631 дн.<br>27.83% | 2-     | 85,911 | -82,747 | 747,9340 |
|         | 37-Rb-87  | 4.75е+10 лет         | 3/2-   | 86,909 | -84,595 | 757,8531 |
|         | 37-Rb-88  | 17.78 мин            | 2-     | 87,911 | -82,606 | 763,9356 |
|         | 37-Rb-89  | 15.15 мин            | 3/2-   | 88,912 | -81,711 | 771,1114 |
|         | 37-Rb-90  | 158 с                | 0-     | 89,915 | -79,355 | 776,8269 |
|         | 37-Rb-91  | 58.4 с               | 3/2(-) | 90,917 | -77,748 | 783,2912 |
|         | 37-Rb-92  | 4.492 с              | 0-     | 91,920 | -74,775 | 788,3899 |
|         | 37-Rb-93  | 5.84 с               | 5/2-   | 92,922 | -72,626 | 794,3119 |
|         | 37-Rb-94  | 2.702 с              | 3(-)   | 93,926 | -68,551 | 798,3084 |

|           |           |              |         |         |          |          |
|-----------|-----------|--------------|---------|---------|----------|----------|
|           | 37-Rb-95  | 377.5 мс     | 5/2-    | 94,929  | -65,839  | 803,6673 |
|           | 37-Rb-96  | 202.8 мс     | 2+      | 95,934  | -61,214  | 807,1140 |
|           | 37-Rb-97  | 169.9 мс     | 3/2+    | 96,937  | -58,365  | 812,3360 |
|           | 37-Rb-98  | 114 мс       | (1,0)   | 97,942  | -54,303  | 816,3453 |
|           | 37-Rb-99  | 50.3 мс      | (5/2+)  | 98,945  | -50,840  | 820,9542 |
|           | 37-Rb-100 | 51 мс        |         | 99,950  | -46,696  | 824,8810 |
|           | 37-Rb-101 | 32 мс        | (3/2+)  | 100,953 | -43,598  | 829,8542 |
| Стронций  | 38-Sr-73  |              |         | 72,966  | -31,699  | 591,1760 |
|           | 38-Sr-74  | 1.2 мкс      | 0+      | 73,956  | -40,697  | 608,2450 |
|           | 38-Sr-75  | 71 мс +71-24 | (3/2-)  | 74,950  | -46,649  | 622,2690 |
|           | 38-Sr-76  | 8.9 с        | 0+      | 75,942  | -54,390  | 638,0810 |
|           | 38-Sr-77  | 9.0 с        | 5/2+    | 76,938  | -57,975  | 649,7372 |
|           | 38-Sr-78  | 2.5 мин      | 0+      | 77,932  | -63,175  | 663,0083 |
|           | 38-Sr-79  | 2.25 мин     | 3/2(-)  | 78,930  | -65,477  | 673,3825 |
|           | 38-Sr-80  | 106.3 мин    | 0+      | 79,925  | -70,305  | 686,2813 |
|           | 38-Sr-81  | 22.3 мин     | 1/2-    | 80,923  | -71,527  | 695,5742 |
|           | 38-Sr-82  | 25.55 дн.    | 0+      | 81,918  | -76,009  | 708,1278 |
|           | 38-Sr-83  | 32.41 ч      | 7/2+    | 82,918  | -76,797  | 716,9873 |
|           | 38-Sr-84  | 0.56%        | 0+      | 83,913  | -80,644  | 728,9060 |
|           | 38-Sr-85  | 64.84 дн.    | 9/2+    | 84,913  | -81,103  | 737,4357 |
|           | 38-Sr-86  | 9.86%        | 0+      | 85,909  | -84,522  | 748,9259 |
|           | 38-Sr-87  | 7.00%        | 9/2+    | 86,909  | -84,878  | 757,3540 |
|           | 38-Sr-88  | 82.58%       | 0+      | 87,906  | -87,920  | 768,4666 |
|           | 38-Sr-89  | 50.53 дн.    | 5/2+    | 88,907  | -86,207  | 774,8254 |
|           | 38-Sr-90  | 28.79 лет    | 0+      | 89,908  | -85,942  | 782,6315 |
|           | 38-Sr-91  | 9.63 ч       | 5/2+    | 90,910  | -83,639  | 788,3999 |
|           | 38-Sr-92  | 2.71 ч       | 0+      | 91,911  | -82,875  | 795,7074 |
|           | 38-Sr-93  | 7.423 мин    | 5/2+    | 92,914  | -80,088  | 800,9912 |
|           | 38-Sr-94  | 75.3 с       | 0+      | 93,915  | -78,842  | 807,8167 |
|           | 38-Sr-95  | 23.90 с      | 1/2+    | 94,919  | -75,117  | 812,1636 |
| 38-Sr-96  | 1.07 с    | 0+           | 95,922  | -72,954 | 818,0717 |          |
| 38-Sr-97  | 429 мс    | 1/2+         | 96,926  | -68,792 | 821,9809 |          |
| 38-Sr-98  | 0.653 с   | 0+           | 97,928  | -66,629 | 827,8889 |          |
| 38-Sr-99  | 0.269 с   | 3/2+         | 98,933  | -62,117 | 831,4482 |          |
| 38-Sr-100 | 202 мс    | 0+           | 99,935  | -60,220 | 837,6223 |          |
| 38-Sr-101 | 118 мс    | (5/2-)       | 100,941 | -55,408 | 840,8818 |          |
| 38-Sr-102 | 69 мс     | 0+           | 101,943 | -53,078 | 846,6231 |          |
| 38-Sr-103 | 150 нс    |              | 102,949 | -47,553 | 849,1700 |          |
| 38-Sr-104 | 150 нс    | 0+           | 103,952 | -44,404 | 854,0920 |          |
| 38-Sr-105 | 150 нс    |              |         | 0,000   |          |          |
| Иттрий    | 39-Y-77   | 1.2 мкс      |         | 76,950  | -46,929  | 637,9090 |
|           | 39-Y-78   | 55 мс        | (0+)    | 77,944  | -52,629  | 651,6810 |
|           | 39-Y-79   | 14.8 с       | (5/2+)  | 78,937  | -58,357  | 665,4801 |
|           | 39-Y-80   | 30.1 с       | 4-      | 79,934  | -61,165  | 676,3590 |
|           | 39-Y-81   | 70.4 с       | (5/2+)  | 80,929  | -66,016  | 689,2815 |
|           | 39-Y-82   | 8.3 с        | 1+      | 81,927  | -68,193  | 699,5294 |
|           | 39-Y-83   | 7.08 мин     | (9/2+)  | 82,922  | -72,328  | 711,7361 |
|           | 39-Y-84   | 4.6 с        | 1+      | 83,920  | -74,158  | 721,6376 |
|           | 39-Y-85   | 2.68 ч       | (1/2-)  | 84,916  | -77,848  | 733,3983 |
|           | 39-Y-86   | 14.74 ч      | 4-      | 85,915  | -79,282  | 742,9035 |
|           | 39-Y-87   | 79.8 ч       | 1/2-    | 86,911  | -83,017  | 754,7101 |
|           | 39-Y-88   | 106.65 дн.   | 4-      | 87,910  | -84,297  | 764,0617 |

|           |           |                    |         |         |          |          |
|-----------|-----------|--------------------|---------|---------|----------|----------|
|           | 39-Y-89   | 100%               | 1/2-    | 88,906  | -87,702  | 775,5380 |
|           | 39-Y-90   | 64.00 ч            | 2-      | 89,907  | -86,488  | 782,3951 |
|           | 39-Y-91   | 58.51 дн.          | 1/2-    | 90,907  | -86,346  | 790,3249 |
|           | 39-Y-92   | 3.54 ч             | 2-      | 91,909  | -84,816  | 796,8654 |
|           | 39-Y-93   | 10.18 ч            | 1/2-    | 92,910  | -84,224  | 804,3454 |
|           | 39-Y-94   | 18.7 мин           | 2-      | 93,912  | -82,350  | 810,5422 |
|           | 39-Y-95   | 10.3 мин           | 1/2-    | 94,913  | -81,204  | 817,4681 |
|           | 39-Y-96   | 5.34 с             | 0-      | 95,916  | -78,341  | 822,6759 |
|           | 39-Y-97   | 3.75 с             | (1/2-)  | 96,918  | -76,261  | 828,6670 |
|           | 39-Y-98   | 0.548 с            | (0-)    | 97,922  | -72,452  | 832,9299 |
|           | 39-Y-99   | 1.470 с            | (5/2+)  | 98,925  | -70,202  | 838,7515 |
|           | 39-Y-100  | 735 мс             | 1-,2-   | 99,928  | -67,295  | 843,9150 |
|           | 39-Y-101  | 0.45 с             | (5/2+)  | 100,930 | -64,913  | 849,6045 |
|           | 39-Y-103  | 0.19 с             | (5/2+)  | 102,937 | -58,740  | 859,5740 |
|           | 39-Y-104  | 180 мс             |         | 103,941 | -54,539  | 863,4450 |
|           | 39-Y-105  | 150 нс             |         | 104,945 | -51,148  | 868,1250 |
|           | 39-Y-106  | 150 нс             |         | 105,950 | -46,370  | 871,4180 |
|           | 39-Y-107  | 30 мс              | (5/2+)  |         | 0,000    |          |
|           | 39-Y-108  | 150 нс             |         |         | 0,000    |          |
| Цирконий  | 40-Zr-79  | 56 мс              |         | 78,949  | -47,357  | 653,6980 |
|           | 40-Zr-80  | 3.9 с              | 0+      | 79,941  | -55,377  | 669,7890 |
|           | 40-Zr-81  | 5.3 с              | (3/2-)  | 80,937  | -58,856  | 681,3392 |
|           | 40-Zr-82  | 32 с               | 0+      | 81,931  | -64,193  | 694,7471 |
|           | 40-Zr-83  | 44 с               | (1/2-)  | 82,929  | -66,460  | 705,0858 |
|           | 40-Zr-84  | 25.9 мин           | 0+      | 83,923  | -71,492  | 718,1890 |
|           | 40-Zr-85  | 7.86 мин           | 7/2+    | 84,921  | -73,155  | 727,9230 |
|           | 40-Zr-86  | 16.5 ч             | 0+      | 85,916  | -77,805  | 740,6447 |
|           | 40-Zr-87  | 1.68 ч             | (9/2)+  | 86,915  | -79,348  | 750,2588 |
|           | 40-Zr-88  | 83.4 дн.           | 0+      | 87,910  | -83,624  | 762,6060 |
|           | 40-Zr-89  | 78.41 ч            | 9/2+    | 88,909  | -84,869  | 771,9230 |
|           | 40-Zr-90  | 51.45%             | 0+      | 89,905  | -88,768  | 783,8929 |
|           | 40-Zr-91  | 11.22%             | 5/2+    | 90,906  | -87,891  | 791,0874 |
|           | 40-Zr-92  | 17.15%             | 0+      | 91,905  | -88,455  | 799,7221 |
|           | 40-Zr-93  | 1.53е+6 лет        | 5/2+    | 92,906  | -87,117  | 806,4563 |
|           | 40-Zr-94  | 17.38%             | 0+      | 93,906  | -87,266  | 814,6765 |
|           | 40-Zr-95  | 64.02 дн.<br>2.80% | 5/2+    | 94,908  | -85,658  | 821,1392 |
|           | 40-Zr-96  | 2.2е+19 лет        | 0+      | 95,908  | -85,441  | 828,9935 |
|           | 40-Zr-97  | 16.744 ч           | 1/2+    | 96,911  | -82,949  | 834,5730 |
|           | 40-Zr-98  | 30.7 с             | 0+      | 97,913  | -81,276  | 840,9717 |
|           | 40-Zr-99  | 2.1 с              | (1/2+)  | 98,917  | -77,769  | 845,5362 |
|           | 40-Zr-100 | 7.1 с              | 0+      | 99,918  | -76,605  | 852,4426 |
|           | 40-Zr-101 | 2.3 с              | (3/2+)  | 100,921 | -73,458  | 857,3671 |
|           | 40-Zr-102 | 2.9 с              | 0+      | 101,923 | -71,743  | 863,7234 |
|           | 40-Zr-103 | 1.3 с              | (5/2-)  | 102,927 | -68,374  | 868,4265 |
|           | 40-Zr-104 | 1.2 с              | 0+      | 103,929 | -66,341  | 874,4640 |
| 40-Zr-105 | 0.6 с     |                    | 104,933 | -62,364 | 878,5580 |          |
| 40-Zr-106 | 150 нс    | 0+                 | 105,936 | -59,699 | 883,9660 |          |
| 40-Zr-107 | 150 мс    |                    | 106,941 | -55,089 | 887,4260 |          |
| 40-Zr-108 | 150 нс    | 0+                 | 107,944 | -51,903 | 892,3120 |          |
| 40-Zr-109 | 150 нс    |                    |         | 0,000   |          |          |
| 40-Zr-110 | 150 нс    | 0+                 |         | 0,000   |          |          |



|           |              |             |         |         |          |          |
|-----------|--------------|-------------|---------|---------|----------|----------|
| Ниобий    | 41-Nb-81     | 0.8 с       |         | 80,949  | -47,460  | 669,1600 |
|           | 41-Nb-82     | 50 мс       |         | 81,943  | -52,974  | 682,7460 |
|           | 41-Nb-83     | 4.1 с       | (5/2+)  | 82,937  | -58,960  | 696,8034 |
|           | 41-Nb-84     | 12 с        | 3+      | 83,934  | -61,879  | 707,7940 |
|           | 41-Nb-85     | 20.9 с      | (9/2+)  | 84,928  | -67,155  | 721,1406 |
|           | 41-Nb-86     | 88 с        | (5+)    | 85,925  | -69,827  | 731,8843 |
|           | 41-Nb-87     | 2.6 мин     | (9/2+)  | 86,920  | -74,183  | 744,3114 |
|           | 41-Nb-88     | 14.5 мин    | (8+)    | 87,918  | -76,424  | 754,6240 |
|           | 41-Nb-89     | 2.03 ч      | (9/2+)  | 88,913  | -80,578  | 766,8496 |
|           | 41-Nb-90     | 14.60 ч     | 8+      | 89,911  | -82,657  | 776,9995 |
|           | 41-Nb-91     | 6.8e+2 лет  | 9/2+    | 90,907  | -86,638  | 789,0516 |
|           | 41-Nb-92     | 3.47e+7 лет | (7)+    | 91,907  | -86,449  | 796,9342 |
|           | 41-Nb-93     | 100%        | 9/2+    | 92,906  | -87,209  | 805,7653 |
|           | 41-Nb-94     | 2.03e+4 лет | (6)+    | 93,907  | -86,365  | 812,9927 |
|           | 41-Nb-95     | 34.997 дн.  | 9/2+    | 94,907  | -86,782  | 821,4816 |
|           | 41-Nb-96     | 23.35 ч     | 6+      | 95,908  | -85,604  | 828,3747 |
|           | 41-Nb-97     | 72.1 мин    | 9/2+    | 96,908  | -85,607  | 836,4488 |
|           | 41-Nb-98     | 2.86 с      | 1+      | 97,910  | -83,526  | 842,4396 |
|           | 41-Nb-99     | 15.0 с      | 9/2+    | 98,912  | -82,327  | 849,3119 |
|           | 41-Nb-100    | 1.5 с       | 1+      | 99,914  | -79,939  | 854,9953 |
|           | 41-Nb-101    | 7.1 с       | (5/2+)  | 100,915 | -78,943  | 862,0698 |
|           | 41-Nb-103    | 1.5 с       | (5/2+)  | 102,919 | -75,319  | 874,5891 |
|           | 41-Nb-104    | 4.9 с       | (1+)    | 103,922 | -72,229  | 879,5696 |
| 41-Nb-105 | 2.95 с       | (5/2+)      | 104,924 | -70,855 | 886,2674 |          |
| 41-Nb-106 | 1.02 с       |             | 105,928 | -66,891 | 890,3740 |          |
| 41-Nb-107 | 330 мс       |             | 106,930 | -64,916 | 896,4710 |          |
| 41-Nb-108 | 0.193 с      | (2+)        | 107,935 | -60,538 | 900,1640 |          |
| 41-Nb-109 | 0.19 с       | (5/2)       | 108,938 | -58,097 | 905,7950 |          |
| 41-Nb-110 | 0.17 с       |             | 109,943 | -53,393 | 909,1620 |          |
| 41-Nb-111 | 150 нс       | (5/2+)      |         | 0,000   |          |          |
| 41-Nb-112 | 150 нс       | (2+)        |         | 0,000   |          |          |
| 41-Nb-113 | 150 нс       |             |         | 0,000   |          |          |
| Молибден  | 42-Mo-83     | 0.4 с       |         | 82,949  | -47,748  | 684,8090 |
|           | 42-Mo-84     | 150 нс      | 0+      | 83,940  | -55,806  | 700,9380 |
|           | 42-Mo-85     | 3.2 с       | (1/2-)  | 84,937  | -59,066  | 712,2700 |
|           | 42-Mo-86     | 19.6 с      | 0+      | 85,931  | -64,557  | 725,8319 |
|           | 42-Mo-87     | 13.6 с      | (7/2+)  | 86,927  | -67,695  | 737,0409 |
|           | 42-Mo-88     | 8.0 мин     | 0+      | 87,922  | -72,701  | 750,1181 |
|           | 42-Mo-89     | 2.11 мин    | (9/2+)  | 88,919  | -75,003  | 760,4922 |
|           | 42-Mo-90     | 5.56 ч      | 0+      | 89,914  | -80,168  | 773,7281 |
|           | 42-Mo-91     | 15.49 мин   | 9/2+    | 90,912  | -82,204  | 783,8352 |
|           |              | 14.84%      |         |         |          |          |
|           | 42-Mo-92     | 1.9e+20 лет | 0+      | 91,907  | -86,805  | 796,5083 |
|           | 42-Mo-93     | 4.0e+3 лет  | 5/2+    | 92,907  | -86,804  | 804,5780 |
|           | 42-Mo-94     | 9.25%       | 0+      | 93,905  | -88,410  | 814,2558 |
|           | 42-Mo-95     | 15.92%      | 5/2+    | 94,906  | -87,708  | 821,6249 |
|           | 42-Mo-96     | 16.68%      | 0+      | 95,905  | -88,791  | 830,7792 |
|           | 42-Mo-97     | 9.55%       | 5/2+    | 96,906  | -87,541  | 837,6003 |
|           | 42-Mo-98     | 24.13%      | 0+      | 97,905  | -88,112  | 846,2428 |
| 42-Mo-99  | 65.94 ч      | 1/2+        | 98,908  | -85,966 | 852,1682 |          |
|           | 9.63%        |             |         |         |          |          |
| 42-Mo-100 | 0.95e+19 лет | 0+          | 99,907  | -86,184 | 860,4579 |          |

|           |           |              |         |         |         |          |
|-----------|-----------|--------------|---------|---------|---------|----------|
|           | 42-Mo-101 | 14.61 мин    | 1/2+    | 100,910 | -83,512 | 865,8564 |
|           | 42-Mo-102 | 11.3 мин     | 0+      | 101,910 | -83,558 | 873,9737 |
|           | 42-Mo-103 | 67.5 с       | (3/2+)  | 102,913 | -80,849 | 879,3368 |
|           | 42-Mo-104 | 60 с         | 0+      | 103,914 | -80,334 | 886,8923 |
|           | 42-Mo-105 | 35.6 с       | (3/2+)  | 104,917 | -77,340 | 891,9700 |
|           | 42-Mo-106 | 8.4 с        | 0+      | 105,918 | -76,257 | 898,9588 |
|           | 42-Mo-107 | 3.5 с        | (7/2-)  | 106,922 | -72,941 | 903,7136 |
|           | 42-Mo-108 | 1.09 с       | 0+      | 107,924 | -71,185 | 910,0290 |
|           | 42-Mo-109 | 0.53 с       | (7/2-)  | 108,928 | -67,245 | 914,1600 |
|           | 42-Mo-110 | 0.30 с       | 0+      | 109,930 | -65,456 | 920,4430 |
|           | 42-Mo-111 | 150 нс       |         | 110,935 | -61,004 | 924,0620 |
|           | 42-Mo-112 | 150 нс       | 0+      | 111,937 | -58,833 | 929,9620 |
|           | 42-Mo-113 | 150 нс       |         | 112,942 | -53,999 | 933,1990 |
|           | 42-Mo-114 | 150 нс       | 0+      |         | 0,000   |          |
|           | 42-Mo-115 | 150 нс       |         |         | 0,000   |          |
| Технеций  | 43-Tc-85  | 0.5 с        |         | 84,949  | -47,562 | 699,9830 |
|           | 43-Tc-86  | 47 мс        |         | 85,943  | -53,207 | 713,6990 |
|           | 43-Tc-87  | 150 нс       | (9/2+)  | 86,937  | -59,122 | 727,6860 |
|           | 43-Tc-88  | 5.8 с        | (3+)    | 87,933  | -62,568 | 739,2040 |
|           | 43-Tc-89  | 12.8 с       | (9/2+)  | 88,928  | -67,493 | 752,1999 |
|           | 43-Tc-91  | 3.14 мин     | (9/2+)  | 90,918  | -75,984 | 776,8328 |
|           | 43-Tc-92  | 4.23 мин     | (8+)    | 91,915  | -78,935 | 787,8556 |
|           | 43-Tc-93  | 2.75 ч       | 9/2+    | 92,910  | -83,603 | 800,5948 |
|           | 43-Tc-94  | 293 мин      | 7+      | 93,910  | -84,155 | 809,2177 |
|           | 43-Tc-95  | 20.0 ч       | 9/2+    | 94,908  | -86,017 | 819,1519 |
|           | 43-Tc-96  | 4.28 дн.     | 7+      | 95,908  | -85,818 | 827,0236 |
|           | 43-Tc-97  | 4.21e+6 лет  | 9/2+    | 96,906  | -87,221 | 836,4977 |
|           | 43-Tc-98  | 4.2e+6 лет   | (6+)    | 97,907  | -86,428 | 843,7765 |
|           | 43-Tc-99  | 2.111e+5 лет | 9/2+    | 98,906  | -87,323 | 852,7431 |
|           | 43-Tc-100 | 15.8 с       | 1+      | 99,908  | -86,016 | 859,5075 |
|           | 43-Tc-101 | 14.22 мин    | 9/2+    | 100,907 | -86,336 | 867,8985 |
|           | 43-Tc-102 | 5.28 с       | 1+      | 101,909 | -84,568 | 874,2013 |
|           | 43-Tc-103 | 54.2 с       | 5/2+    | 102,909 | -84,599 | 882,3044 |
|           | 43-Tc-104 | 18.3 мин     | (3+)    | 103,911 | -82,489 | 888,2649 |
|           | 43-Tc-105 | 7.6 мин      | (5/2+)  | 104,912 | -82,290 | 896,1377 |
|           | 43-Tc-106 | 35.6 с       | (1,2)   | 105,914 | -79,777 | 901,6964 |
|           | 43-Tc-107 | 21.2 с       | (3/2-)  | 106,915 | -79,101 | 909,0912 |
|           | 43-Tc-108 | 5.17 с       | (2+)    | 107,918 | -75,935 | 913,9971 |
|           | 43-Tc-109 | 0.86 с       | (5/2+)  | 108,920 | -74,867 | 921,0000 |
|           | 43-Tc-110 | 0.92 с       | (1+,2+) | 109,923 | -71,362 | 925,5660 |
|           | 43-Tc-111 | 0.30 с       |         | 110,925 | -69,815 | 932,0910 |
|           | 43-Tc-112 | 0.29 с       |         | 111,929 | -65,913 | 936,2590 |
|           | 43-Tc-113 | 0.17 с       |         | 112,931 | -63,966 | 942,3840 |
|           | 43-Tc-114 | 0.15 с       |         | 113,936 | -59,727 | 946,2170 |
|           | 43-Tc-115 | 150 нс       |         | 114,938 | -57,492 | 952,0530 |
| 43-Tc-116 | 150 нс    |              |         | 0,000   |         |          |
| 43-Tc-117 | 150 нс    | (5/2+)       |         | 0,000   |         |          |
| 43-Tc-118 | 150 нс    |              |         | 0,000   |         |          |
| Рутений   | 44-Ru-87  | 1.5 мкс      |         | 86,949  | -47,339 | 715,1200 |
|           | 44-Ru-88  | 150 нс       | 0+      | 87,940  | -55,498 | 731,3510 |
|           | 44-Ru-89  |              |         | 88,936  | -59,513 | 743,4370 |
|           | 44-Ru-90  | 11 с         | 0+      | 89,930  | -65,409 | 757,4050 |

## Родий

|           |            |         |         |         |          |
|-----------|------------|---------|---------|---------|----------|
| 44-Ru-91  | 9 с        | (9/2+)  | 90,926  | -68,579 | 768,6458 |
| 44-Ru-92  | 3.65 мин   | 0+      | 91,920  | -74,408 | 782,5460 |
| 44-Ru-93  | 59.7 с     | (9/2)+  | 92,917  | -77,266 | 793,4755 |
| 44-Ru-94  | 51.8 мин   | 0+      | 93,911  | -82,568 | 806,8488 |
| 44-Ru-95  | 1.643 ч    | 5/2+    | 94,910  | -83,450 | 815,8021 |
| 44-Ru-96  | 5.54%      | 0+      | 95,908  | -86,072 | 826,4956 |
| 44-Ru-97  | 2.791 дн.  | 5/2+    | 96,908  | -86,112 | 834,6071 |
| 44-Ru-98  | 1.87%      | 0+      | 97,905  | -88,224 | 844,7906 |
| 44-Ru-99  | 12.76%     | 5/2+    | 98,906  | -87,617 | 852,2544 |
| 44-Ru-100 | 12.60%     | 0+      | 99,904  | -89,219 | 861,9275 |
| 44-Ru-101 | 17.06%     | 5/2+    | 100,906 | -87,950 | 868,7296 |
| 44-Ru-102 | 31.55%     | 0+      | 101,904 | -89,098 | 877,9492 |
| 44-Ru-103 | 39.26 дн.  | 3/2+    | 102,906 | -87,259 | 884,1816 |
| 44-Ru-104 | 18.62%     | 0+      | 103,905 | -88,091 | 893,0853 |
| 44-Ru-105 | 4.44 ч     | 3/2+    | 104,908 | -85,930 | 898,9953 |
| 44-Ru-106 | 373.59 дн. | 0+      | 105,907 | -86,324 | 907,4611 |
| 44-Ru-107 | 3.75 мин   | (5/2)+  | 106,910 | -83,921 | 913,1289 |
| 44-Ru-108 | 4.55 мин   | 0+      | 107,910 | -83,655 | 920,9347 |
| 44-Ru-109 | 34.5 с     | (5/2+)  | 108,913 | -80,852 | 926,2028 |
| 44-Ru-110 | 14.6 с     | 0+      | 109,914 | -80,140 | 933,5619 |
| 44-Ru-111 | 2.12 с     |         | 110,918 | -76,792 | 938,2860 |
| 44-Ru-112 | 1.75 с     | 0+      | 111,919 | -75,867 | 945,4320 |
| 44-Ru-113 | 0.80 с     |         | 112,923 | -72,154 | 949,7890 |
| 44-Ru-114 | 0.53 с     | 0+      | 113,924 | -70,794 | 956,5010 |
| 44-Ru-115 | 740 мс     |         | 114,928 | -66,779 | 960,5570 |
| 44-Ru-116 | 150 нс     | 0+      | 115,930 | -65,056 | 966,9050 |
| 44-Ru-117 | 150 нс     |         | 116,935 | -60,743 | 970,6640 |
| 44-Ru-118 | 150 нс     | 0+      | 117,937 | -58,656 | 976,6490 |
| 44-Ru-119 | 150 нс     |         |         | 0,000   |          |
| 44-Ru-120 | 150 нс     | 0+      |         | 0,000   |          |
| 45-Rh-89  | 1.5 мкс    |         | 88,949  | -47,152 | 730,2940 |
| 45-Rh-90  | 150 нс     |         | 89,943  | -53,216 | 744,4290 |
| 45-Rh-91  | 0.1 мкс    |         | 90,937  | -59,103 | 758,3880 |
| 45-Rh-92  | 100 нс     |         | 91,932  | -63,360 | 770,7160 |
| 45-Rh-93  |            | (9/2+)  | 92,926  | -69,173 | 784,6000 |
| 45-Rh-95  | 5.02 мин   | (9/2)+  | 94,916  | -78,340 | 809,9098 |
| 45-Rh-96  | 9.90 мин   | (6+)    | 95,915  | -79,626 | 819,2668 |
| 45-Rh-97  | 30.7 мин   | 9/2+    | 96,911  | -82,589 | 830,3018 |
| 45-Rh-98  | 8.7 мин    | (2)+    | 97,911  | -83,167 | 838,9508 |
| 45-Rh-99  | 16.1 дн.   | 1/2-    | 98,908  | -85,574 | 849,4294 |
| 45-Rh-100 | 20.8 ч     | 1-      | 99,908  | -85,589 | 857,5152 |
| 45-Rh-101 | 3.3 лет    | 1/2-    | 100,906 | -87,408 | 867,4058 |
| 45-Rh-102 | 207 дн.    | (1-,2-) | 101,907 | -86,775 | 874,8443 |
| 45-Rh-103 | 100%       | 1/2-    | 102,906 | -88,022 | 884,1626 |
| 45-Rh-104 | 42.3 с     | 1+      | 103,907 | -86,950 | 891,1617 |
| 45-Rh-105 | 35.36 ч    | 7/2+    | 104,906 | -87,847 | 900,1299 |
| 45-Rh-106 | 29.80 с    | 1+      | 105,907 | -86,364 | 906,7181 |
| 45-Rh-107 | 21.7 мин   | 7/2+    | 106,907 | -86,861 | 915,2869 |
| 45-Rh-108 | 16.8 с     | 1+      | 107,909 | -85,017 | 921,5137 |
| 45-Rh-109 | 80 с       | 7/2+    | 108,909 | -85,012 | 929,5805 |
| 45-Rh-111 | 11 с       | (7/2+)  | 110,912 | -82,288 | 942,9990 |
| 45-Rh-113 | 2.80 с     | (7/2+)  | 112,915 | -78,786 | 955,6390 |

|           |           |            |        |         |         |           |          |
|-----------|-----------|------------|--------|---------|---------|-----------|----------|
| Палладий  | 45-Rh-114 | 1.85 с     | 1+     | 113,919 | -75,594 | 960,5190  |          |
|           | 45-Rh-115 | 0.99 с     | (7/2+) | 114,920 | -74,403 | 967,3996  |          |
|           | 45-Rh-117 | 0.44 с     | (7/2+) | 116,925 | -69,536 | 978,6750  |          |
|           | 45-Rh-118 | 150 нс     | 0+     | 117,929 | -65,736 | 982,9460  |          |
|           | 45-Rh-119 | 150 нс     |        | 118,931 | -63,938 | 989,2190  |          |
|           | 45-Rh-120 | 150 нс     |        | 119,936 | -59,821 | 993,1730  |          |
|           | 45-Rh-121 | 150 нс     |        | 120,938 | -57,678 | 999,1020  |          |
|           | 45-Rh-122 | 50 мс      |        |         | 0,000   |           |          |
|           | 46-Pd-91  | 1 мкс      |        | 90,949  | -47,059 | 745,5610  |          |
|           | 46-Pd-92  | 150 нс     | 0+     | 91,940  | -55,498 | 762,0720  |          |
|           | 46-Pd-93  | 60 с       |        | 92,936  | -59,699 | 774,3440  |          |
|           | 46-Pd-94  | 9.0 с      | 0+     | 93,929  | -66,350 | 789,0660  |          |
|           | 46-Pd-95  | 10 с       |        | 94,925  | -70,151 | 800,9380  |          |
|           | 46-Pd-96  | 122 с      | 0+     | 95,918  | -76,176 | 815,0345  |          |
|           | 46-Pd-97  | 3.10 мин   | (5/2+) | 96,916  | -77,799 | 824,7294  |          |
|           | 46-Pd-98  | 17.7 мин   | 0+     | 97,913  | -81,300 | 836,3015  |          |
|           | 46-Pd-99  | 21.4 мин   | (5/2)+ | 98,912  | -82,188 | 845,2605  |          |
|           | 46-Pd-100 | 3.63 дн.   | 0+     | 99,909  | -85,227 | 856,3714  |          |
|           | 46-Pd-101 | 8.47 ч     | 5/2+   | 100,908 | -85,428 | 864,6434  |          |
|           | 46-Pd-102 | 1.02%      | 0+     | 101,906 | -87,926 | 875,2125  |          |
|           | 46-Pd-103 | 16.991 дн. | 5/2+   | 102,906 | -87,479 | 882,8372  |          |
|           | 46-Pd-104 | 11.14%     | 0+     | 103,904 | -89,391 | 892,8202  |          |
|           | 46-Pd-105 | 22.33%     | 5/2+   | 104,905 | -88,414 | 899,9143  |          |
|           | 46-Pd-106 | 27.33%     | 0+     | 105,903 | -89,905 | 909,4769  |          |
|           | 46-Pd-107 | 6.5е+6 лет | 5/2+   | 106,905 | -88,372 | 916,0155  |          |
|           | 46-Pd-108 | 26.46%     | 0+     | 107,904 | -89,522 | 925,2363  |          |
|           | 46-Pd-109 | 13.7012 ч  | 5/2+   | 108,906 | -87,604 | 931,3896  |          |
|           | 46-Pd-110 | 11.72%     | 0+     | 109,905 | -88,350 | 940,2072  |          |
|           | 46-Pd-111 | 23.4 мин   | 5/2+   | 110,908 | -86,029 | 945,9577  |          |
|           | 46-Pd-112 | 21.03 ч    | 0+     | 111,907 | -86,337 | 954,3370  |          |
|           | 46-Pd-113 | 93 с       | (5/2+) | 112,910 | -83,693 | 959,7647  |          |
|           | 46-Pd-114 | 2.42 мин   | 0+     | 113,910 | -83,494 | 967,6367  |          |
|           | 46-Pd-115 | 25 с       | (5/2+) | 114,914 | -80,403 | 972,6172  |          |
|           | 46-Pd-116 | 11.8 с     | 0+     | 115,914 | -79,961 | 980,2462  |          |
|           | 46-Pd-117 | 4.3 с      | (5/2+) | 116,918 | -76,532 | 984,8880  |          |
|           | 46-Pd-118 | 1.9 с      | 0+     | 117,919 | -75,466 | 991,8938  |          |
|           | 46-Pd-119 | 0.92 с     |        | 118,923 | -72,023 | 996,5220  |          |
|           | 46-Pd-120 | 0.5 с      | 0+     | 119,924 | -70,766 | 1003,3360 |          |
|           | 46-Pd-121 | 150 нс     |        | 120,928 | -66,900 | 1007,5420 |          |
|           | 46-Pd-122 | 150 нс     | 0+     | 121,930 | -65,391 | 1014,1040 |          |
|           | 46-Pd-123 | 150 нс     |        | 122,934 | -61,236 | 1018,0210 |          |
|           | 46-Pd-124 | 0.2 с      | 0+     |         | 0,000   |           |          |
|           | Серебро   | 47-Ag-93   |        |         |         | 0,000     |          |
|           |           | 47-Ag-94   | 15 мс  | 0+      | 93,943  | -53,300   | 775,2340 |
|           |           | 47-Ag-95   | 2.0 с  |         | 94,935  | -60,100   | 790,1050 |
|           |           | 47-Ag-96   | 5.1 с  | (8+,9+) | 95,931  | -64,571   | 802,6480 |
| 47-Ag-97  |           | 25.3 с     | (9/2+) | 96,924  | -70,794 | 816,9410  |          |
| 47-Ag-98  |           | 46.7 с     | (6+)   | 97,922  | -72,880 | 827,0991  |          |
| 47-Ag-99  |           | 124 с      | (9/2)+ | 98,918  | -76,758 | 839,0481  |          |
| 47-Ag-100 |           | 2.01 мин   | (5)+   | 99,916  | -78,181 | 848,5425  |          |
| 47-Ag-101 |           | 11.1 мин   | 9/2+   | 100,913 | -81,224 | 859,6573  |          |
| 47-Ag-102 |           | 12.9 мин   | 5+     | 101,912 | -81,971 | 868,4758  |          |

## Кадмий

|           |              |        |         |         |           |
|-----------|--------------|--------|---------|---------|-----------|
| 47-Ag-103 | 65.7 мин     | 7/2+   | 102,909 | -84,792 | 879,3672  |
| 47-Ag-104 | 69.2 мин     | 5+     | 103,909 | -85,112 | 887,7592  |
| 47-Ag-105 | 41.29 дн.    | 1/2-   | 104,907 | -87,068 | 897,7867  |
| 47-Ag-106 | 23.96 мин    | 1+     | 105,907 | -86,940 | 905,7293  |
| 47-Ag-107 | 51.839%      | 1/2-   | 106,905 | -88,405 | 915,2662  |
| 47-Ag-108 | 2.37 мин     | 1+     | 107,906 | -87,604 | 922,5358  |
| 47-Ag-109 | 48.161%      | 1/2-   | 108,905 | -88,720 | 931,7232  |
| 47-Ag-110 | 24.6 с       | 1+     | 109,906 | -87,458 | 938,5324  |
| 47-Ag-111 | 7.45 дн.     | 1/2-   | 110,905 | -88,217 | 947,3636  |
| 47-Ag-112 | 3.130 ч      | 2(-)   | 111,907 | -86,625 | 953,8426  |
| 47-Ag-113 | 5.37 ч       | 1/2-   | 112,907 | -87,033 | 962,3223  |
| 47-Ag-114 | 4.6 с        | 1+     | 113,909 | -84,945 | 968,3051  |
| 47-Ag-115 | 20.0 мин     | 1/2-   | 114,909 | -84,987 | 976,4189  |
| 47-Ag-116 | 2.68 мин     | (2)-   | 115,911 | -82,568 | 982,0709  |
| 47-Ag-117 | 72.8 с+20-7  | (1/2-) | 116,912 | -82,266 | 989,8398  |
| 47-Ag-118 | 3.76 с       | 1(-)   | 117,915 | -79,566 | 995,2115  |
| 47-Ag-120 | 1.23 с       | 3(+)   | 119,919 | -75,648 | 1007,4360 |
| 47-Ag-121 | 0.78 с       | (7/2+) | 120,920 | -74,658 | 1014,5177 |
| 47-Ag-122 | 0.520 с      | (3+)   | 121,923 | -71,427 | 1019,3580 |
| 47-Ag-123 | 0.293 с      | (7/2+) | 122,925 | -69,955 | 1025,9570 |
| 47-Ag-124 | 0.172 с      |        | 123,929 | -66,574 | 1030,6470 |
| 47-Ag-125 | 166 мс       | (7/2+) | 124,931 | -64,702 | 1036,8460 |
| 47-Ag-126 | 107 мс       |        | 125,935 | -61,013 | 1041,2290 |
| 47-Ag-127 | 79 мс        | (1/2-) | 126,937 | -58,796 | 1047,0830 |
| 47-Ag-128 | 58 мс        |        |         | 0,000   |           |
| 47-Ag-129 | 46 мс        |        |         | 0,000   |           |
| 48-Cd-96  | 1 с          | 0+     | 95,940  | -56,104 | 793,3980  |
| 48-Cd-97  | 2.8 с        |        | 96,935  | -60,603 | 805,9680  |
| 48-Cd-98  | 9.2 с        | 0+     | 97,928  | -67,460 | 820,8970  |
| 48-Cd-99  | 16 с         | (5/2+) | 98,925  | -69,853 | 831,3610  |
| 48-Cd-100 | 49.1 с       | 0+     | 99,920  | -74,305 | 843,8844  |
| 48-Cd-101 | 1.36 мин     | (5/2+) | 100,919 | -75,748 | 853,3984  |
| 48-Cd-102 | 5.5 мин      | 0+     | 101,915 | -79,384 | 865,1064  |
| 48-Cd-103 | 7.3 мин      | (5/2+) | 102,913 | -80,650 | 874,4430  |
| 48-Cd-104 | 57.7 мин     | 0+     | 103,910 | -83,976 | 885,8406  |
| 48-Cd-105 | 55.5 мин     | 5/2+   | 104,909 | -84,330 | 894,2661  |
|           | 1.25%        |        |         |         |           |
| 48-Cd-106 | 2.6е+17 лет  | 0+     | 105,906 | -87,134 | 905,1410  |
| 48-Cd-107 | 6.50 ч       | 5/2+   | 106,907 | -86,988 | 913,0668  |
| 48-Cd-108 | 0.89%        | 0+     | 107,904 | -89,253 | 923,4025  |
| 48-Cd-109 | 461.4 дн.    | 5/2+   | 108,905 | -88,505 | 930,7266  |
| 48-Cd-110 | 12.49%       | 0+     | 109,903 | -90,350 | 940,6423  |
| 48-Cd-111 | 12.80%       | 1/2+   | 110,904 | -89,254 | 947,6181  |
| 48-Cd-112 | 24.13%       | 0+     | 111,903 | -90,581 | 957,0162  |
|           | 12.22%       |        |         |         |           |
| 48-Cd-113 | 7.7е+15 лет  | 1/2+   | 112,904 | -89,050 | 963,5564  |
| 48-Cd-114 | 28.73%       | 0+     | 113,903 | -90,021 | 972,5992  |
| 48-Cd-115 | 53.46 ч      | 1/2+   | 114,905 | -88,091 | 978,7400  |
|           | 7.49%        |        |         |         |           |
| 48-Cd-116 | 3.75е+19 лет | 0+     | 115,905 | -88,720 | 987,4402  |
| 48-Cd-117 | 2.49 ч       | 1/2+   | 116,907 | -86,426 | 993,2174  |
| 48-Cd-118 | 50.3 мин     | 0+     | 117,907 | -86,709 | 1001,5720 |

## Индий

|           |              |        |         |         |           |
|-----------|--------------|--------|---------|---------|-----------|
| 48-Cd-119 | 2.69 мин     | 3/2+   | 118,910 | -83,907 | 1006,8410 |
| 48-Cd-120 | 50.80 с      | 0+     | 119,910 | -83,973 | 1014,9787 |
| 48-Cd-121 | 13.5 с       | (3/2+) | 120,913 | -81,058 | 1020,1353 |
| 48-Cd-122 | 5.24 с       | 0+     | 121,914 | -80,574 | 1027,7230 |
| 48-Cd-123 | 2.10 с       | (3/2)+ | 122,917 | -77,311 | 1032,5303 |
| 48-Cd-124 | 1.25 с       | 0+     | 123,918 | -76,710 | 1040,0012 |
| 48-Cd-125 | 0.65 с       | (3/2+) | 124,921 | -73,358 | 1044,7202 |
| 48-Cd-126 | 0.506 с      | 0+     | 125,922 | -72,327 | 1051,7605 |
| 48-Cd-127 | 0.37 с       | (3/2+) | 126,926 | -68,526 | 1056,0305 |
| 48-Cd-128 | 0.34 с       | 0+     | 127,928 | -67,291 | 1062,8669 |
| 48-Cd-129 | 0.27 с       | (3/2+) | 128,932 | -63,099 | 1066,7470 |
| 48-Cd-130 | 0.20 с       | 0+     | 129,934 | -61,497 | 1073,2160 |
| 48-Cd-131 | 0.18 с       |        |         | 0,000   |           |
| 49-In-98  |              |        | 97,942  | -53,803 | 806,4570  |
| 49-In-99  | 150 нс       | (9/2+) | 98,935  | -60,910 | 821,6360  |
| 49-In-100 | 7.0 с        |        | 99,931  | -64,134 | 832,9312  |
| 49-In-101 | 15.1 с       |        | 100,927 | -68,409 | 845,2770  |
| 49-In-102 | 2.2 с        | (6+)   | 101,925 | -70,134 | 855,0741  |
| 49-In-103 | 60 с         | (9/2)+ | 102,920 | -74,600 | 867,6106  |
| 49-In-104 | 1.80 мин     | 5(+)   | 103,918 | -76,067 | 877,1495  |
| 49-In-105 | 5.07 мин     | (9/2+) | 104,915 | -79,481 | 888,6348  |
| 49-In-106 | 6.2 мин      | 7+     | 105,913 | -80,610 | 897,8353  |
| 49-In-107 | 32.4 мин     | 9/2+   | 106,910 | -83,562 | 908,8585  |
| 49-In-108 | 58.0 мин     | 7+     | 107,910 | -84,096 | 917,4631  |
| 49-In-109 | 4.2 ч        | 9/2+   | 108,907 | -86,485 | 927,9243  |
| 49-In-110 | 4.9 ч        | 7+     | 109,907 | -86,472 | 935,9819  |
| 49-In-111 | 2.8047 дн.   | 9/2+   | 110,905 | -88,389 | 945,9703  |
| 49-In-112 | 14.97 мин    | 1+     | 111,906 | -87,995 | 953,6480  |
| 49-In-113 | 4.29%        | 9/2+   | 112,904 | -89,366 | 963,0905  |
| 49-In-114 | 71.9 с       | 1+     | 113,905 | -88,569 | 970,3649  |
|           | 95.71%       |        |         |         |           |
| 49-In-115 | 4.41e+14 лет | 9/2+   | 114,904 | -89,537 | 979,4036  |
| 49-In-116 | 14.10 с      | 1+     | 115,905 | -88,250 | 986,1879  |
| 49-In-117 | 43.2 мин     | 9/2+   | 116,905 | -88,943 | 994,9525  |
| 49-In-118 | 5.0 с        | 1+     | 117,906 | -87,230 | 1001,3109 |
| 49-In-119 | 2.4 мин      | 9/2+   | 118,906 | -87,704 | 1009,8557 |
| 49-In-120 | 3.08 с       | 1+     | 119,908 | -85,733 | 1015,9567 |
| 49-In-120 | 47.3 с       | (8-)   | 119,908 | -85,733 | 1015,9567 |
| 49-In-121 | 23.1 с       | 9/2+   | 120,908 | -85,838 | 1024,1330 |
| 49-In-122 | 1.5 с        | 1+     | 121,910 | -83,576 | 1029,9424 |
| 49-In-123 | 5.98 с       | 9/2+   | 122,910 | -83,426 | 1037,8630 |
| 49-In-124 | 3.11 с       | 3+     | 123,913 | -80,876 | 1043,3848 |
| 49-In-125 | 2.36 с       | 9/2+   | 124,914 | -80,480 | 1051,0598 |
| 49-In-126 | 1.60 с       | 3(+)   | 125,916 | -77,813 | 1056,4641 |
| 49-In-127 | 1.09 с       | (9/2+) | 126,917 | -76,994 | 1063,7162 |
| 49-In-128 | 0.84 с       | (3+)   | 127,920 | -74,361 | 1069,1545 |
| 49-In-129 | 0.61 с       | (9/2+) | 128,922 | -72,975 | 1075,8405 |
| 49-In-130 | 0.32 с       | 1(-)   | 129,925 | -69,997 | 1080,9338 |
| 49-In-131 | 0.28 с       | (9/2+) | 130,927 | -68,216 | 1087,2237 |
| 49-In-132 | 0.201 с      | (7-)   | 131,933 | -62,486 | 1089,5648 |
| 49-In-133 | 180 мс       | (9/2+) | 132,938 | -57,436 | 1092,5870 |
| 49-In-134 | 138 мс       |        | 133,945 | -51,549 | 1094,7710 |

|           |           |              |         |         |           |           |
|-----------|-----------|--------------|---------|---------|-----------|-----------|
| Олово     | 49-In-135 | 0.1 с        |         |         | 0,000     |           |
|           | 50-Sn-100 | 0.94 с+54-27 | 0+      | 99,939  | -56,864   | 824,8790  |
|           | 50-Sn-101 | 3 с          |         | 100,936 | -59,560   | 835,6460  |
|           | 50-Sn-102 | 4.5 с        | 0+      | 101,930 | -64,748   | 848,9050  |
|           | 50-Sn-103 | 7 с          |         | 102,928 | -66,946   | 859,1750  |
|           | 50-Sn-104 | 20.8 с       | 0+      | 103,923 | -71,552   | 871,8522  |
|           | 50-Sn-105 | 31 с         |         | 104,921 | -73,224   | 881,5956  |
|           | 50-Sn-106 | 115 с        | 0+      | 105,917 | -77,425   | 893,8679  |
|           | 50-Sn-107 | 2.90 мин     | (5/2+)  | 106,916 | -78,556   | 903,0698  |
|           | 50-Sn-108 | 10.30 мин    | 0+      | 107,912 | -82,004   | 914,5889  |
|           | 50-Sn-109 | 18.0 мин     | 5/2(+)  | 108,911 | -82,636   | 923,2922  |
|           | 50-Sn-110 | 4.11 ч       | 0+      | 109,908 | -85,835   | 934,5625  |
|           | 50-Sn-111 | 35.3 мин     | 7/2+    | 110,908 | -85,944   | 942,7431  |
|           | 50-Sn-112 | 0.97%        | 0+      | 111,905 | -88,659   | 953,5293  |
|           | 50-Sn-113 | 115.09 дн.   | 1/2+    | 112,905 | -88,330   | 961,2722  |
|           | 50-Sn-114 | 0.66%        | 0+      | 113,903 | -90,558   | 971,5713  |
|           | 50-Sn-115 | 0.34%        | 1/2+    | 114,903 | -90,033   | 979,1171  |
|           | 50-Sn-116 | 14.54%       | 0+      | 115,902 | -91,525   | 988,6805  |
|           | 50-Sn-117 | 7.68%        | 1/2+    | 116,903 | -90,398   | 995,6251  |
|           | 50-Sn-118 | 24.22%       | 0+      | 117,902 | -91,653   | 1004,9515 |
|           | 50-Sn-119 | 8.59%        | 1/2+    | 118,903 | -90,067   | 1011,4369 |
|           | 50-Sn-120 | 32.58%       | 0+      | 119,902 | -91,103   | 1020,5444 |
|           | 50-Sn-121 | 27.06 ч      | 3/2+    | 120,904 | -89,203   | 1026,7152 |
|           | 50-Sn-122 | 4.63%        | 0+      | 121,903 | -89,945   | 1035,5286 |
|           | 50-Sn-123 | 129.2 дн.    | 11/2-   | 122,906 | -87,819   | 1041,4745 |
|           | 50-Sn-124 | 5.79%        | 0+      | 123,905 | -88,236   | 1049,9625 |
|           | 50-Sn-125 | 9.64 дн.     | 11/2-   | 124,908 | -85,898   | 1055,6955 |
|           | 50-Sn-126 | 1е+5 лет     | 0+      | 125,908 | -86,020   | 1063,8888 |
|           | 50-Sn-127 | 2.10 ч       | (11/2-) | 126,910 | -83,508   | 1069,4478 |
|           | 50-Sn-128 | 59.07 мин    | 0+      | 127,911 | -83,336   | 1077,3478 |
|           | 50-Sn-129 | 2.23 мин     | (3/2+)  | 128,913 | -80,630   | 1082,7131 |
|           | 50-Sn-130 | 3.72 мин     | 0+      | 129,914 | -80,246   | 1090,4005 |
|           | 50-Sn-131 | 56.0 с       | (3/2+)  | 130,917 | -77,389   | 1095,6149 |
| 50-Sn-132 | 39.7 с    | 0+           | 131,918 | -76,621 | 1102,9175 |           |
| 50-Sn-133 | 1.45 с    | (7/2-)       | 132,924 | -70,967 | 1105,3350 |           |
| 50-Sn-134 | 1.12 с    | 0+           | 133,928 | -66,636 | 1109,0753 |           |
| 50-Sn-135 | 150 нс    |              | 134,935 | -60,799 | 1111,3100 |           |
| 50-Sn-136 | 150 нс    | 0+           | 135,939 | -56,504 | 1115,0870 |           |
| 50-Sn-137 | 150 нс    |              | 136,946 | -50,496 | 1117,1500 |           |
| Сурьма    | 51-Sb-103 | 1.5 мкс      |         | 102,940 | -55,778   | 847,2240  |
|           | 51-Sb-104 | 0.44 с+15-11 |         | 103,936 | -59,348   | 858,8660  |
|           | 51-Sb-105 | 1.12 с       |         | 104,932 | -63,781   | 871,3696  |
|           | 51-Sb-106 | 0.6 с        | (4+)    | 105,929 | -66,357   | 882,0170  |
|           | 51-Sb-107 | 4.6 с        | (5/2+)  | 106,924 | -70,654   | 894,3850  |
|           | 51-Sb-108 | 7.4 с        | (4+)    | 107,922 | -72,507   | 904,3100  |
|           | 51-Sb-109 | 17.0 с       | (5/2+)  | 108,918 | -76,256   | 916,1299  |
|           | 51-Sb-110 | 23.0 с       | (4+)    | 109,917 | -77,535   | 925,4800  |
|           | 51-Sb-111 | 75 с         | (5/2+)  | 110,913 | -80,844   | 936,8610  |
|           | 51-Sb-112 | 51.4 с       | 3+      | 111,912 | -81,604   | 945,6920  |
|           | 51-Sb-113 | 6.67 мин     | 5/2+    | 112,909 | -84,414   | 956,5733  |
|           | 51-Sb-114 | 3.49 мин     | 3+      | 113,909 | -84,677   | 964,9074  |
|           | 51-Sb-115 | 32.1 мин     | 5/2+    | 114,907 | -87,003   | 975,3047  |

Теллур

|           |               |        |         |         |           |
|-----------|---------------|--------|---------|---------|-----------|
| 51-Sb-116 | 15.8 мин      | 3+     | 115,907 | -86,818 | 983,1912  |
| 51-Sb-117 | 2.80 ч        | 5/2+   | 116,905 | -88,641 | 993,0861  |
| 51-Sb-118 | 3.6 мин       | 1+     | 117,906 | -87,996 | 1000,5125 |
| 51-Sb-119 | 38.19 ч       | 5/2+   | 118,904 | -89,473 | 1010,0607 |
| 51-Sb-120 | 15.89 мин     | 1+     | 119,905 | -88,423 | 1017,0814 |
| 51-Sb-121 | 57.21%        | 5/2+   | 120,904 | -89,593 | 1026,3229 |
| 51-Sb-122 | 2.7238 дн.    | 2-     | 121,905 | -88,329 | 1033,1299 |
| 51-Sb-123 | 42.79%        | 7/2+   | 122,904 | -89,222 | 1042,0952 |
| 51-Sb-124 | 60.20 дн.     | 3-     | 123,906 | -87,619 | 1048,5626 |
| 51-Sb-125 | 2.75856 лет   | 7/2+   | 124,905 | -88,261 | 1057,2764 |
| 51-Sb-126 | 12.46 дн.     | (8)-   | 125,907 | -86,398 | 1063,4844 |
| 51-Sb-127 | 3.85 дн.      | 7/2+   | 126,907 | -86,709 | 1071,8665 |
| 51-Sb-128 | 9.01 ч        | 8-     | 127,909 | -84,610 | 1077,8394 |
| 51-Sb-129 | 4.40 ч        | 7/2+   | 128,909 | -84,626 | 1085,9268 |
| 51-Sb-130 | 39.5 мин      | (8-)   | 129,912 | -82,394 | 1091,7659 |
| 51-Sb-131 | 23.03 мин     | (7/2+) | 130,912 | -82,021 | 1099,4646 |
| 51-Sb-132 | 2.79 мин      | (4+)   | 131,914 | -79,724 | 1105,2381 |
| 51-Sb-133 | 2.5 мин       | (7/2+) | 132,915 | -78,957 | 1112,5426 |
| 51-Sb-135 | 1.68 с        | (7/2+) | 134,925 | -69,706 | 1119,4341 |
| 51-Sb-136 | 0.82 с        |        | 135,931 | -64,590 | 1122,3900 |
| 51-Sb-137 | 150 нс        |        | 136,935 | -60,258 | 1126,1300 |
| 51-Sb-138 | 150 нс        |        | 137,941 | -54,995 | 1128,9380 |
| 52-Te-106 | 60 мкс +30-10 | 0+     | 105,938 | -58,030 | 872,9080  |
| 52-Te-107 | 3.1 мс        |        | 106,935 | -60,513 | 883,4620  |
| 52-Te-108 | 2.1 с         | 0+     | 107,929 | -65,683 | 896,7031  |
| 52-Te-109 | 4.6 с         | (5/2+) | 108,927 | -67,574 | 906,6656  |
| 52-Te-110 | 18.6 с        | 0+     | 109,922 | -72,277 | 919,4404  |
| 52-Te-111 | 19.3 с        | (5/2+) | 110,921 | -73,476 | 928,7101  |
| 52-Te-112 | 2.0 мин       | 0+     | 111,917 | -77,257 | 940,5624  |
| 52-Te-113 | 1.7 мин       | (7/2+) | 112,916 | -78,314 | 949,6910  |
| 52-Te-114 | 15.2 мин      | 0+     | 113,912 | -81,919 | 961,3670  |
| 52-Te-115 | 5.8 мин       | 7/2+   | 114,912 | -82,364 | 969,8837  |
| 52-Te-116 | 2.49 ч        | 0+     | 115,908 | -85,306 | 980,8970  |
| 52-Te-117 | 62 мин        | 1/2+   | 116,909 | -85,107 | 988,7691  |
| 52-Te-118 | 6.00 дн.      | 0+     | 117,906 | -87,723 | 999,4570  |
| 52-Te-119 | 16.03 ч       | 1/2+   | 118,906 | -87,180 | 1006,9853 |
| 52-Te-120 | 0.09%         | 0+     | 119,904 | -89,405 | 1017,2812 |
| 52-Te-121 | 19.16 дн.     | 1/2+   | 120,905 | -88,557 | 1024,5050 |
| 52-Te-122 | 2.55%         | 0+     | 121,903 | -90,311 | 1034,3301 |
|           | 0.89% 6e+14   |        |         |         |           |
| 52-Te-123 | лет           | 1/2+   | 122,904 | -89,169 | 1041,2595 |
| 52-Te-124 | 4.74%         | 0+     | 123,903 | -90,523 | 1050,6847 |
| 52-Te-125 | 7.07%         | 1/2+   | 124,904 | -89,028 | 1057,2608 |
| 52-Te-126 | 18.84%        | 0+     | 125,903 | -90,070 | 1066,3746 |
| 52-Te-127 | 9.35 ч        | 3/2+   | 126,905 | -88,290 | 1072,6651 |
|           | 31.74%        |        |         |         |           |
| 52-Te-128 | 7.7e+24 лет   | 0+     | 127,904 | -88,994 | 1081,4406 |
| 52-Te-129 | 69.6 мин      | 3/2+   | 128,907 | -87,006 | 1087,5239 |
|           | 34.08%        |        |         |         |           |
| 52-Te-130 | 5.6e+22 лет   | 0+     | 129,906 | -87,353 | 1095,9425 |
| 52-Te-131 | 25.0 мин      | 3/2+   | 130,909 | -85,211 | 1101,8722 |
| 52-Te-132 | 3.204 дн.     | 0+     | 131,909 | -85,210 | 1109,9418 |



|          |           |             |         |         |           |           |
|----------|-----------|-------------|---------|---------|-----------|-----------|
|          | 52-Te-133 | 12.5 мин    | (3/2+)  | 132,911 | -82,960   | 1115,7633 |
|          | 52-Te-134 | 41.8 мин    | 0+      | 133,912 | -82,399   | 1123,2743 |
|          | 52-Te-135 | 19.0 с      | (7/2-)  | 134,916 | -77,826   | 1126,7718 |
|          | 52-Te-136 | 17.5 с      | 0+      | 135,920 | -74,423   | 1131,4409 |
|          | 52-Te-137 | 2.49 с      | (7/2-)  | 136,925 | -69,560   | 1134,6484 |
|          | 52-Te-138 | 1.4 с       | 0+      | 137,929 | -65,931   | 1139,0910 |
|          | 52-Te-139 | 150 нс      |         | 138,935 | -60,799   | 1142,0300 |
|          | 52-Te-140 | 150 нс      | 0+      | 139,939 | -57,101   | 1146,4030 |
|          | 52-Te-141 | 150 нс      |         | 140,944 | -51,800   | 1149,1750 |
|          | 52-Te-142 |             | 0+      | 141,949 | -47,972   | 1153,4170 |
| Иод      | 53-I-108  | 36 мс       | -1      | 107,943 | -52,824   | 883,0620  |
|          | 53-I-109  | 100 мкс     | (5/2+)  | 108,938 | -57,574   | 895,8835  |
|          | 53-I-110  | 0.65 с      |         | 109,935 | -60,348   | 906,7290  |
|          | 53-I-111  | 2.5 с       | (5/2+)  | 110,930 | -64,947   | 919,3990  |
|          | 53-I-112  | 3.42 с      |         | 111,928 | -67,096   | 929,6190  |
|          | 53-I-113  | 6.6 с       | (5/2+)  | 112,924 | -71,125   | 941,7197  |
|          | 53-I-114  | 2.1 с       | 1+      | 113,922 | -72,796   | 951,4620  |
|          | 53-I-115  | 1.3 мин     | (5/2+)  | 114,918 | -76,459   | 963,1960  |
|          | 53-I-116  | 2.91 с      | 1+      | 115,917 | -77,561   | 972,3695  |
|          | 53-I-117  | 2.22 мин    | (5/2+)  | 116,914 | -80,437   | 983,3167  |
|          | 53-I-118  | 13.7 мин    | 2-      | 117,913 | -80,690   | 991,6418  |
|          | 53-I-119  | 19.1 мин    | 5/2+    | 118,910 | -83,666   | 1002,6887 |
|          | 53-I-120  | 81.0 мин    | 2-      | 119,910 | -83,790   | 1010,8839 |
|          | 53-I-121  | 2.12 ч      | 5/2+    | 120,907 | -86,288   | 1021,4533 |
|          | 53-I-122  | 3.63 мин    | 1+      | 121,908 | -86,077   | 1029,3137 |
|          | 53-I-123  | 13.27 ч     | 5/2+    | 122,906 | -87,935   | 1039,2429 |
|          | 53-I-124  | 4.1760 дн.  | 2-      | 123,906 | -87,363   | 1046,7428 |
|          | 53-I-125  | 59.400 дн.  | 5/2+    | 124,905 | -88,842   | 1056.2926 |
|          | 53-I-126  | 13.11 дн.   | 2-      | 125,906 | -87,915   | 1063,4369 |
|          | 53-I-127  | 100%        | 5/2+    | 126,904 | -88,987   | 1072,5803 |
|          | 53-I-128  | 24.99 мин   | 1+      | 127,906 | -87,742   | 1079,4064 |
|          | 53-I-129  | 1.57e+7 лет | 7/2+    | 128,905 | -88,504   | 1088,2395 |
|          | 53-I-130  | 12.36 ч     | 5+      | 129,907 | -86,933   | 1094,7398 |
|          | 53-I-131  | 8.02070 дн. | 7/2+    | 130,906 | -87,445   | 1103,3233 |
|          | 53-I-132  | 2.295 ч     | 4+      | 131,908 | -85,703   | 1109,6524 |
|          | 53-I-133  | 20.8 ч      | 7/2+    | 132,908 | -85,878   | 1117,8989 |
|          | 53-I-134  | 52.5 мин    | (4)+    | 133,910 | -83,949   | 1124,0420 |
|          | 53-I-135  | 6.57 ч      | 7/2+    | 134,910 | -83,788   | 1131,9514 |
|          | 53-I-136  | 83.4 с      | (1-)    | 135,915 | -79,498   | 1135,7334 |
|          | 53-I-137  | 24.5 с      | (7/2+)  | 136,918 | -76,501   | 1140,8076 |
|          | 53-I-138  | 6.49 с      | (2-)    | 137,922 | -72,299   | 1144,6770 |
|          | 53-I-139  | 2.280 с     | (7/2+)  | 138,926 | -68,844   | 1149,2927 |
|          | 53-I-140  | 0.86 с      | -3      | 139,931 | -64,077   | 1152,5980 |
|          | 53-I-141  | 0.43 с      |         | 140,935 | -60,705   | 1157,2970 |
|          | 53-I-142  | 0.2 с       |         | 141,940 | -55,722   | 1160,3850 |
|          | 53-I-143  | 150 нс      |         | 142,944 | -52,098   | 1164,8330 |
| 53-I-144 | 150 нс    |             | 143,950 | -46,938 | 1167,7440 |           |
| Ксенон   | 54-Xe-110 | 0.2 с       | 0+      | 109,944 | -51,721   | 897,3190  |
|          | 54-Xe-111 | 0.74 с      |         | 110,942 | -54,369   | 908,0390  |
|          | 54-Xe-112 | 2.7 с       | 0+      | 111,936 | -59,927   | 921,6684  |
|          | 54-Xe-113 | 2.74 с      |         | 112,933 | -62,053   | 931,8659  |
|          | 54-Xe-114 | 10.0 с      | 0+      | 113,928 | -66,932   | 944,8160  |

## Цезий

|           |             |        |         |         |           |
|-----------|-------------|--------|---------|---------|-----------|
| 54-Xe-115 | 18 с        | (5/2+) | 114,927 | -68,430 | 954,3850  |
| 54-Xe-116 | 59 с        | 0+     | 115,922 | -72,901 | 966,9270  |
| 54-Xe-117 | 61 с        | 5/2(+) | 116,921 | -73,994 | 976,0915  |
| 54-Xe-118 | 3.8 мин     | 0+     | 117,917 | -77,714 | 987,8827  |
| 54-Xe-119 | 5.8 мин     | (5/2+) | 118,916 | -78,661 | 996,9010  |
| 54-Xe-120 | 40 мин      | 0+     | 119,912 | -81,830 | 1008,1415 |
| 54-Xe-121 | 40.1 мин    | 5/2(+) | 120,911 | -82,543 | 1016,9259 |
| 54-Xe-122 | 20.1 ч      | 0+     | 121,909 | -85,187 | 1027,6409 |
| 54-Xe-123 | 2.08 ч      | (1/2)+ | 122,908 | -85,259 | 1035,7846 |
|           | 0.095%      |        |         |         |           |
| 54-Xe-124 | 1.1e+17 лет | 0+     | 123,906 | -87,658 | 1046,2545 |
| 54-Xe-125 | 16.9 ч      | 1/2(+) | 124,906 | -87,189 | 1053,8577 |
| 54-Xe-126 | 0.089%      | 0+     | 125,904 | -89,173 | 1063,9126 |
| 54-Xe-127 | 36.4 дн.    | 1/2+   | 126,905 | -88,325 | 1071,1356 |
| 54-Xe-128 | 1.910%      | 0+     | 127,904 | -89,861 | 1080,7430 |
| 54-Xe-129 | 26.40%      | 1/2+   | 128,905 | -88,697 | 1087,6509 |
| 54-Xe-130 | 4.071%      | 0+     | 129,904 | -89,882 | 1096,9067 |
| 54-Xe-131 | 21.232%     | 3/2+   | 130,905 | -88,416 | 1103,5118 |
| 54-Xe-132 | 26.909%     | 0+     | 131,904 | -89,280 | 1112,4471 |
| 54-Xe-133 | 5.243 дн.   | 3/2+   | 132,906 | -87,648 | 1118,8872 |
| 54-Xe-134 | 10.436%     | 0+     | 133,905 | -88,124 | 1127,4346 |
| 54-Xe-135 | 9.14 ч      | 3/2+   | 134,907 | -86,436 | 1133,8171 |
|           | 8.857%      |        |         |         |           |
| 54-Xe-136 | 3.6e+20 лет | 0+     | 135,907 | -86,424 | 1141,8773 |
| 54-Xe-137 | 3.818 мин   | 7/2-   | 136,912 | -82,379 | 1145,9027 |
| 54-Xe-138 | 14.08 мин   | 0+     | 137,914 | -80,119 | 1151,7146 |
| 54-Xe-139 | 39.68 с     | 3/2-   | 138,919 | -75,650 | 1155,3163 |
| 54-Xe-140 | 13.60 с     | 0+     | 139,922 | -72,996 | 1160,7340 |
| 54-Xe-141 | 1.73 с      | 5/2(-) | 140,927 | -68,329 | 1164,1380 |
| 54-Xe-142 | 1.22 с      | 0+     | 141,930 | -65,481 | 1169,3620 |
| 54-Xe-143 | 0.30 с      | 5/2-   | 142,935 | -60,650 | 1172,6020 |
| 54-Xe-144 | 1.15 с      | 0+     | 143,938 | -57,538 | 1177,5620 |
| 54-Xe-145 | 900 мс      | (3/2-) | 144,944 | -52,471 | 1180,5660 |
| 54-Xe-145 | 0.9 с       |        | 144,944 | -52,471 | 1180,5660 |
| 54-Xe-146 |             | 0+     | 145,947 | -49,090 | 1185,2560 |
| 54-Xe-147 | 150 нс      |        | 146,953 | -43,771 | 1188,0080 |
| 55-Cs-112 | 500 мкс     |        | 111,950 | -46,266 | 907,2250  |
| 55-Cs-113 | 16.7 мкс    | (5/2+) | 112,945 | -51,665 | 920,6949  |
| 55-Cs-114 | 0.57 с      | (1+)   | 113,941 | -54,566 | 931,6670  |
| 55-Cs-115 | 1.4 с       |        | 114,936 | -59,672 | 944,8450  |
| 55-Cs-117 | 8.4 с       | (9/2+) | 116,929 | -66,472 | 967,7872  |
| 55-Cs-118 | 14 с        | 2      | 117,927 | -68,414 | 977,8003  |
| 55-Cs-119 | 43.0 с      | 9/2+   | 118,922 | -72,311 | 989,7690  |
| 55-Cs-120 | 64 с        | 2      | 119,921 | -73,888 | 999,4171  |
| 55-Cs-121 | 155 с       | 3/2(+) | 120,917 | -77,143 | 1010,7436 |
| 55-Cs-122 | 21.0 с      | 1+     | 121,916 | -78,132 | 1019,8038 |
| 55-Cs-123 | 5.87 мин    | 1/2+   | 122,913 | -81,049 | 1030,7924 |
| 55-Cs-124 | 30.8 с      | 1+     | 123,912 | -81,743 | 1039,5572 |
| 55-Cs-125 | 46.7 мин    | 1/2(+) | 124,910 | -84,091 | 1049,9766 |
| 55-Cs-126 | 1.63 мин    | 1+     | 125,909 | -84,349 | 1058,3059 |
| 55-Cs-127 | 6.25 ч      | 1/2+   | 126,907 | -86,240 | 1068,2685 |
| 55-Cs-128 | 3.66 мин    | 1+     | 127,908 | -85,932 | 1076,0321 |

## Барий

|           |              |        |         |         |           |
|-----------|--------------|--------|---------|---------|-----------|
| 55-Cs-129 | 32.06 ч      | 1/2+   | 128,906 | -87,501 | 1085,6726 |
| 55-Cs-130 | 29.21 мин    | 1+     | 129,907 | -86,903 | 1093,1452 |
| 55-Cs-131 | 9.689 дн.    | 5/2+   | 130,905 | -88,063 | 1102,3771 |
| 55-Cs-132 | 6.479 дн.    | 2+     | 131,906 | -87,160 | 1109,5452 |
| 55-Cs-133 | 100%         | 7/2+   | 132,905 | -88,076 | 1118,5322 |
| 55-Cs-134 | 754.5 дн.    | 4+     | 133,907 | -86,896 | 1125,4237 |
| 55-Cs-135 | 2.3ε+6 лет   | 7/2+   | 134,906 | -87,587 | 1134,1857 |
| 55-Cs-136 | 13.16 дн.    | 5+     | 135,907 | -86,344 | 1141,0146 |
| 55-Cs-137 | 30.07 лет    | 7/2+   | 136,907 | -86,551 | 1149,2929 |
| 55-Cs-138 | 33.41 мин    | 3-     | 137,911 | -82,893 | 1153,7062 |
| 55-Cs-139 | 9.27 мин     | 7/2+   | 138,913 | -80,707 | 1159,5910 |
| 55-Cs-140 | 63.7 с       | 1-     | 139,917 | -77,056 | 1164,0117 |
| 55-Cs-141 | 24.94 с      | 7/2+   | 140,920 | -74,479 | 1169,5056 |
| 55-Cs-142 | 1.684 с      | 0-     | 141,924 | -70,521 | 1173,6196 |
| 55-Cs-143 | 1.78 с       | 3/2+   | 142,927 | -67,691 | 1178,8611 |
| 55-Cs-144 | 1.01 с       | 1      | 143,932 | -63,316 | 1182,5571 |
| 55-Cs-145 | 0.594 с      | 3/2+   | 144,935 | -60,185 | 1187,4978 |
| 55-Cs-146 | 0.321 с      | 1-     | 145,940 | -55,739 | 1191,1224 |
| 55-Cs-147 | 0.235 с      | (3/2+) | 146,944 | -52,290 | 1195,7449 |
| 55-Cs-148 | 158 мс       |        | 147,949 | -47,600 | 1199,1261 |
| 55-Cs-149 | 50 мс        |        | 148,953 | -44,041 | 1203,6390 |
| 55-Cs-150 | 50 мс        |        | 149,958 | -39,151 | 1206,8200 |
| 55-Cs-151 | 50 мс        |        | 150,962 | -35,397 | 1211,1370 |
| 56-Ba-114 | 0.43 с+30-15 | 0+     | 113,951 | -45,698 | 922,0170  |
| 56-Ba-115 | 0.45 с       | (3/2-) | 114,948 | -48,708 | 933,0980  |
| 56-Ba-116 | 1.3 с        | 0+     | 115,942 | -54,325 | 946,7860  |
| 56-Ba-117 | 1.75 с       | 3/2+   | 116,939 | -56,952 | 957,4850  |
| 56-Ba-118 | 5.2 с        | 0+     | 117,933 | -62,000 | 970,6050  |
| 56-Ba-119 | 5.4 с        | (5/2+) | 118,931 | -64,225 | 980,9003  |
| 56-Ba-120 | 24 с         | 0+     | 119,926 | -68,888 | 993,6347  |
| 56-Ba-121 | 29.7 с       | 5/2(+) | 120,924 | -70,341 | 1003,1592 |
| 56-Ba-122 | 1.95 мин     | 0+     | 121,920 | -74,277 | 1015,1670 |
| 56-Ba-123 | 2.7 мин      | 5/2+   | 122,919 | -75,591 | 1024,5520 |
| 56-Ba-124 | 11.0 мин     | 0+     | 123,915 | -79,095 | 1036,1268 |
| 56-Ba-125 | 3.5 мин      | 1/2(+) | 124,915 | -79,531 | 1044,6343 |
| 56-Ba-126 | 100 мин      | 0+     | 125,911 | -82,676 | 1055,8504 |
| 56-Ba-127 | 12.7 мин     | 1/2+   | 126,911 | -82,790 | 1064,0361 |
| 56-Ba-128 | 2.43 дн.     | 0+     | 127,908 | -85,410 | 1074,7273 |
| 56-Ba-129 | 2.23 ч       | 1/2+   | 128,909 | -85,070 | 1082,4587 |
|           | 0.106%       |        |         |         |           |
| 56-Ba-130 | 3.5ε+14 лет  | 0+     | 129,906 | -87,271 | 1092,7314 |
| 56-Ba-131 | 11.50 дн.    | 1/2+   | 130,907 | -86,693 | 1100,2249 |
| 56-Ba-132 | 0.101%       | 0+     | 131,905 | -88,440 | 1110,0424 |
| 56-Ba-133 | 3848.9 дн.   | 1/2+   | 132,906 | -87,558 | 1117,2324 |
| 56-Ba-134 | 2.417%       | 0+     | 133,905 | -88,955 | 1126,7000 |
| 56-Ba-135 | 6.592%       | 3/2+   | 134,906 | -87,856 | 1133,6727 |
| 56-Ba-136 | 7.854%       | 0+     | 135,905 | -88,892 | 1142,7805 |
| 56-Ba-137 | 11.232%      | 3/2+   | 136,906 | -87,727 | 1149,6862 |
| 56-Ba-138 | 71.698%      | 0+     | 137,905 | -88,267 | 1158,2979 |
| 56-Ba-139 | 83.06 мин    | 7/2-   | 138,909 | -84,919 | 1163,0214 |
| 56-Ba-140 | 12.752 дн.   | 0+     | 139,911 | -83,276 | 1169,4494 |
| 56-Ba-141 | 18.27 мин    | 3/2-   | 140,914 | -79,730 | 1173,9746 |

## Лантан

|           |                    |         |         |         |           |
|-----------|--------------------|---------|---------|---------|-----------|
| 56-Ba-142 | 10.6 мин           | 0+      | 141,916 | -77,828 | 1180,1441 |
| 56-Ba-143 | 14.33 с            | 5/2-    | 142,921 | -73,945 | 1184,3320 |
| 56-Ba-144 | 11.5 с             | 0+      | 143,923 | -71,780 | 1190,2392 |
| 56-Ba-145 | 4.31 с             | 5/2-    | 144,927 | -68,070 | 1194,6000 |
| 56-Ba-146 | 2.22 с             | 0+      | 145,930 | -65,105 | 1199,7066 |
| 56-Ba-147 | 0.893 с            | (3/2+)  | 146,934 | -61,486 | 1204,1582 |
| 56-Ba-148 | 0.607 с            | 0+      | 147,938 | -58,048 | 1208,7925 |
| 56-Ba-149 | 0.344 с            |         | 148,942 | -53,598 | 1212,4130 |
| 56-Ba-150 | 0.3 с              | 0+      | 149,946 | -50,655 | 1217,5410 |
| 56-Ba-151 | 150 нс             |         | 150,951 | -45,923 | 1220,8810 |
| 56-Ba-152 | 0.1 с              | 0+      | 151,954 | -42,700 | 1225,7290 |
| 56-Ba-153 | 0.08 с             |         | 152,960 | -37,623 | 1228,7240 |
| 57-La-117 | 0.5 с              |         | 116,950 | -46,565 | 946,3160  |
| 57-La-118 | 1 с                |         | 117,947 | -49,770 | 957,5920  |
| 57-La-119 | 2 с                |         | 118,941 | -54,967 | 970,8610  |
| 57-La-120 | 2.8 с              |         | 119,938 | -57,687 | 981,6520  |
| 57-La-121 | 5.3 с              |         | 120,933 | -62,401 | 994,4370  |
| 57-La-122 | 8.7 с              |         | 121,931 | -64,543 | 1004,6500 |
| 57-La-123 | 17 с               |         | 122,926 | -68,707 | 1016,8860 |
| 57-La-125 | 64.8 с             |         | 124,921 | -73,895 | 1038,2170 |
| 57-La-126 | 50 с               | low     | 125,919 | -75,106 | 1047,4990 |
| 57-La-126 | 54 с               | high    | 125,919 | -75,106 | 1047,4990 |
| 57-La-127 | 5.1 мин            | (11/2-) | 126,916 | -78,096 | 1058,5600 |
| 57-La-128 | 5.23 мин           | (5+)    | 127,915 | -78,760 | 1067,2949 |
| 57-La-129 | 11.6 мин           | 3/2+    | 128,913 | -81,350 | 1077,9563 |
| 57-La-130 | 8.7 мин            | 3(+)    | 129,912 | -81,673 | 1086,3510 |
| 57-La-131 | 59 мин             | 3/2+    | 130,910 | -83,733 | 1096,4825 |
| 57-La-132 | 4.8 ч              | 2-      | 131,910 | -83,732 | 1104,5521 |
| 57-La-133 | 3.912 ч            | 5/2+    | 132,908 | -85,328 | 1114,2200 |
| 57-La-134 | 6.45 мин           | 1+      | 133,908 | -85,241 | 1122,2045 |
| 57-La-135 | 19.5 ч             | 5/2+    | 134,907 | -86,656 | 1131,6904 |
| 57-La-136 | 9.87 мин           | 1+      | 135,908 | -86,022 | 1139,1281 |
| 57-La-137 | 6e+4 лет<br>0.090% | 7/2+    | 136,906 | -87,127 | 1148,3037 |
| 57-La-138 | 1.05e+11 лет       | 5+      | 137,907 | -86,529 | 1155,7778 |
| 57-La-139 | 99.910%            | 7/2+    | 138,906 | -87,236 | 1164,5558 |
| 57-La-140 | 1.6781 дн.         | 3-      | 139,909 | -84,326 | 1169,7168 |
| 57-La-141 | 3.92 ч             | (7/2+)  | 140,911 | -82,943 | 1176,4054 |
| 57-La-142 | 91.1 мин           | 2-      | 141,914 | -80,039 | 1181,5728 |
| 57-La-143 | 14.2 мин           | (7/2)+  | 142,916 | -78,191 | 1187,7959 |
| 57-La-144 | 40.8 с             | (3-)    | 143,920 | -74,900 | 1192,5762 |
| 57-La-145 | 24.8 с             | (5/2+)  | 144,922 | -72,993 | 1198,7410 |
| 57-La-146 | 6.27 с             | 2-      | 145,926 | -69,210 | 1203,0288 |
| 57-La-147 | 4.015 с            | (5/2+)  | 146,928 | -67,236 | 1209,1259 |
| 57-La-148 | 1.05 с             | (2-)    | 147,932 | -63,163 | 1213,1251 |
| 57-La-149 | 1.05 с             |         | 148,934 | -61,134 | 1219,1670 |
| 57-La-150 | 0.51 с             | (3-)    | 149,939 | -57,222 | 1223,3260 |
| 57-La-151 | 150 нс             |         | 150,942 | -54,437 | 1228,6120 |
| 57-La-152 | 150 нс             |         | 151,946 | -50,198 | 1232,4450 |
| 57-La-153 | 150 нс             |         | 152,949 | -47,087 | 1237,4050 |
| 57-La-154 | 0.1 с              |         | 153,954 | -42,476 | 1240,8660 |
| 57-La-155 | 0.06 с             |         | 154,958 | -39,002 | 1245,4630 |

|           |           |                       |         |         |         |           |           |
|-----------|-----------|-----------------------|---------|---------|---------|-----------|-----------|
| Церий     | 58-Ce-119 | 0.2 с                 |         | 118,953 | -44,004 | 959,1150  |           |
|           | 58-Ce-120 | 0.25 с                | 0+      | 119,947 | -49,705 | 972,8870  |           |
|           | 58-Ce-121 | 1.1 с                 |         | 120,944 | -52,471 | 983,7250  |           |
|           | 58-Ce-122 | 2 с                   | 0+      | 121,938 | -57,743 | 997,0680  |           |
|           | 58-Ce-123 | 3.8 с                 | (5/2)   | 122,936 | -60,072 | 1007,4680 |           |
|           | 58-Ce-124 | 6 с                   | 0+      | 123,931 | -64,720 | 1020,1880 |           |
|           | 58-Ce-125 | 10.2 с                | (5/2+)  | 124,929 | -66,565 | 1030,1030 |           |
|           | 58-Ce-126 | 50 с                  | 0+      | 125,924 | -70,700 | 1042,3110 |           |
|           | 58-Ce-127 | 31 с                  | (5/2+)  | 126,923 | -71,958 | 1051,6390 |           |
|           | 58-Ce-128 | 3.93 мин              | 0+      | 127,919 | -75,572 | 1063,3250 |           |
|           | 58-Ce-129 | 3.5 мин               | 5/2+    | 128,918 | -76,300 | 1072,1240 |           |
|           | 58-Ce-130 | 25 мин                | 0+      | 129,915 | -79,462 | 1083,3580 |           |
|           | 58-Ce-131 | 10.2 мин              | (7/2+)  | 130,914 | -79,713 | 1091,6802 |           |
|           | 58-Ce-132 | 3.51 ч                | 0+      | 131,911 | -82,447 | 1102,4850 |           |
|           | 58-Ce-133 | 97 мин                | 1/2+    | 132,912 | -82,391 | 1110,5000 |           |
|           | 58-Ce-134 | 3.16 дн.              | 0+      | 133,909 | -84,741 | 1120,9221 |           |
|           | 58-Ce-135 | 17.7 ч                | 1/2(+)  | 134,909 | -84,630 | 1128,8824 |           |
|           | 58-Ce-136 | 0.185%                | 0+      | 135,907 | -86,495 | 1138,8186 |           |
|           | 58-Ce-137 | 9.0 ч                 | 3/2+    | 136,908 | -85,905 | 1146,2993 |           |
|           | 58-Ce-138 | 0.251%                | 0+      | 137,906 | -87,574 | 1156,0399 |           |
|           | 58-Ce-139 | 137.640 дн.           | 3/2+    | 138,907 | -86,958 | 1163,4955 |           |
|           | 58-Ce-140 | 88.450%               | 0+      | 139,905 | -88,088 | 1172,6963 |           |
|           | 58-Ce-141 | 32.501 дн.<br>11.114% | 7/2-    | 140,908 | -85,445 | 1178,1249 |           |
|           | 58-Ce-142 | 5e+16 лет             | 0+      | 141,909 | -84,543 | 1185,2940 |           |
|           | 58-Ce-143 | 33.039 ч              | 3/2-    | 142,912 | -81,616 | 1190,4391 |           |
|           | 58-Ce-144 | 284.893 дн.           | 0+      | 143,914 | -80,441 | 1197,3353 |           |
|           | 58-Ce-145 | 3.01 мин              | (3/2-)  | 144,917 | -77,102 | 1202,0670 |           |
|           | 58-Ce-146 | 13.52 мин             | 0+      | 145,919 | -75,740 | 1208,7767 |           |
|           | 58-Ce-147 | 56.4 с                | (5/2-)  | 146,923 | -72,181 | 1213,2885 |           |
|           | 58-Ce-148 | 56 с                  | 0+      | 147,924 | -70,426 | 1219,6051 |           |
|           | 58-Ce-149 | 5.3 с                 | (3/2-)  | 148,928 | -66,798 | 1224,0488 |           |
|           | 58-Ce-150 | 4.0 с                 | 0+      | 149,930 | -64,994 | 1230,3156 |           |
|           | 58-Ce-151 | 1.02 с                |         | 150,934 | -61,441 | 1234,8350 |           |
|           | 58-Ce-152 | 1.4 с                 | 0+      | 151,936 | -59,262 | 1240,7260 |           |
|           | 58-Ce-153 | 150 нс                |         | 152,941 | -55,349 | 1244,8850 |           |
|           | 58-Ce-154 | 150 нс                | 0+      | 153,943 | -52,797 | 1250,4040 |           |
|           | 58-Ce-155 | 150 нс                |         | 154,948 | -48,400 | 1254,0790 |           |
|           | 58-Ce-156 | 0.15 с                | 0+      | 155,951 | -45,401 | 1259,1510 |           |
|           | 58-Ce-157 | 0.05 с                |         | 156,956 | -40,669 | 1262,4900 |           |
|           | Празеодим | 59-Pr-121             | 1.4 с   |         | 120,955 | -41,579   | 972,0500  |
|           |           | 59-Pr-122             | 0.5 с   |         | 121,952 | -45,038   | 983,5800  |
|           |           | 59-Pr-123             | 0.8 с   |         | 122,946 | -50,338   | 996,9520  |
|           |           | 59-Pr-124             | 1.2 с   |         | 123,943 | -53,132   | 1007,8180 |
| 59-Pr-125 |           | 3.3 с                 |         | 124,938 | -57,911 | 1020,6670 |           |
| 59-Pr-126 |           | 3.14 с                | (3,4,5) | 125,935 | -60,258 | 1031,0860 |           |
| 59-Pr-127 |           | 4.2 с                 |         | 126,931 | -64,431 | 1043,3310 |           |
| 59-Pr-128 |           | 3.1 с                 | 4,5,6   | 127,929 | -66,322 | 1053,2930 |           |
| 59-Pr-129 |           | 32 с                  | (11/2-) | 128,925 | -69,992 | 1065,0340 |           |
| 59-Pr-130 |           | 40.0 с                |         | 129,923 | -71,371 | 1074,4840 |           |
| 59-Pr-131 |           | 94 с                  | (3/2+)  | 130,920 | -74,463 | 1085,6478 |           |
| 59-Pr-132 |           | 1.6 мин               |         | 131,919 | -75,339 | 1094,5950 |           |

## Неодим

|           |              |         |         |         |           |
|-----------|--------------|---------|---------|---------|-----------|
| 59-Pr-133 | 6.5 мин      | (3/2+)  | 132,916 | -78,059 | 1105,3860 |
| 59-Pr-134 | 17 мин       | 2-      | 133,916 | -78,551 | 1113,9500 |
| 59-Pr-135 | 24 мин       | 3/2(+)  | 134,913 | -80,910 | 1124,3801 |
| 59-Pr-136 | 13.1 мин     | 2+      | 135,913 | -81,369 | 1132,9099 |
| 59-Pr-137 | 1.28 ч       | 5/2+    | 136,911 | -83,203 | 1142,8149 |
| 59-Pr-138 | 1.45 мин     | 1+      | 137,911 | -83,137 | 1150,8206 |
| 59-Pr-139 | 4.41 ч       | 5/2+    | 138,909 | -84,829 | 1160,5841 |
| 59-Pr-140 | 3.39 мин     | 1+      | 139,909 | -84,700 | 1168,5260 |
| 59-Pr-141 | 100%         | 5/2+    | 140,908 | -86,026 | 1177,9232 |
| 59-Pr-142 | 19.12 ч      | 2-      | 141,910 | -83,797 | 1183,7663 |
| 59-Pr-143 | 13.57 дн.    | 7/2+    | 142,911 | -83,078 | 1191,1182 |
| 59-Pr-144 | 17.28 мин    | 0-      | 143,913 | -80,760 | 1196,8716 |
| 59-Pr-145 | 5.984 ч      | 7/2+    | 144,915 | -79,636 | 1203,8193 |
| 59-Pr-146 | 24.15 мин    | (2-)    | 145,918 | -76,766 | 1209,0205 |
| 59-Pr-147 | 13.4 мин     | (3/2+)  | 146,919 | -75,471 | 1215,7962 |
| 59-Pr-148 | 2.29 мин     | 1-      | 147,922 | -72,486 | 1220,8828 |
| 59-Pr-149 | 2.26 мин     | (5/2+)  | 148,924 | -70,988 | 1227,4564 |
| 59-Pr-150 | 6.19 с       | (1-)    | 149,927 | -68,004 | 1232,5433 |
| 59-Pr-151 | 18.90 с      | (3/2-)  | 150,928 | -66,855 | 1239,4662 |
| 59-Pr-152 | 3.63 с       | (4-)    | 151,932 | -63,714 | 1244,3960 |
| 59-Pr-153 | 4.28 с       |         | 152,934 | -61,805 | 1250,5580 |
| 59-Pr-154 | 2.3 с        | (3+,2+) | 153,937 | -58,321 | 1255,1460 |
| 59-Pr-155 | 300 нс       |         | 154,940 | -55,899 | 1260,7950 |
| 59-Pr-156 | 300 нс       |         | 155,944 | -52,052 | 1265,0190 |
| 59-Pr-157 | 0.3 с        |         | 156,947 | -49,211 | 1270,2500 |
| 59-Pr-158 | 0.2 с        |         | 157,952 | -44,917 | 1274,0270 |
| 59-Pr-159 | 0.1 с        |         | 158,955 | -41,703 | 1278,8840 |
| 60-Nd-126 | 1 с          | 0+      | 125,943 | -53,030 | 1023,0750 |
| 60-Nd-127 | 1.8 с        |         | 126,941 | -55,424 | 1033,5410 |
| 60-Nd-128 |              | 0+      | 127,935 | -60,184 | 1046,3720 |
| 60-Nd-129 | 7 с          | (5/2+)  | 128,933 | -62,173 | 1056,4330 |
| 60-Nd-130 | 28 с         | 0+      | 129,929 | -66,341 | 1068,6720 |
| 60-Nd-131 | 33 с         | (5/2)   | 130,927 | -67,903 | 1078,3055 |
| 60-Nd-132 | 80 с         | 0+      | 131,923 | -71,613 | 1090,0870 |
| 60-Nd-133 | 70 с         | (7/2+)  | 132,922 | -72,461 | 1099,0060 |
| 60-Nd-134 | 8.5 мин      | 0+      | 133,919 | -75,781 | 1110,3970 |
| 60-Nd-135 | 12.4 мин     | 9/2(-)  | 134,918 | -76,159 | 1118,8460 |
| 60-Nd-136 | 50.65 мин    | 0+      | 135,915 | -79,158 | 1129,9165 |
| 60-Nd-137 | 38.5 мин     | 1/2+    | 136,915 | -79,513 | 1138,3426 |
| 60-Nd-138 | 5.04 ч       | 0+      | 137,912 | -82,037 | 1148,9380 |
| 60-Nd-139 | 29.7 мин     | 3/2+    | 138,912 | -82,042 | 1157,0148 |
| 60-Nd-140 | 3.37 дн.     | 0+      | 139,909 | -84,477 | 1167,5213 |
| 60-Nd-141 | 2.49 ч       | 3/2+    | 140,910 | -84,203 | 1175,3179 |
| 60-Nd-142 | 27.2%        | 0+      | 141,908 | -85,960 | 1185,1462 |
| 60-Nd-143 | 12.2%        | 7/2-    | 142,910 | -84,012 | 1191,2697 |
|           | 23.8%        |         |         |         |           |
| 60-Nd-144 | 2.29е+15 лет | 0+      | 143,910 | -83,757 | 1199,0868 |
| 60-Nd-145 | 8.3%         | 7/2-    | 144,913 | -81,442 | 1204,8422 |
| 60-Nd-146 | 17.2%        | 0+      | 145,913 | -80,936 | 1212,4074 |
| 60-Nd-147 | 10.98 дн.    | 5/2-    | 146,916 | -78,156 | 1217,6995 |
| 60-Nd-148 | 5.7%         | 0+      | 147,917 | -77,418 | 1225,0324 |
| 60-Nd-149 | 1.728 ч      | 5/2-    | 148,920 | -74,385 | 1230,0711 |

## Прометий

|           | 5.6% 6.8e+18 |         |         |         |           |
|-----------|--------------|---------|---------|---------|-----------|
| 60-Nd-150 | лет          | 0+      | 149,921 | -73,694 | 1237,4509 |
| 60-Nd-151 | 12.44 мин    | 3/2+    | 150,924 | -70,957 | 1242,7853 |
| 60-Nd-152 | 11.4 мин     | 0+      | 151,925 | -70,158 | 1250,0577 |
| 60-Nd-153 | 31.6 с       | (3/2)-  | 152,928 | -67,352 | 1255,3233 |
| 60-Nd-154 | 25.9 с       | 0+      | 153,929 | -65,686 | 1261,7284 |
| 60-Nd-155 | 8.9 с        |         | 154,933 | -62,755 | 1266,8690 |
| 60-Nd-156 | 5.49 с       | 0+      | 155,935 | -60,361 | 1272,5460 |
| 60-Nd-157 | 2 с          |         | 156,939 | -56,570 | 1276,8260 |
| 60-Nd-158 | 0.7 с        | 0+      | 157,942 | -54,148 | 1282,4760 |
| 60-Nd-159 | 0.7 с        |         | 158,946 | -49,937 | 1286,3370 |
| 60-Nd-160 | 0.3 с        | 0+      | 159,949 | -47,143 | 1291,6130 |
| 60-Nd-161 | 0.2 с        |         | 160,954 | -42,541 | 1295,0830 |
| 61-Pm-128 | 0.8 с        |         | 127,948 | -48,195 | 1033,6010 |
| 61-Pm-129 | 1 с          |         | 128,943 | -52,946 | 1046,4230 |
| 61-Pm-130 | 2.2 с        |         | 129,940 | -55,470 | 1057,0190 |
| 61-Pm-131 | 4 с          |         | 130,936 | -59,802 | 1069,4220 |
| 61-Pm-132 | 6.3 с        | (3+)    | 131,934 | -61,711 | 1079,4030 |
| 61-Pm-133 | 15 с         | (11/2-) | 132,930 | -65,465 | 1091,2280 |
| 61-Pm-134 | 5 с          | (2+)    | 133,928 | -66,611 | 1100,4450 |
| 61-Pm-136 | 47 с         | (2+)    | 135,923 | -71,308 | 1121,2842 |
| 61-Pm-136 | 107 с        | 5(+),6- | 135,923 | -71,308 | 1121,2842 |
| 61-Pm-137 | 2.4 мин      | 11/2-   | 136,921 | -73,856 | 1131,9030 |
| 61-Pm-138 | 10 с         | 1+      | 137,919 | -75,037 | 1141,1560 |
| 61-Pm-139 | 4.15 мин     | (5/2)+  | 138,917 | -77,538 | 1151,7280 |
| 61-Pm-140 | 9.2 с        | 1+      | 139,916 | -78,430 | 1160,6919 |
| 61-Pm-141 | 20.90 мин    | 5/2+    | 140,914 | -80,475 | 1170,8078 |
| 61-Pm-142 | 40.5 с       | 1+      | 141,913 | -81,086 | 1179,4901 |
| 61-Pm-143 | 265 дн.      | 5/2+    | 142,911 | -82,970 | 1189,4460 |
| 61-Pm-144 | 363 дн.      | 5-      | 143,913 | -81,426 | 1195,9727 |
| 61-Pm-145 | 17.7 лет     | 5/2+    | 144,913 | -81,279 | 1203,8968 |
| 61-Pm-146 | 5.53 лет     | 3-      | 145,915 | -79,464 | 1210,1533 |
| 61-Pm-147 | 2.6234 лет   | 7/2+    | 146,915 | -79,052 | 1217,8131 |
| 61-Pm-148 | 5.370 дн.    | 1-      | 147,917 | -76,878 | 1223,7105 |
| 61-Pm-149 | 53.08 ч      | 7/2+    | 148,918 | -76,076 | 1230,9794 |
| 61-Pm-150 | 2.68 ч       | (1-)    | 149,921 | -73,607 | 1236,5820 |
| 61-Pm-151 | 28.40 ч      | 5/2+    | 150,921 | -73,399 | 1244,4454 |
| 61-Pm-152 | 4.12 мин     | 1+      | 151,923 | -71,268 | 1250,3856 |
| 61-Pm-153 | 5.25 мин     | 5/2-    | 152,924 | -70,688 | 1257,8769 |
| 61-Pm-154 | 2.68 мин     | (3,4)   | 153,927 | -68,421 | 1263,6812 |
| 61-Pm-155 | 41.5 с       | (5/2-)  | 154,928 | -66,977 | 1270,3086 |
| 61-Pm-156 | 26.70 с      | 4(-)    | 155,931 | -64,217 | 1275,6197 |
| 61-Pm-157 | 10.56 с      | (5/2-)  | 156,933 | -62,224 | 1281,6980 |
| 61-Pm-158 | 4.8 с        |         | 157,937 | -58,973 | 1286,5180 |
| 61-Pm-159 | 2 с          |         | 158,939 | -56,700 | 1292,3170 |
| 61-Pm-160 | 2 с          |         | 159,943 | -53,104 | 1296,7930 |
| 61-Pm-161 | 0.7 с        |         | 160,946 | -50,431 | 1302,1900 |
| 61-Pm-162 | 0.5 с        |         | 161,950 | -46,305 | 1306,1350 |
| 61-Pm-163 | 0.2 с        |         | 162,954 | -43,296 | 1311,1980 |
| 62-Sm-130 | 0.5 с        | 0+      | 129,949 | -47,851 | 1048,6170 |
| 62-Sm-131 | 1.2 с        |         | 130,946 | -50,403 | 1059,2410 |
| 62-Sm-132 | 4.0 с        | 0+      | 131,941 | -55,126 | 1072,0350 |

## Самарий

## Европий

|           |                              |              |         |         |           |
|-----------|------------------------------|--------------|---------|---------|-----------|
| 62-Sm-133 | 3.7 с                        |              | 132,939 | -57,073 | 1082,0530 |
| 62-Sm-134 | 10 с                         | 0+           | 133,934 | -61,460 | 1094,5110 |
| 62-Sm-135 | 10.3 с                       | (3/2+, 5/2+) | 134,932 | -63,016 | 1104,1380 |
| 62-Sm-136 | 47 с                         | 0+           | 135,928 | -66,788 | 1115,9820 |
| 62-Sm-137 | 45 с                         | (9/2-)       | 136,927 | -67,956 | 1125,2209 |
| 62-Sm-138 | 3.1 мин                      | 0+           | 137,924 | -71,222 | 1136,5590 |
| 62-Sm-139 | 2.57 мин                     | (1/2)+       | 138,922 | -72,375 | 1145,7832 |
| 62-Sm-140 | 14.82 мин                    | 0+           | 139,919 | -75,459 | 1156,9387 |
| 62-Sm-141 | 10.2 мин                     | 1/2+         | 140,918 | -75,946 | 1165,4967 |
| 62-Sm-142 | 72.49 мин                    | 0+           | 141,915 | -78,997 | 1176,6189 |
| 62-Sm-143 | 8.83 мин                     | 3/2+         | 142,915 | -79,528 | 1185,2209 |
| 62-Sm-144 | 3.07%                        | 0+           | 143,912 | -81,976 | 1195,7409 |
| 62-Sm-145 | 340 дн.                      | 7/2-         | 144,913 | -80,662 | 1202,4980 |
| 62-Sm-146 | 10.3e+7 лет<br>14.99%        | 0+           | 145,913 | -81,006 | 1210,9129 |
| 62-Sm-147 | 1.06e+11 лет<br>11.24% 7e+15 | 7/2-         | 146,915 | -79,276 | 1217,2549 |
| 62-Sm-148 | лет<br>13.82% 2e+15          | 0+           | 147,915 | -79,347 | 1225,3965 |
| 62-Sm-149 | лет                          | 7/2-         | 148,917 | -77,147 | 1231,2680 |
| 62-Sm-150 | 7.38%                        | 0+           | 149,917 | -77,061 | 1239,2536 |
| 62-Sm-151 | 90 лет                       | 5/2-         | 150,920 | -74,586 | 1244,8501 |
| 62-Sm-152 | 26.75%                       | 0+           | 151,920 | -74,773 | 1253,1078 |
| 62-Sm-153 | 46.284 ч<br>22.75%           | 3/2+         | 152,922 | -72,569 | 1258,9755 |
| 62-Sm-154 | 2.3e+18 лет                  | 0+           | 153,922 | -72,465 | 1266,9431 |
| 62-Sm-155 | 22.3 мин                     | 3/2-         | 154,925 | -70,201 | 1272,7503 |
| 62-Sm-156 | 9.4 ч                        | 0+           | 155,926 | -69,372 | 1279,9923 |
| 62-Sm-157 | 482 с                        | (3/2-)       | 156,928 | -66,737 | 1285,4291 |
| 62-Sm-158 | 5.30 мин                     | 0+           | 157,930 | -65,216 | 1291,9789 |
| 62-Sm-159 | 11.37 с                      | (5/2-)       | 158,933 | -62,224 | 1297,0580 |
| 62-Sm-160 | 9.6 с                        | 0+           | 159,935 | -60,417 | 1303,3220 |
| 62-Sm-161 | 4.8 с                        |              | 160,939 | -56,979 | 1307,9570 |
| 62-Sm-162 | 2 с                          | 0+           | 161,941 | -54,753 | 1313,8020 |
| 62-Sm-163 | 1 с                          |              | 162,945 | -50,897 | 1318,0170 |
| 62-Sm-164 | 0.5 с                        | 0+           | 163,948 | -48,177 | 1323,3680 |
| 62-Sm-165 | 0.2 с                        |              | 164,953 | -43,799 | 1327,0610 |
| 63-Eu-131 | 26 мс                        | (3/2)+       |         | 0,000   |           |
| 63-Eu-132 | 0.4 с                        |              | 131,954 | -42,700 | 1058,8260 |
| 63-Eu-133 | 1 с                          |              | 132,949 | -47,599 | 1071,7970 |
| 63-Eu-134 | 0.5 с                        |              | 133,946 | -50,003 | 1082,2720 |
| 63-Eu-135 | 1.5 с                        |              | 134,942 | -54,287 | 1094,6280 |
| 63-Eu-137 | 11 с                         | (11/2-)      | 136,935 | -60,351 | 1116,8340 |
| 63-Eu-138 | 12.1 с                       | (6-)         | 137,933 | -61,991 | 1126,5450 |
| 63-Eu-139 | 17.9 с                       | (11/2-)      | 138,930 | -65,355 | 1137,9810 |
| 63-Eu-140 | 1.51 с                       | 1+           | 139,928 | -66,989 | 1147,6863 |
| 63-Eu-141 | 40.7 с                       | 5/2+         | 140,925 | -69,968 | 1158,7366 |
| 63-Eu-142 | 2.34 с                       | 1+           | 141,923 | -71,352 | 1168,1920 |
| 63-Eu-143 | 2.59 мин                     | 5/2+         | 142,920 | -74,253 | 1179,1634 |
| 63-Eu-144 | 10.2 с                       | 1+           | 143,919 | -75,661 | 1188,6436 |
| 63-Eu-145 | 5.93 дн.                     | 5/2+         | 144,916 | -78,002 | 1199,0556 |
| 63-Eu-146 | 4.61 дн.                     | 4-           | 145,917 | -77,128 | 1206,2528 |



## Гадолиний

|           |                    |              |         |         |           |
|-----------|--------------------|--------------|---------|---------|-----------|
| 63-Eu-147 | 24.1 дн.           | 5/2+         | 146,917 | -77,555 | 1214,7512 |
| 63-Eu-148 | 54.5 дн.           | 5-           | 147,918 | -76,239 | 1221,5068 |
| 63-Eu-149 | 93.1 дн.           | 5/2+         | 148,918 | -76,452 | 1229,7903 |
| 63-Eu-150 | 36.9 лет           | 5(-)         | 149,920 | -74,801 | 1236,2107 |
| 63-Eu-151 | 47.81%             | 5/2+         | 150,920 | -74,663 | 1244,1444 |
| 63-Eu-152 | 13.516 лет         | 3-           | 151,922 | -72,898 | 1250,4511 |
| 63-Eu-153 | 52.19%             | 5/2+         | 152,921 | -73,377 | 1259,0014 |
| 63-Eu-154 | 8.592 лет          | 3-           | 153,923 | -71,748 | 1265,4434 |
| 63-Eu-155 | 4.7611 лет         | 5/2+         | 154,923 | -71,828 | 1273,5948 |
| 63-Eu-156 | 15.19 дн.          | 0+           | 155,925 | -70,094 | 1279,9322 |
| 63-Eu-157 | 15.18 ч            | 5/2+         | 156,925 | -69,471 | 1287,3808 |
| 63-Eu-158 | 45.9 мин           | (1-)         | 157,928 | -67,215 | 1293,1955 |
| 63-Eu-159 | 18.1 мин           | 5/2+         | 158,929 | -66,057 | 1300,1094 |
| 63-Eu-160 | 38 с               | 1(-)         | 159,932 | -63,372 | 1305,4950 |
| 63-Eu-161 | 26 с               |              | 160,934 | -61,777 | 1311,9710 |
| 63-Eu-162 | 10.6 с             |              | 161,937 | -58,647 | 1316,9130 |
| 63-Eu-163 |                    |              | 162,939 | -56,626 | 1322,9630 |
| 63-Eu-164 | 2 с                |              | 163,943 | -53,104 | 1327,5130 |
| 63-Eu-165 | 1 с                |              | 164,946 | -50,561 | 1333,0410 |
| 63-Eu-166 | 0.4 с              |              | 165,950 | -46,603 | 1337,1540 |
| 63-Eu-167 | 0.2 с              |              | 166,953 | -43,734 | 1342,3560 |
| 64-Gd-135 | 1.1 с              |              |         | 0,000   |           |
| 64-Gd-136 | 1 с                | 0+           | 135,947 | -49,304 | 1096,9330 |
| 64-Gd-137 | 7 с                |              | 136,945 | -51,558 | 1107,2590 |
| 64-Gd-138 | 5 с                | 0+           | 137,940 | -55,918 | 1119,6900 |
| 64-Gd-139 | 4.9 с              |              | 138,938 | -57,678 | 1129,5210 |
| 64-Gd-140 | 15.8 с             | 0+           | 139,934 | -61,529 | 1141,4440 |
| 64-Gd-141 | 14 с               | (1/2+)       | 140,932 | -63,146 | 1151,1320 |
| 64-Gd-142 | 70.2 с             | 0+           | 141,928 | -66,852 | 1162,9100 |
| 64-Gd-143 | 39 с               | (1/2)+       | 142,927 | -68,243 | 1172,3711 |
| 64-Gd-144 | 4.5 мин            | 0+           | 143,923 | -71,921 | 1184,1210 |
| 64-Gd-145 | 23.0 мин           | 1/2+         | 144,922 | -72,948 | 1193,2188 |
| 64-Gd-146 | 48.27 дн.          | 0+           | 145,918 | -76,098 | 1204,4406 |
| 64-Gd-147 | 38.06 ч            | 7/2-         | 146,919 | -75,368 | 1211,7815 |
| 64-Gd-148 | 74.6 лет           | 0+           | 147,918 | -76,280 | 1220,7654 |
| 64-Gd-149 | 9.28 дн.           | 7/2-         | 148,919 | -75,138 | 1227,6941 |
| 64-Gd-150 | 1.79e+6 лет        | 0+           | 149,919 | -75,772 | 1236,3997 |
| 64-Gd-151 | 124 дн.<br>0.20%   | 7/2-         | 150,920 | -74,199 | 1242,8979 |
| 64-Gd-152 | 1.08e+14 лет       | 0+           | 151,920 | -74,717 | 1251,4875 |
| 64-Gd-153 | 240.4 дн.          | 3/2-         | 152,922 | -72,893 | 1257,7346 |
| 64-Gd-154 | 2.18%              | 0+           | 153,921 | -73,716 | 1266,6294 |
| 64-Gd-155 | 14.80%             | 3/2-         | 154,923 | -72,080 | 1273,0645 |
| 64-Gd-156 | 20.47%             | 0+           | 155,922 | -72,545 | 1281,6009 |
| 64-Gd-157 | 15.65%             | 3/2-         | 156,924 | -70,834 | 1287,9609 |
| 64-Gd-158 | 24.84%             | 0+           | 157,924 | -70,700 | 1295,8983 |
| 64-Gd-159 | 18.479 ч<br>21.86% | 3/2-         | 158,926 | -68,572 | 1301,8416 |
| 64-Gd-160 | 1.3e+21 лет        | 0+           | 159,927 | -67,952 | 1309,2929 |
| 64-Gd-161 | 3.66 мин           | 5/2-         | 160,930 | -65,516 | 1314,9283 |
| 64-Gd-162 | 8.4 мин            | 0+           | 161,931 | -64,291 | 1321,7743 |
| 64-Gd-163 | 68 с               | (5/2-, 7/2+) | 162,934 | -61,488 | 1327,0430 |

## Тербий

|           |          |         |         |         |           |
|-----------|----------|---------|---------|---------|-----------|
| 64-Gd-164 | 45 с     | 0+      | 163,936 | -59,746 | 1333,3720 |
| 64-Gd-165 | 10.3 с   |         | 164,939 | -56,467 | 1338,1650 |
| 64-Gd-166 | 7 с      | 0+      | 165,942 | -54,399 | 1344,1680 |
| 64-Gd-167 | 3 с      |         | 166,946 | -50,701 | 1348,5420 |
| 64-Gd-168 | 0.3 с    | 0+      | 167,948 | -48,102 | 1354,0140 |
| 64-Gd-169 | 1 с      |         | 168,953 | -43,901 | 1357,8840 |
| 65-Tb-138 | 0.4 с    |         | 137,953 | -43,901 | 1106,8910 |
| 65-Tb-139 | 0.7 с    |         | 138,948 | -48,410 | 1119,4710 |
| 65-Tb-140 | 2.4 с    | 5       | 139,946 | -50,729 | 1129,8620 |
| 65-Tb-141 | 3.5 с    | (5/2-)  | 140,941 | -54,809 | 1142,0130 |
| 65-Tb-142 | 597 мс   | 1+      | 141,939 | -56,952 | 1152,2270 |
| 65-Tb-143 | 12 с     | (11/2-) | 142,935 | -60,780 | 1164,1260 |
| 65-Tb-144 | 1 с      | (1+)    | 143,933 | -62,848 | 1174,2650 |
| 65-Tb-145 | 20 мин   | (3/2+)  | 144,929 | -66,248 | 1185,7360 |
| 65-Tb-146 | 8 с      | 1+      | 145,927 | -67,831 | 1195,3910 |
| 65-Tb-147 | 1.7 ч    | (1/2+)  | 146,924 | -70,759 | 1206,3904 |
| 65-Tb-148 | 60 мин   | 2-      | 147,924 | -70,515 | 1214,2182 |
| 65-Tb-149 | 4.118 ч  | 1/2+    | 148,923 | -71,500 | 1223,2741 |
| 65-Tb-150 | 3.48 ч   | (2-)    | 149,924 | -71,116 | 1230,9611 |
| 65-Tb-151 | 17.609 ч | 1/2(+)  | 150,923 | -71,634 | 1239,5504 |
| 65-Tb-152 | 17.5 ч   | 2-      | 151,924 | -70,727 | 1246,7152 |
| 65-Tb-153 | 2.34 дн. | 5/2+    | 152,923 | -71,324 | 1255,3831 |
| 65-Tb-154 | 21.5 ч   | 0       | 153,925 | -70,154 | 1262,2851 |
| 65-Tb-155 | 5.32 дн. | 3/2+    | 154,924 | -71,259 | 1271,4610 |
| 65-Tb-156 | 5.35 дн. | 3-      | 155,925 | -70,101 | 1278,3741 |
| 65-Tb-157 | 71 лет   | 3/2+    | 156,924 | -70,774 | 1287,1185 |
| 65-Tb-158 | 180 лет  | 3-      | 157,925 | -69,480 | 1293,8959 |
| 65-Tb-159 | 100%     | 3/2+    | 158,925 | -69,542 | 1302,0298 |
| 65-Tb-160 | 72.3 дн. | 3-      | 159,927 | -67,846 | 1308,4049 |
| 65-Tb-161 | 6.88 дн. | 3/2+    | 160,928 | -67,472 | 1316,1016 |
| 65-Tb-162 | 7.60 мин | 1-      | 161,929 | -65,684 | 1322,3858 |
| 65-Tb-163 | 19.5 мин | 3/2+    | 162,931 | -64,605 | 1329,3774 |
| 65-Tb-164 | 3.0 мин  | (5+)    | 163,933 | -62,087 | 1334,9306 |
| 65-Tb-165 | 2.11 мин | (3/2+)  | 164,935 | -60,659 | 1341,5740 |
| 65-Tb-166 | 21 с     |         | 165,938 | -57,706 | 1346,6930 |
| 65-Tb-167 | 19.4 с   |         | 166,940 | -55,843 | 1352,9010 |
| 65-Tb-168 | 8.2 с    | (4-)    | 167,944 | -52,499 | 1357,6280 |
| 65-Tb-169 | 2 с      |         | 168,946 | -50,096 | 1363,2960 |
| 65-Tb-170 | 3 с      |         | 169,950 | -46,342 | 1367,6140 |
| 65-Tb-171 | 0.5 с    |         | 170,953 | -43,501 | 1372,8440 |
| 66-Dy-139 | 0.2 с    |         |         | 0,000   |           |
| 66-Dy-141 | 0.9 с    | (9/2-)  | 140,951 | -45,466 | 1131,8870 |
| 66-Dy-142 | 2.3 с    | 0+      | 141,946 | -50,052 | 1144,5450 |
| 66-Dy-143 | 3.9 с    |         | 142,944 | -52,322 | 1154,8860 |
| 66-Dy-144 | 9.1 с    | 0+      | 143,939 | -56,756 | 1167,3910 |
| 66-Dy-145 | 10.5 с   | (1/2+)  | 144,937 | -58,728 | 1177,4340 |
| 66-Dy-146 | 29 с     | 0+      | 145,933 | -62,671 | 1189,4486 |
| 66-Dy-147 | 40 с     | 1/2+    | 146,931 | -64,386 | 1199,2354 |
| 66-Dy-148 | 3.1 мин  | 0+      | 147,927 | -67,833 | 1210,7538 |
| 66-Dy-149 | 4.20 мин | (7/2-)  | 148,927 | -67,688 | 1218,6797 |
| 66-Dy-150 | 7.17 мин | 0+      | 149,926 | -69,322 | 1228,3851 |
| 66-Dy-151 | 17.9 мин | 7/2(-)  | 150,926 | -68,763 | 1235,8976 |

## Диспрозий

## Гольмий

|           |            |         |         |         |           |
|-----------|------------|---------|---------|---------|-----------|
| 66-Dy-152 | 2.38 ч     | 0+      | 151,925 | -70,129 | 1245,3343 |
| 66-Dy-153 | 6.4 ч      | 7/2(-)  | 152,926 | -69,153 | 1252,4304 |
| 66-Dy-154 | 3.0e+6 лет | 0+      | 153,924 | -70,400 | 1261,7488 |
| 66-Dy-155 | 9.9 ч      | 3/2-    | 154,926 | -69,164 | 1268,5841 |
| 66-Dy-156 | 0.06%      | 0+      | 155,924 | -70,534 | 1278,0254 |
| 66-Dy-157 | 8.14 ч     | 3/2-    | 156,925 | -69,432 | 1284,9947 |
| 66-Dy-158 | 0.10%      | 0+      | 157,924 | -70,417 | 1294,0503 |
| 66-Dy-159 | 144.4 дн.  | 3/2-    | 158,926 | -69,177 | 1300,8818 |
| 66-Dy-160 | 2.34%      | 0+      | 159,925 | -69,682 | 1309,4579 |
| 66-Dy-161 | 18.91%     | 5/2+    | 160,927 | -68,065 | 1315,9123 |
| 66-Dy-162 | 25.51%     | 0+      | 161,927 | -68,190 | 1324,1092 |
| 66-Dy-163 | 24.90%     | 5/2-    | 162,929 | -66,390 | 1330,3802 |
| 66-Dy-164 | 28.18%     | 0+      | 163,929 | -65,977 | 1338,0382 |
| 66-Dy-165 | 2.334 ч    | 7/2+    | 164,932 | -63,621 | 1343,7541 |
| 66-Dy-166 | 81.6 ч     | 0+      | 165,933 | -62,593 | 1350,7976 |
| 66-Dy-167 | 6.20 мин   | (1/2-)  | 166,936 | -59,943 | 1356,2181 |
| 66-Dy-168 | 8.7 мин    | 0+      | 167,937 | -58,470 | 1362,8170 |
| 66-Dy-169 | 39 с       | (5/2-)  | 168,940 | -55,607 | 1368,0250 |
| 66-Dy-170 | 30 с       | 0+      | 169,943 | -53,403 | 1373,8920 |
| 66-Dy-171 | 6 с        |         | 170,946 | -49,854 | 1378,4140 |
| 66-Dy-172 | 3 с        | 0+      | 171,949 | -47,404 | 1384,0360 |
| 66-Dy-173 | 2 с        |         | 172,953 | -43,370 | 1388,0740 |
| 67-Ho-140 | 6 мс       |         |         | 0,000   |           |
| 67-Ho-141 | 4.1 мс     | (7/2-)  |         | 0,000   |           |
| 67-Ho-142 | 0.3 с      |         | 141,960 | -37,390 | 1131,1000 |
| 67-Ho-143 | 0.3 с      |         | 142,955 | -42,206 | 1143,9870 |
| 67-Ho-144 | 0.7 с      |         | 143,952 | -45,047 | 1154,9000 |
| 67-Ho-145 | 2.4 с      |         | 144,947 | -49,481 | 1167,4050 |
| 67-Ho-146 | 3.6 с      | (10+)   | 145,944 | -52,071 | 1178,0660 |
| 67-Ho-147 | 5.8 с      | (11/2-) | 146,940 | -56,039 | 1190,1050 |
| 67-Ho-148 | 2.2 с      | 1+      | 147,937 | -58,433 | 1200,5710 |
| 67-Ho-149 | 21.1 с     | (11/2-) | 148,934 | -61,674 | 1211,8837 |
| 67-Ho-150 | 72 с       | 2-      | 149,933 | -62,082 | 1220,3630 |
| 67-Ho-151 | 35.2 с     | (11/2-) | 150,932 | -63,639 | 1229,9910 |
| 67-Ho-152 | 161.8 с    | 2-      | 151,932 | -63,583 | 1238,0066 |
| 67-Ho-153 | 2.01 мин   | 11/2-   | 152,930 | -65,023 | 1247,5181 |
| 67-Ho-154 | 11.76 мин  | 2-      | 153,931 | -64,649 | 1255,2152 |
| 67-Ho-155 | 48 мин     | 5/2+    | 154,929 | -66,062 | 1264,6998 |
| 67-Ho-156 | 56 мин     | (5+)    | 155,930 | -65,474 | 1272,1830 |
| 67-Ho-157 | 12.6 мин   | 7/2-    | 156,928 | -66,892 | 1281,6724 |
| 67-Ho-158 | 11.3 мин   | 5+      | 157,929 | -66,187 | 1289,0379 |
| 67-Ho-159 | 33.05 мин  | 7/2-    | 158,928 | -67,339 | 1298,2617 |
| 67-Ho-160 | 25.6 мин   | 5+      | 159,929 | -66,392 | 1305,3856 |
| 67-Ho-161 | 2.48 ч     | 7/2-    | 160,928 | -67,206 | 1314,2710 |
| 67-Ho-162 | 15.0 мин   | 1+      | 161,929 | -66,050 | 1321,1866 |
| 67-Ho-163 | 4570 лет   | 7/2-    | 162,929 | -66,387 | 1329,5952 |
| 67-Ho-164 | 29 мин     | 1+      | 163,930 | -64,990 | 1336,2691 |
| 67-Ho-165 | 100%       | 7/2-    | 164,930 | -64,907 | 1344,2579 |
| 67-Ho-166 | 26.763 ч   | 0-      | 165,932 | -63,080 | 1350,5015 |
| 67-Ho-167 | 3.1 ч      | 7/2-    | 166,933 | -62,293 | 1357,7858 |
| 67-Ho-168 | 2.99 мин   | 3+      | 167,935 | -60,085 | 1363,6492 |
| 67-Ho-169 | 4.7 мин    | 7/2-    | 168,937 | -58,807 | 1370,4427 |

## Эрбий

|           |              |         |         |         |           |
|-----------|--------------|---------|---------|---------|-----------|
| 67-Но-170 | 2.76 мин     | (6+)    | 169,940 | -56,248 | 1375,9555 |
| 67-Но-171 | 53 с         | (7/2-)  | 170,941 | -54,529 | 1382,3070 |
| 67-Но-172 | 25 с         |         | 171,945 | -51,400 | 1387,2500 |
| 67-Но-173 | 10 с         |         | 172,947 | -49,099 | 1393,0200 |
| 67-Но-174 | 8 с          |         | 173,951 | -45,503 | 1397,4960 |
| 67-Но-175 | 5 с          |         | 174,954 | -42,802 | 1402,8660 |
| 68-Ег-144 | 0.4 с        | 0+      | 143,961 | -36,710 | 1145,7810 |
| 68-Ег-145 | 0.9 с        | (11/2-) | 144,957 | -39,626 | 1156,7680 |
| 68-Ег-146 | 1.7 с        | 0+      | 145,952 | -44,600 | 1169,8130 |
| 68-Ег-147 | 2.5 с        | (11/2-) | 146,949 | -47,217 | 1180,5020 |
| 68-Ег-148 | 4.6 с        | 0+      | 147,944 | -51,754 | 1193,1100 |
| 68-Ег-149 | 4 с          | (1/2+)  | 148,942 | -53,864 | 1203,2910 |
| 68-Ег-150 | 18.5 с       | 0+      | 149,938 | -57,974 | 1215,4720 |
| 68-Ег-151 | 23.5 с       | (7/2-)  | 150,937 | -58,256 | 1223,8250 |
| 68-Ег-152 | 10.3 с       | 0+      | 151,935 | -60,474 | 1234,1151 |
| 68-Ег-153 | 37.1 с       | (7/2-)  | 152,935 | -60,460 | 1242,1727 |
| 68-Ег-154 | 3.73 мин     | 0+      | 153,933 | -62,618 | 1252,4012 |
| 68-Ег-155 | 5.3 мин      | 7/2-    | 154,933 | -62,220 | 1260,0748 |
| 68-Ег-156 | 19.5 мин     | 0+      | 155,931 | -64,259 | 1270,1854 |
| 68-Ег-157 | 18.65 мин    | 3/2-    | 156,932 | -63,392 | 1277,3900 |
| 68-Ег-158 | 2.29 ч       | 0+      | 157,930 | -65,287 | 1287,3560 |
| 68-Ег-159 | 36 мин       | 3/2-    | 158,931 | -64,570 | 1294,7108 |
| 68-Ег-160 | 28.58 ч      | 0+      | 159,929 | -66,063 | 1304,2742 |
| 68-Ег-161 | 3.21 ч       | 3/2-    | 160,930 | -65,203 | 1311,4863 |
| 68-Ег-162 | 0.139%       | 0+      | 161,929 | -66,346 | 1320,7000 |
| 68-Ег-163 | 75.0 мин     | 5/2-    | 162,930 | -65,177 | 1327,6029 |
| 68-Ег-164 | 1.601%       | 0+      | 163,929 | -65,953 | 1336,4495 |
| 68-Ег-165 | 10.36 ч      | 5/2-    | 164,931 | -64,531 | 1343,0995 |
| 68-Ег-166 | 33.503%      | 0+      | 165,930 | -64,934 | 1351,5740 |
| 68-Ег-167 | 22.869%      | 7/2+    | 166,932 | -63,299 | 1358,0101 |
| 68-Ег-168 | 26.978%      | 0+      | 167,932 | -62,999 | 1365,7812 |
| 68-Ег-169 | 9.40 дн.     | 1/2-    | 168,935 | -60,931 | 1371,7843 |
|           | 14.910%      |         |         |         |           |
| 68-Ег-170 | 3.2e+17 лет  | 0+      | 169,935 | -60,118 | 1379,0431 |
| 68-Ег-171 | 7.516 ч      | 5/2-    | 170,938 | -57,729 | 1384,7247 |
| 68-Ег-172 | 49.3 ч       | 0+      | 171,939 | -56,493 | 1391,5606 |
| 68-Ег-173 | 1.4 мин      | (7/2-)  | 172,942 | -53,654 | 1396,7930 |
| 68-Ег-174 | 3.2 мин      | 0+      | 173,944 | -51,847 | 1403,0570 |
| 68-Ег-175 | 1.2 мин      | (9/2+)  | 174,948 | -48,503 | 1407,7840 |
| 68-Ег-176 | 20 с         | 0+      | 175,950 | -46,305 | 1413,6570 |
| 68-Ег-177 | 3 с          |         | 176,954 | -42,504 | 1417,9280 |
| 69-Тм-145 | 3.5 мкс      | (11/2-) |         | 0,000   |           |
| 69-Тм-146 | 62 мс +19-14 | (5-,6-) | 145,966 | -31,210 | 1155,6410 |
| 69-Тм-147 | 0.559 с      | (11/2-) | 146,961 | -36,253 | 1168,7550 |
| 69-Тм-149 | 0.9 с        | (11/2-) | 148,953 | -44,106 | 1192,7510 |
| 69-Тм-150 | 2.2 с        | (6-)    | 149,950 | -46,882 | 1203,5980 |
| 69-Тм-151 | 4.17 с       | (11/2-) | 150,945 | -50,828 | 1215,6160 |
| 69-Тм-152 | 8.0 с        | (2-)    | 151,944 | -51,884 | 1224,7430 |
| 69-Тм-153 | 1.48 с       | (11/2-) | 152,942 | -54,001 | 1234,9309 |
| 69-Тм-154 | 8.1 с        | (2-)    | 153,941 | -54,564 | 1243,5650 |
| 69-Тм-155 | 21.6 с       | (11/2-) | 154,939 | -56,643 | 1253,7153 |
| 69-Тм-156 | 83.8 с       | 2-      | 155,939 | -56,815 | 1261,9587 |

## Тулий

## Иттербий

|           |                     |        |         |         |           |
|-----------|---------------------|--------|---------|---------|-----------|
| 69-Tm-157 | 3.63 мин            | 1/2+   | 156,937 | -58,911 | 1272,1266 |
| 69-Tm-158 | 3.98 мин            | 2-     | 157,937 | -58,687 | 1279,9740 |
| 69-Tm-159 | 9.13 мин            | 5/2+   | 158,935 | -60,725 | 1290,0830 |
| 69-Tm-160 | 9.4 мин             | 1-     | 159,935 | -60,463 | 1297,8918 |
| 69-Tm-161 | 33 мин              | 7/2+   | 160,933 | -62,039 | 1307,5399 |
| 69-Tm-162 | 21.70 мин           | 1-     | 161,934 | -61,506 | 1315,0783 |
| 69-Tm-163 | 1.810 ч             | 1/2+   | 162,933 | -62,738 | 1324,3815 |
| 69-Tm-164 | 2.0 мин             | 1+     | 163,933 | -61,990 | 1331,7046 |
| 69-Tm-164 | 5.1 мин             | 6-     | 163,933 | -61,990 | 1331,7046 |
| 69-Tm-165 | 30.06 ч             | 1/2+   | 164,932 | -62,939 | 1340,7246 |
| 69-Tm-166 | 7.70 ч              | 2+     | 165,934 | -61,895 | 1347,7521 |
| 69-Tm-167 | 9.25 дн.            | 1/2+   | 166,933 | -62,551 | 1356,4794 |
| 69-Tm-168 | 93.1 дн.            | 3+     | 167,934 | -61,320 | 1363,3197 |
| 69-Tm-169 | 100%                | 1/2+   | 168,934 | -61,282 | 1371,3531 |
| 69-Tm-170 | 128.6 дн.           | 1-     | 169,936 | -59,804 | 1377,9464 |
| 69-Tm-171 | 1.92 лет            | 1/2+   | 170,936 | -59,219 | 1385,4328 |
| 69-Tm-172 | 63.6 ч              | 2-     | 171,938 | -57,384 | 1391,6688 |
| 69-Tm-173 | 8.24 ч              | (1/2+) | 172,940 | -56,262 | 1398,6184 |
| 69-Tm-174 | 5.4 мин             | (4-)   | 173,942 | -53,873 | 1404,3011 |
| 69-Tm-175 | 15.2 мин            | 1/2+   | 174,944 | -52,319 | 1410,8184 |
| 69-Tm-176 | 1.9 мин             | (4+)   | 175,947 | -49,377 | 1415,9476 |
| 69-Tm-177 | 85 с +10-15         | (1/2+) | 176,949 | -47,469 | 1422,1110 |
| 69-Tm-178 | 30 с                |        | 177,953 | -44,116 | 1426,8290 |
| 69-Tm-179 | 20 с                |        | 178,955 | -41,601 | 1432,3850 |
| 70-Yb-148 | 0.25 с              | 0+     | 147,967 | -30,963 | 1170,7540 |
| 70-Yb-149 | 0.6 с               |        | 148,963 | -34,018 | 1181,8810 |
| 70-Yb-150 | 0.7 с               | 0+     | 149,958 | -39,132 | 1195,0660 |
| 70-Yb-151 | 1.6 с               | (1/2+) | 150,955 | -41,685 | 1205,6900 |
| 70-Yb-152 | 3.04 с              | 0+     | 151,950 | -46,419 | 1218,4960 |
| 70-Yb-153 | 4.2 с               | 7/2-   | 152,949 | -47,311 | 1227,4580 |
| 70-Yb-154 | 0.409 с             | 0+     | 153,946 | -50,075 | 1238,2940 |
| 70-Yb-155 | 1.800 с             | (7/2-) | 154,946 | -50,494 | 1246,7840 |
| 70-Yb-156 | 26.1 с              | 0+     | 155,943 | -53,238 | 1257,5992 |
| 70-Yb-157 | 38.6 с              | 7/2-   | 156,943 | -53,413 | 1265,8461 |
| 70-Yb-158 | 1.49 мин            | 0+     | 157,940 | -56,022 | 1276,5263 |
| 70-Yb-159 | 1.58 мин            | 5/2(-) | 158,940 | -55,746 | 1284,3220 |
| 70-Yb-160 | 4.8 мин             | 0+     | 159,938 | -58,163 | 1294,8090 |
| 70-Yb-161 | 4.2 мин             | 3/2-   | 160,938 | -57,889 | 1302,6080 |
| 70-Yb-162 | 18.87 мин           | 0+     | 161,936 | -59,848 | 1312,6380 |
| 70-Yb-163 | 11.05 мин           | 3/2-   | 162,936 | -59,368 | 1320,2292 |
| 70-Yb-164 | 75.8 мин            | 0+     | 163,935 | -60,994 | 1329,9260 |
| 70-Yb-165 | 9.9 мин             | 5/2-   | 164,935 | -60,177 | 1337,1803 |
| 70-Yb-166 | 56.7 ч              | 0+     | 165,934 | -61,591 | 1346,6656 |
| 70-Yb-167 | 17.5 мин            | 5/2-   | 166,935 | -60,597 | 1353,7428 |
| 70-Yb-168 | 0.13%               | 0+     | 167,934 | -61,577 | 1362,7944 |
| 70-Yb-169 | 32.026 дн.<br>3.04% | 7/2+   | 168,935 | -60,373 | 1369,6616 |
| 70-Yb-170 | 1.66+17 лет         | 0+     | 169,935 | -60,772 | 1378,1321 |
| 70-Yb-171 | 14.28%              | 1/2-   | 170,936 | -59,315 | 1384,7469 |
| 70-Yb-172 | 21.83%              | 0+     | 171,936 | -59,264 | 1392,7666 |
| 70-Yb-173 | 16.13%              | 5/2-   | 172,938 | -57,560 | 1399,1341 |
| 70-Yb-174 | 31.83%              | 0+     | 173,939 | -56,953 | 1406,5987 |

|           |              |           |             |         |           |           |
|-----------|--------------|-----------|-------------|---------|-----------|-----------|
| Лютеций   | 70-Yb-175    | 4.185 дн. | 7/2-        | 174,941 | -54,704   | 1412,4211 |
|           | 70-Yb-176    | 12.76%    | 0+          | 175,943 | -53,497   | 1419,2853 |
|           | 70-Yb-177    | 1.911 ч   | (9/2+)      | 176,945 | -50,993   | 1424,8521 |
|           | 70-Yb-178    | 74 мин    | 0+          | 177,947 | -49,701   | 1431,6321 |
|           | 70-Yb-179    | 8.0 мин   | (1/2-)      | 178,950 | -46,416   | 1436,4180 |
|           | 70-Yb-180    | 2.4 мин   | 0+          | 179,952 | -44,404   | 1442,4780 |
|           | 70-Yb-181    | 1 мин     |             | 180,956 | -40,846   | 1446,9910 |
|           | 71-Lu-150    | 35 мс     |             | 149,973 | -25,460   | 1180,6110 |
|           | 71-Lu-151    | 80 мс     | (11/2-)     | 150,967 | -30,602   | 1193,8250 |
|           | 71-Lu-152    | 0.7 с     | (5-,6-)     | 151,964 | -33,897   | 1205,1910 |
|           | 71-Lu-153    | 0.9 с     | 11/2-       | 152,959 | -38,480   | 1217,8450 |
|           | 71-Lu-154    | 2 с       | (2-)        | 153,957 | -39,961   | 1227,3980 |
|           | 71-Lu-155    | 70 мс     | (11/2-)     | 154,954 | -42,632   | 1238,1400 |
|           | 71-Lu-157    | 6.8 с     | (1/2+,3/2+) | 156,950 | -46,480   | 1258,1307 |
|           | 71-Lu-158    | 10.6 с    |             | 157,949 | -47,349   | 1267,0700 |
|           | 71-Lu-159    | 12.1 с    |             | 158,947 | -49,728   | 1277,5209 |
|           | 71-Lu-160    | 36.1 с    |             | 159,946 | -50,283   | 1286,1470 |
|           | 71-Lu-161    | 72 с      | (5/2+)      | 160,944 | -52,589   | 1296,5250 |
|           | 71-Lu-162    | 1.37 мин  | (1-)        | 161,943 | -52,888   | 1304,8960 |
|           | 71-Lu-163    | 3.97 мин  | 1/2(+)      | 162,941 | -54,768   | 1314,8468 |
|           | 71-Lu-164    | 3.14 мин  |             | 163,941 | -54,758   | 1322,9070 |
|           | 71-Lu-165    | 10.74 мин | 1/2+        | 164,940 | -56,257   | 1332,4779 |
|           | 71-Lu-166    | 2.65 мин  | (6-)        | 165,940 | -56,111   | 1340,4032 |
|           | 71-Lu-167    | 51.5 мин  | 7/2+        | 166,938 | -57,467   | 1349,8304 |
|           | 71-Lu-168    | 5.5 мин   | (6-)        | 167,939 | -57,102   | 1357,5370 |
|           | 71-Lu-169    | 34.06 ч   | 7/2+        | 168,938 | -58,080   | 1366,5863 |
|           | 71-Lu-170    | 2.012 дн. | 0+          | 169,938 | -57,313   | 1373,8906 |
|           | 71-Lu-171    | 8.24 дн.  | 7/2+        | 170,938 | -57,837   | 1382,4857 |
|           | 71-Lu-172    | 6.70 дн.  | 4-          | 171,939 | -56,745   | 1389,4650 |
|           | 71-Lu-173    | 1.37 лет  | 7/2+        | 172,939 | -56,889   | 1397,6810 |
|           | 71-Lu-174    | 3.31 лет  | (1-)        | 173,940 | -55,579   | 1404,4420 |
|           | 71-Lu-175    | 97.41%    | 7/2+        | 174,941 | -55,174   | 1412,1087 |
|           |              | 2.59%     |             |         |           |           |
| 71-Lu-176 | 3.73e+10 лет | 7-        | 175,943     | -53,391 | 1418,3967 |           |
| 71-Lu-177 | 6.734 дн.    | 7/2+      | 176,944     | -52,392 | 1425,4689 |           |
| 71-Lu-178 | 28.4 мин     | 1(+)      | 177,946     | -50,346 | 1431,4943 |           |
| 71-Lu-179 | 4.59 ч       | 7/2(+)    | 178,947     | -49,067 | 1438,2869 |           |
| 71-Lu-180 | 5.7 мин      | (3+)      | 179,950     | -46,687 | 1443,9775 |           |
| 71-Lu-181 | 3.5 мин      | (7/2+)    | 180,952     | -44,740 | 1450,1020 |           |
| 71-Lu-182 | 2.0 мин      | (0,1,2)   | 181,955     | -41,722 | 1455,1550 |           |
| 71-Lu-183 | 58 с         | (7/2+)    | 182,958     | -39,523 | 1461,0280 |           |
| 71-Lu-184 | 20 с         | (3+)      | 183,961     | -36,170 | 1465,7460 |           |
| 72-Hf-154 | 2 с          | 0+        | 153,964     | -33,301 | 1219,9550 |           |
| 72-Hf-155 | 0.89 с       |           | 154,963     | -34,689 | 1229,4140 |           |
| 72-Hf-156 | 23 мс        | 0+        | 155,959     | -37,961 | 1240,7580 |           |
| 72-Hf-157 | 115 мс       | 7/2-      | 156,958     | -39,004 | 1249,8730 |           |
| 72-Hf-158 | 2.85 с       | 0+        | 157,955     | -42,246 | 1261,1860 |           |
| 72-Hf-159 | 5.2 с        |           | 158,954     | -42,846 | 1269,8570 |           |
| 72-Hf-160 | 13.6 с       | 0+        | 159,951     | -45,910 | 1280,9922 |           |
| 72-Hf-161 | 18.7 с       |           | 160,950     | -46,267 | 1289,4200 |           |
| 72-Hf-162 | 39.4 с       | 0+        | 161,947     | -49,180 | 1300,4050 |           |
| 72-Hf-163 | 40.0 с       |           | 162,947     | -49,316 | 1308,6120 |           |
| Гафний    |              |           |             |         |           |           |
|           |              |           |             |         |           |           |
|           |              |           |             |         |           |           |
|           |              |           |             |         |           |           |
|           |              |           |             |         |           |           |
|           |              |           |             |         |           |           |
|           |              |           |             |         |           |           |
|           |              |           |             |         |           |           |
|           |              |           |             |         |           |           |
|           |              |           |             |         |           |           |
|           |              |           |             |         |           |           |
|           |              |           |             |         |           |           |

## Тантал

|           |             |         |         |         |           |
|-----------|-------------|---------|---------|---------|-----------|
| 72-Нf-164 | 111 с       | 0+      | 163,944 | -51,770 | 1319,1380 |
| 72-Нf-165 | 76 с        | (5/2-)  | 164,945 | -51,661 | 1327,1000 |
| 72-Нf-166 | 6.77 мин    | 0+      | 165,942 | -53,794 | 1337,3040 |
| 72-Нf-167 | 2.05 мин    | (5/2-)  | 166,943 | -53,468 | 1345,0490 |
| 72-Нf-168 | 25.95 мин   | 0+      | 167,941 | -55,303 | 1354,9560 |
| 72-Нf-169 | 3.24 мин    | (5/2-)  | 168,941 | -54,810 | 1362,5345 |
| 72-Нf-170 | 16.01 ч     | 0+      | 169,940 | -56,216 | 1372,0110 |
| 72-Нf-171 | 12.1 ч      | (7/2+)  | 170,940 | -55,433 | 1379,3000 |
| 72-Нf-172 | 1.87 лет    | 0+      | 171,939 | -56,395 | 1388,3326 |
| 72-Нf-173 | 23.6 ч      | 1/2-    | 172,941 | -55,284 | 1395,2940 |
|           | 0.16%       |         |         |         |           |
| 72-Нf-174 | 2.0e+15 лет | 0+      | 173,940 | -55,852 | 1403,9329 |
| 72-Нf-175 | 70 дн.      | 5/2-    | 174,942 | -54,490 | 1410,6417 |
| 72-Нf-176 | 5.26%       | 0+      | 175,941 | -54,584 | 1418,8072 |
| 72-Нf-177 | 18.60%      | 7/2-    | 176,943 | -52,890 | 1425,1849 |
| 72-Нf-178 | 27.28%      | 0+      | 177,944 | -52,445 | 1432,8112 |
| 72-Нf-179 | 13.62%      | 9/2+    | 178,946 | -50,473 | 1438,9103 |
| 72-Нf-180 | 35.08%      | 0+      | 179,947 | -49,790 | 1446,2982 |
| 72-Нf-181 | 42.39 дн.   | 1/2-    | 180,949 | -47,414 | 1451,9938 |
| 72-Нf-182 | 9e+6 лет    | 0+      | 181,951 | -46,060 | 1458,7110 |
| 72-Нf-183 | 1.067 ч     | (3/2-)  | 182,954 | -43,286 | 1464,0082 |
| 72-Нf-184 | 4.12 ч      | 0+      | 183,955 | -41,500 | 1470,2940 |
| 72-Нf-185 | 3.5 мин     |         | 184,959 | -38,396 | 1475,2610 |
| 72-Нf-186 | 2.6 мин     | 0+      | 185,961 | -36,403 | 1481,3390 |
| 73-Та-155 | 12 мкс +4-3 | (11/2-) |         | 0,000   |           |
| 73-Та-156 | 144 мс      | (2-)    | 155,972 | -26,371 | 1228,3860 |
| 73-Та-157 | 10.1 мс     | (1/2+)  | 156,968 | -29,673 | 1239,7590 |
| 73-Та-158 | 72 мс       | (2-)    | 157,966 | -31,328 | 1249,4850 |
| 73-Та-159 | 0.544 с     | (1/2+)  | 158,963 | -34,545 | 1260,7740 |
| 73-Та-160 | 1.55 с      |         | 159,961 | -35,995 | 1270,2950 |
| 73-Та-161 | 4.9 с       |         | 160,958 | -38,775 | 1281,1465 |
| 73-Та-162 | 3.57 с      |         | 161,957 | -39,917 | 1290,3590 |
| 73-Та-163 | 10.6 с      |         | 162,954 | -42,554 | 1301,0676 |
| 73-Та-164 | 14.2 с      | (3+)    | 163,954 | -43,249 | 1309,8340 |
| 73-Та-165 | 31.0 с      |         | 164,951 | -45,813 | 1320,4700 |
| 73-Та-166 | 34.4 с      | (2)+    | 165,950 | -46,137 | 1328,8650 |
| 73-Та-167 | 80 с        | (3/2+)  | 166,948 | -48,463 | 1339,2620 |
| 73-Та-168 | 2.0 мин     | (2-,3+) | 167,948 | -48,636 | 1347,5070 |
| 73-Та-169 | 4.9 мин     | (5/2-)  | 168,946 | -50,375 | 1357,3170 |
| 73-Та-170 | 6.76 мин    | (3+)    | 169,946 | -50,217 | 1365,2300 |
| 73-Та-171 | 23.3 мин    | (5/2-)  | 170,944 | -51,735 | 1374,8200 |
| 73-Та-172 | 36.8 мин    | (3+)    | 171,945 | -51,475 | 1382,6302 |
| 73-Та-173 | 3.14 ч      | 5/2-    | 172,944 | -52,594 | 1391,8210 |
| 73-Та-174 | 1.14 ч      | 3+      | 173,944 | -52,007 | 1399,3056 |
| 73-Та-175 | 10.5 ч      | 7/2+    | 174,944 | -52,490 | 1407,8590 |
| 73-Та-176 | 8.09 ч      | (1)-    | 175,945 | -51,474 | 1414,9149 |
| 73-Та-177 | 56.56 ч     | 7/2+    | 176,944 | -51,724 | 1423,2365 |
| 73-Та-178 | 9.31 мин    | 1+      | 177,946 | -50,533 | 1430,1169 |
| 73-Та-178 | 2.36 ч      | (7)-    | 177,946 | -50,533 | 1430,1169 |
| 73-Та-179 | 1.82 лет    | 7/2+    | 178,946 | -50,362 | 1438,0170 |
| 73-Та-180 | 8.152 ч     | 1+      | 179,947 | -48,935 | 1444,6617 |

|          |                             |            |         |         |           |           |
|----------|-----------------------------|------------|---------|---------|-----------|-----------|
|          | 73-Ta-181                   | 99.988%    | 7/2+    | 180,948 | -48,441   | 1452,2387 |
|          | 73-Ta-182                   | 114.43 дн. | 3-      | 181,950 | -46,433   | 1458,3017 |
|          | 73-Ta-183                   | 5.1 дн.    | 7/2+    | 182,951 | -45,296   | 1465,2359 |
|          | 73-Ta-184                   | 8.7 ч      | (5-)    | 183,954 | -42,840   | 1470,8516 |
|          | 73-Ta-185                   | 49.4 мин   | (7/2+)  | 184,956 | -41,396   | 1477,4794 |
|          | 73-Ta-186                   | 10.5 мин   | (2,-3-) | 185,959 | -38,610   | 1482,7646 |
|          | 73-Ta-187                   | 2 мин      |         | 186,960 | -36,878   | 1489,1030 |
|          | 73-Ta-188                   | 20 с       |         | 187,964 | -33,804   | 1494,1010 |
| Вольфрам | 74-W-158                    | 0.9 мс     | 0+      | 157,974 | -24,276   | 1241,6510 |
|          | 74-W-159                    | 8.2 мс     |         | 158,972 | -25,821   | 1251,2670 |
|          | 74-W-160                    | 91 мс      | 0+      | 159,968 | -29,464   | 1262,9820 |
|          | 74-W-161                    | 409 мс     |         | 160,967 | -30,656   | 1272,2450 |
|          | 74-W-162                    | 1.36 с     | 0+      | 161,963 | -34,147   | 1283,8070 |
|          | 74-W-163                    | 2.8 с      |         | 162,963 | -34,901   | 1292,6330 |
|          | 74-W-164                    | 6.0 с      | 0+      | 163,959 | -38,206   | 1304,0091 |
|          | 74-W-165                    | 5.1 с      | (5/2-)  | 164,958 | -38,810   | 1312,6839 |
|          | 74-W-166                    | 18.8 с     | 0+      | 165,955 | -41,899   | 1323,8441 |
|          | 74-W-167                    | 19.9 с     | (+)     | 166,955 | -42,223   | 1332,2400 |
|          | 74-W-168                    | 53 с       | 0+      | 167,952 | -44,839   | 1342,9270 |
|          | 74-W-169                    | 80 с       | (5/2-)  | 168,952 | -44,936   | 1351,0960 |
|          | 74-W-170                    | 2.42 мин   | 0+      | 169,949 | -47,236   | 1361,4670 |
|          | 74-W-171                    | 2.38 мин   | (5/2-)  | 170,949 | -47,078   | 1369,3800 |
|          | 74-W-172                    | 6.6 мин    | 0+      | 171,947 | -48,975   | 1379,3480 |
|          | 74-W-173                    | 7.6 мин    | 5/2-    | 172,948 | -48,594   | 1387,0390 |
|          | 74-W-174                    | 33.2 мин   | 0+      | 173,946 | -50,152   | 1396,6680 |
|          | 74-W-175                    | 35.2 мин   | (1/2-)  | 174,947 | -49,583   | 1404,1710 |
|          | 74-W-176                    | 2.5 ч      | 0+      | 175,946 | -50,683   | 1413,3410 |
|          | 74-W-177                    | 135 мин    | (1/2-)  | 176,947 | -49,723   | 1420,4530 |
| 74-W-178 | 21.6 дн.                    | 0+         | 177,946 | -50,442 | 1429,2432 |           |
| 74-W-179 | 37.05 мин<br>0.12%          | (7/2-)     | 178,947 | -49,302 | 1436,1750 |           |
| 74-W-180 | 7.4e+16 лет                 | 0+         | 179,947 | -49,643 | 1444,5872 |           |
| 74-W-181 | 121.2 дн.<br>26.50%         | 9/2+       | 180,948 | -48,253 | 1451,2685 |           |
| 74-W-182 | 8.3e+18 лет<br>14.31%       | 0+         | 181,948 | -48,246 | 1459,3328 |           |
| 74-W-183 | 1.9e+18 лет<br>30.64% 4e+18 | 1/2-       | 182,950 | -46,366 | 1465,5235 |           |
| 74-W-184 | лет                         | 0+         | 183,951 | -45,706 | 1472,9353 |           |
| 74-W-185 | 75.1 дн.<br>28.43%          | 3/2-       | 184,953 | -43,388 | 1478,6890 |           |
| 74-W-186 | 6.5e+18 лет                 | 0+         | 185,954 | -42,511 | 1485,8832 |           |
| 74-W-187 | 23.72 ч                     | 3/2-       | 186,957 | -39,907 | 1491,3499 |           |
| 74-W-188 | 69.4 дн.                    | 0+         | 187,958 | -38,669 | 1498,1837 |           |
| 74-W-189 | 10.8 мин                    | (3/2-)     | 188,962 | -35,479 | 1503,0644 |           |
| 74-W-190 | 30.0 мин                    | 0+         | 189,963 | -34,298 | 1509,9552 |           |
| Рений    | 75-Re-160                   | 0.79 мс    |         | 159,981 | -17,247   | 1249,9820 |
|          | 75-Re-161                   | 0.37 мс    | (1/2+)  | 160,978 | -20,809   | 1261,6150 |
|          | 75-Re-162                   | 107 мс     | (2-)    | 161,976 | -22,629   | 1271,5060 |
|          | 75-Re-163                   | 390 мс     | (1/2+)  | 162,972 | -26,112   | 1283,0620 |



|           |           |                      |             |         |           |           |
|-----------|-----------|----------------------|-------------|---------|-----------|-----------|
|           | 75-Re-164 | 0.38 с               |             | 163,970 | -27,647   | 1292,6680 |
|           | 75-Re-165 | 1 с                  | (1/2+)      | 164,967 | -30,692   | 1303,7842 |
|           | 75-Re-166 | 2.8 с                |             | 165,966 | -31,855   | 1313,0180 |
|           | 75-Re-167 | 5.9 с                | (9/2-)      | 166,963 | -34,872   | 1324,1060 |
|           | 75-Re-168 | 4.4 с                | (5+,6+,7+)  | 167,962 | -35,761   | 1333,0670 |
|           | 75-Re-169 | 8.1 с                |             | 168,959 | -38,350   | 1343,7270 |
|           | 75-Re-170 | 9.2 с                | (5+)        | 169,958 | -38,971   | 1352,4190 |
|           | 75-Re-171 | 15.2 с               | (9/2-)      | 170,956 | -41,408   | 1362,9270 |
|           | 75-Re-173 | 1.98 мин             | (5/2-)      | 172,953 | -43,722   | 1381,3840 |
|           | 75-Re-174 | 2.40 мин             |             | 173,953 | -43,676   | 1389,4090 |
|           | 75-Re-175 | 5.89 мин             | (5/2-)      | 174,951 | -45,277   | 1399,0820 |
|           | 75-Re-176 | 5.3 мин              | 3+          | 175,952 | -45,112   | 1406,9890 |
|           | 75-Re-177 | 14 мин               | (5/2-)      | 176,950 | -46,323   | 1416,2710 |
|           | 75-Re-178 | 13.2 мин             | (3+)        | 177,951 | -45,782   | 1423,8009 |
|           | 75-Re-179 | 19.5 мин             | (5/2)+      | 178,950 | -46,592   | 1432,6826 |
|           | 75-Re-180 | 2.44 мин             | (1-)        | 179,951 | -45,841   | 1440,0026 |
|           | 75-Re-181 | 19.9 ч               | 5/2+        | 180,950 | -46,515   | 1448,7474 |
|           | 75-Re-182 | 64.0 ч               | 7+          | 181,951 | -45,446   | 1455,7505 |
|           | 75-Re-183 | 70.0 дн.             | 5/2+        | 182,951 | -45,810   | 1464,1852 |
|           | 75-Re-184 | 38.0 дн.             | 3(-)        | 183,953 | -44,223   | 1470,6702 |
|           | 75-Re-185 | 37.40%               | 5/2+        | 184,953 | -43,821   | 1478,3396 |
|           | 75-Re-186 | 3.7183 дн.<br>62.60% | 1-          | 185,955 | -41,930   | 1484,5193 |
|           | 75-Re-187 | 4.35e+10 лет         | 5/2+        | 186,956 | -41,218   | 1491,8787 |
|           | 75-Re-188 | 17.005 ч             | 1-          | 187,958 | -39,018   | 1497,7503 |
|           | 75-Re-189 | 24.3 ч               | 5/2+        | 188,959 | -37,979   | 1504,7820 |
|           | 75-Re-190 | 3.1 мин              | (2-)        | 189,962 | -35,568   | 1510,4429 |
|           | 75-Re-191 | 9.8 мин              | (3/2+,1/2+) | 190,963 | -34,350   | 1517,2963 |
|           | 75-Re-192 | 16 с                 |             | 191,966 | -31,708   | 1522,7260 |
| Осмиий    | 76-Os-162 | 1.7 мс               | 0+          | 161,984 | -15,072   | 1263,1680 |
|           | 76-Os-163 | 5.5 мс               |             | 162,982 | -16,722   | 1272,8890 |
|           | 76-Os-164 | 27 мс                | 0+          | 163,978 | -20,561   | 1284,7990 |
|           | 76-Os-165 | 71 мс                | (7/2-)      | 164,976 | -21,914   | 1294,2230 |
|           | 76-Os-166 | 220 мс               | 0+          | 165,973 | -25,592   | 1305,9720 |
|           | 76-Os-167 | 0.81 с               |             | 166,972 | -26,497   | 1314,9490 |
|           | 76-Os-168 | 2.1 с                | 0+          | 167,968 | -29,963   | 1326,4868 |
|           | 76-Os-169 | 3.6 с                |             | 168,967 | -30,668   | 1335,2630 |
|           | 76-Os-170 | 7.3 с                | 0+          | 169,964 | -33,935   | 1346,6006 |
|           | 76-Os-171 | 8.3 с                | (5/2-)      | 170,963 | -34,428   | 1355,1660 |
|           | 76-Os-172 | 19.2 с               | 0+          | 171,960 | -37,187   | 1365,9960 |
|           | 76-Os-173 | 22.4 с               | (5/2-)      | 172,960 | -37,454   | 1374,3340 |
|           | 76-Os-174 | 44 с                 | 0+          | 173,957 | -39,939   | 1384,8900 |
|           | 76-Os-175 | 1.4 мин              | (5/2-)      | 174,957 | -39,980   | 1393,0030 |
|           | 76-Os-176 | 3.6 мин              | 0+          | 175,955 | -41,964   | 1403,0580 |
|           | 76-Os-177 | 2.8 мин              | (1/2-)      | 176,955 | -41,875   | 1411,0410 |
|           | 76-Os-178 | 5.0 мин              | 0+          | 177,953 | -43,456   | 1420,6924 |
|           | 76-Os-179 | 6.5 мин              | (1/2-)      | 178,954 | -42,894   | 1428,2020 |
|           | 76-Os-180 | 21.5 мин             | 0+          | 179,952 | -44,385   | 1437,7640 |
|           | 76-Os-181 | 105 мин              | 1/2-        | 180,953 | -43,525   | 1444,9751 |
| 76-Os-182 | 22.10 ч   | 0+                   | 181,952     | -44,538 | 1454,0601 |           |
| 76-Os-183 | 13.0 ч    | 9/2+                 | 182,953     | -43,678 | 1461,2710 |           |
| 76-Os-184 | 0.02%     | 0+                   | 183,952     | -44,255 | 1469,9191 |           |

|           |            |                                  |         |         |           |           |
|-----------|------------|----------------------------------|---------|---------|-----------|-----------|
|           | 76-Os-185  | 5.6e+13 лет<br>93.6 дн.<br>1.59% | 1/2-    | 184,954 | -42,809   | 1476,5445 |
|           | 76-Os-186  | 2.0e+15 лет                      | 0+      | 185,954 | -42,999   | 1484,8065 |
|           | 76-Os-187  | 1.6%                             | 1/2-    | 186,956 | -41,221   | 1491,0990 |
|           | 76-Os-188  | 13.29%                           | 0+      | 187,956 | -41,139   | 1499,0883 |
|           | 76-Os-189  | 16.21%                           | 3/2-    | 188,958 | -38,988   | 1505,0090 |
|           | 76-Os-190  | 26.36%                           | 0+      | 189,958 | -38,708   | 1512,8005 |
|           | 76-Os-191  | 15.4 дн.                         | 9/2-    | 190,961 | -36,395   | 1518,5592 |
|           | 76-Os-192  | 40.93%                           | 0+      | 191,961 | -35,882   | 1526,1172 |
|           | 76-Os-193  | 30.11 ч                          | 3/2-    | 192,964 | -33,396   | 1531,7023 |
|           | 76-Os-194  | 6.0 лет                          | 0+      | 193,965 | -32,435   | 1538,8130 |
|           | 76-Os-195  | 9 мин                            |         | 194,968 | -29,692   | 1544,1415 |
|           | 76-Os-196  | 34.9 мин                         | 0+      | 195,970 | -28,296   | 1550,8168 |
| Иридий    | 77-Ir-164  | 1 мс                             |         |         | 0,000     |           |
|           | 77-Ir-165  | 1 мкс                            |         | 164,988 | -11,569   | 1283,0960 |
|           | 77-Ir-166  | 10.5 мс                          | (2-)    | 165,986 | -13,501   | 1293,0990 |
|           | 77-Ir-167  | 35.2 мс                          | (1/2+)  | 166,982 | -17,193   | 1304,8620 |
|           | 77-Ir-168  | 0.161 мс                         |         | 167,980 | -18,662   | 1314,4030 |
|           | 77-Ir-169  | 0.6 мс +5-2                      | (1/2+)  | 168,976 | -21,992   | 1325,8041 |
|           | 77-Ir-170  | 0.83 с                           |         | 169,975 | -23,257   | 1335,1400 |
|           | 77-Ir-171  | 1.46 с                           | (11/2-) | 170,972 | -26,288   | 1346,2430 |
|           | 77-Ir-172  | 4.4 с                            | (3+)    | 171,971 | -27,346   | 1355,3720 |
|           | 77-Ir-174  | 7.9 с                            | (3+)    | 173,967 | -30,922   | 1375,0910 |
|           | 77-Ir-175  | 9 с                              | (5/2-)  | 174,964 | -33,274   | 1385,5140 |
|           | 77-Ir-176  | 8.3 с                            |         | 175,964 | -33,989   | 1394,3010 |
|           | 77-Ir-177  | 30 с                             | (5/2-)  | 176,961 | -36,170   | 1404,5530 |
|           | 77-Ir-178  | 12 с                             |         | 177,961 | -36,251   | 1412,7050 |
|           | 77-Ir-179  | 79 с                             | (5/2-)  | 178,959 | -38,052   | 1422,5780 |
|           | 77-Ir-180  | 1.5 мин                          |         | 179,959 | -37,955   | 1430,5520 |
|           | 77-Ir-181  | 4.90 мин                         | (5/2-)  | 180,958 | -39,456   | 1440,1243 |
|           | 77-Ir-182  | 15 мин                           | (5+)    | 181,958 | -39,004   | 1447,7433 |
|           | 77-Ir-183  | 57 мин                           | 5/2-    | 182,957 | -40,228   | 1457,0390 |
|           | 77-Ir-184  | 3.09 ч                           | 5-      | 183,957 | -39,693   | 1464,5747 |
| 77-Ir-185 | 14.4 ч     | 5/2-                             | 184,957 | -40,436 | 1473,3900 |           |
| 77-Ir-186 | 16.64 ч    | 5+                               | 185,958 | -39,168 | 1480,1931 |           |
| 77-Ir-187 | 10.5 ч     | 3/2+                             | 186,957 | -39,718 | 1488,8143 |           |
| 77-Ir-188 | 41.5 ч     | 1-                               | 187,959 | -38,329 | 1495,4966 |           |
| 77-Ir-189 | 13.2 дн.   | 3/2+                             | 188,959 | -38,455 | 1503,6942 |           |
| 77-Ir-190 | 11.78 дн.  | (4-)                             | 189,961 | -36,708 | 1510,0182 |           |
| 77-Ir-191 | 37.3%      | 3/2+                             | 190,961 | -36,709 | 1518,0905 |           |
| 77-Ir-192 | 73.827 дн. | 4+                               | 191,963 | -34,836 | 1524,2886 |           |
| 77-Ir-193 | 62.7%      | 3/2+                             | 192,963 | -34,536 | 1532,0604 |           |
| 77-Ir-194 | 19.28 ч    | 1-                               | 193,965 | -32,532 | 1538,1273 |           |
| 77-Ir-195 | 2.5 ч      | 3/2+                             | 194,966 | -31,692 | 1545,3591 |           |
| 77-Ir-196 | 52 с       | (0-)                             | 195,968 | -29,454 | 1551,1920 |           |
| 77-Ir-197 | 5.8 мин    | 3/2+                             | 196,970 | -28,283 | 1558,0928 |           |
| 77-Ir-198 | 8 с        |                                  | 197,972 | -25,821 | 1563,7020 |           |
| 77-Ir-199 | 20 с       |                                  | 198,974 | -24,417 | 1570,3691 |           |
| Платина   | 78-Pt-166  | 0.3 мс                           | 0+      |         | 0,000     |           |
|           | 78-Pt-167  | 0.7 мс                           | (7/2-)  |         | 0,000     |           |
|           | 78-Pt-168  | 2.0 мс                           | 0+      | 167,988 | -11,146   | 1306,1040 |

|        |           |             |        |         |         |           |
|--------|-----------|-------------|--------|---------|---------|-----------|
|        | 78-Рт-169 | 5 мс        |        | 168,986 | -12,649 | 1315,6790 |
|        | 78-Рт-170 | 13.8 мс     | 0+     | 169,982 | -16,463 | 1327,5640 |
|        | 78-Рт-171 | 34 мс       |        | 170,981 | -17,465 | 1336,6370 |
|        | 78-Рт-172 | 0.096 с     | 0+     | 171,977 | -21,074 | 1348,3179 |
|        | 78-Рт-173 | 376 мс      |        | 172,976 | -21,890 | 1357,2057 |
|        | 78-Рт-174 | 0.889 с     | 0+     | 173,973 | -25,326 | 1368,7127 |
|        | 78-Рт-175 | 2.4 с       |        | 174,972 | -25,825 | 1377,2830 |
|        | 78-Рт-176 | 6.7 с       | 0+     | 175,969 | -28,876 | 1388,4060 |
|        | 78-Рт-177 | 11 с        | (5/2-) | 176,968 | -29,386 | 1396,9860 |
|        | 78-Рт-178 | 21.1 с      | 0+     | 177,966 | -31,941 | 1407,6130 |
|        | 78-Рт-179 | 21.2 с      | 1/2-   | 178,965 | -32,160 | 1415,9030 |
|        | 78-Рт-180 | 52 с        | 0+     | 179,963 | -34,265 | 1426,0790 |
|        | 78-Рт-181 | 52.0 с      | 1/2-   | 180,963 | -34,300 | 1434,1860 |
|        | 78-Рт-182 | 3.0 мин     | 0+     | 181,961 | -36,079 | 1444,0361 |
|        | 78-Рт-183 | 6.5 мин     | 1/2-   | 182,962 | -35,650 | 1451,6780 |
|        | 78-Рт-184 | 17.3 мин    | 0+     | 183,960 | -37,358 | 1461,4580 |
|        | 78-Рт-185 | 70.9 мин    | 9/2+   | 184,961 | -36,558 | 1468,7288 |
|        | 78-Рт-186 | 2.08 ч      | 0+     | 185,959 | -37,789 | 1478,0310 |
|        | 78-Рт-187 | 2.35 ч      | 3/2-   | 186,961 | -36,740 | 1485,0540 |
|        | 78-Рт-188 | 10.2 дн.    | 0+     | 187,959 | -37,823 | 1494,2078 |
|        | 78-Рт-189 | 10.87 ч     | 3/2-   | 188,961 | -36,485 | 1500,9413 |
|        |           | 0.014%      |        |         |         |           |
|        | 78-Рт-190 | 6.5е+11 лет | 0+     | 189,960 | -37,325 | 1509,8527 |
|        | 78-Рт-191 | 2.802 дн.   | 3/2-   | 190,962 | -35,691 | 1516,2896 |
|        | 78-Рт-192 | 0.782%      | 0+     | 191,961 | -36,296 | 1524,9659 |
|        | 78-Рт-193 | 50 лет      | 1/2-   | 192,963 | -34,480 | 1531,2214 |
|        | 78-Рт-194 | 32.967%     | 0+     | 193,963 | -34,779 | 1539,5917 |
|        | 78-Рт-195 | 33.832%     | 1/2-   | 194,965 | -32,812 | 1545,6968 |
|        | 78-Рт-196 | 25.242%     | 0+     | 195,965 | -32,663 | 1553,6186 |
|        | 78-Рт-197 | 19.8915 ч   | 1/2-   | 196,967 | -30,438 | 1559,4651 |
|        | 78-Рт-198 | 7.163%      | 0+     | 197,968 | -29,923 | 1567,0217 |
|        | 78-Рт-199 | 30.80 мин   | 5/2-   | 198,971 | -27,408 | 1572,5778 |
|        | 78-Рт-200 | 12.5 ч      | 0+     | 199,971 | -26,618 | 1579,8595 |
|        | 78-Рт-201 | 2.5 мин     | (5/2-) | 200,974 | -23,756 | 1585,0687 |
|        | 78-Рт-202 | 44 ч        | 0+     | 201,976 | -22,598 | 1591,9820 |
| Золото | 79-Ау-171 | 17 мкс +9-5 | (1/2+) | 170,992 | -7,662  | 1326,0530 |
|        | 79-Ау-172 | 6.3 мс      |        | 171,990 | -9,213  | 1335,6750 |
|        | 79-Ау-173 | 20 мс +9-6  | (1/2+) | 172,986 | -12,670 | 1347,2030 |
|        | 79-Ау-174 | 120 мс      |        | 173,985 | -14,050 | 1356,6540 |
|        | 79-Ау-175 | 185 мс      |        | 174,982 | -17,185 | 1367,8600 |
|        | 79-Ау-176 | 1.08 с      |        | 175,980 | -18,379 | 1377,1260 |
|        | 79-Ау-177 | 1.3 с       |        | 176,977 | -21,224 | 1388,0420 |
|        | 79-Ау-178 | 2.6 с       |        | 177,976 | -22,379 | 1397,2690 |
|        | 79-Ау-179 | 3.3 с       |        | 178,973 | -24,767 | 1407,7280 |
|        | 79-Ау-180 | 8.1 с       |        | 179,972 | -25,713 | 1416,7460 |
|        | 79-Ау-181 | 13.7 с      | (3/2-) | 180,970 | -27,993 | 1427,0970 |
|        | 79-Ау-182 | 15.6 с      |        | 181,970 | -28,299 | 1435,4740 |
|        | 79-Ау-183 | 42.8 с      | (5/2-) | 182,968 | -30,161 | 1445,4080 |
|        | 79-Ау-184 | 21 с        | 5+     | 183,967 | -30,298 | 1453,6150 |
|        | 79-Ау-185 | 4.25 мин    | 5/2-   | 184,966 | -31,851 | 1463,2394 |
|        | 79-Ау-186 | 10.7 мин    | 3-     | 185,966 | -31,673 | 1471,1331 |
|        | 79-Ау-187 | 8.4 мин     | 1/2+   | 186,965 | -33,010 | 1480,5420 |

|       |           |                                   |        |         |         |           |
|-------|-----------|-----------------------------------|--------|---------|---------|-----------|
|       | 79-Au-188 | 8.84 мин                          | 1(-)   | 187,965 | -32,523 | 1488,1250 |
|       | 79-Au-189 | 28.7 мин                          | 1/2+   | 188,964 | -33,635 | 1497,3090 |
|       | 79-Au-190 | 42.8 мин                          | 1-     | 189,965 | -32,883 | 1504,6283 |
|       | 79-Au-191 | 3.18 ч                            | 3/2+   | 190,964 | -33,861 | 1513,6772 |
|       | 79-Au-192 | 4.94 ч                            | 1-     | 191,965 | -32,779 | 1520,6672 |
|       | 79-Au-193 | 17.65 ч                           | 3/2+   | 192,964 | -33,411 | 1529,3704 |
|       | 79-Au-194 | 38.02 ч                           | 1-     | 193,965 | -32,287 | 1536,3173 |
|       | 79-Au-195 | 186.098 дн.                       | 3/2+   | 194,965 | -32,586 | 1544,6876 |
|       | 79-Au-196 | 6.183 дн.                         | 2-     | 195,967 | -31,157 | 1551,3306 |
|       | 79-Au-197 | 100%                              | 3/2+   | 196,967 | -31,157 | 1559,4016 |
|       | 79-Au-198 | 2.69517 дн.                       | 2-     | 197,968 | -29,598 | 1565,9140 |
|       | 79-Au-199 | 3.139 дн.                         | 3/2+   | 198,969 | -29,111 | 1573,4984 |
|       | 79-Au-200 | 48.4 мин                          | 1(-)   | 199,971 | -27,276 | 1579,7348 |
|       | 79-Au-201 | 26 мин                            | 3/2+   | 200,972 | -26,416 | 1586,9464 |
|       | 79-Au-202 | 28.8 с                            | (1-)   | 201,974 | -24,416 | 1593,0172 |
|       | 79-Au-203 | 60 с                              | 3/2+   | 202,975 | -23,159 | 1599,8321 |
|       | 79-Au-204 | 39.8 с                            | (2-)   | 203,978 | -20,767 | 1605,5110 |
|       | 79-Au-205 | 31 с                              | 3/2+   | 204,980 | -18,993 | 1611,8080 |
| Ртуть | 80-Hg-172 | 0.25 мс+35-9<br>0.93 мс+57-<br>36 | 0+     |         | 0,000   |           |
|       | 80-Hg-173 |                                   |        |         | 0,000   |           |
|       | 80-Hg-174 | 2.1 мс+18-7                       | 0+     |         | 0,000   |           |
|       | 80-Hg-175 | 8 мс                              |        | 174,991 | -8,000  | 1357,8940 |
|       | 80-Hg-176 | 34 мс+18-9                        | 0+     | 175,987 | -11,724 | 1369,6890 |
|       | 80-Hg-177 | 0.114 с                           |        | 176,986 | -12,727 | 1378,7630 |
|       | 80-Hg-178 | 0.287 с                           | 0+     | 177,982 | -16,323 | 1390,4304 |
|       | 80-Hg-179 | 0.93 с                            |        | 178,982 | -16,969 | 1399,1480 |
|       | 80-Hg-180 | 2.6 с                             | 0+     | 179,978 | -20,193 | 1410,4430 |
|       | 80-Hg-181 | 3.6 с                             | 1/2(-) | 180,978 | -20,674 | 1418,9950 |
|       | 80-Hg-182 | 10.83 с                           | 0+     | 181,975 | -23,519 | 1429,9110 |
|       | 80-Hg-183 | 9.4 с                             | 1/2-   | 182,975 | -23,696 | 1438,1600 |
|       | 80-Hg-184 | 30.9 с                            | 0+     | 183,972 | -26,178 | 1448,7130 |
|       | 80-Hg-185 | 49.1 с                            | 1/2-   | 184,972 | -26,098 | 1456,7040 |
|       | 80-Hg-186 | 1.38 мин                          | 0+     | 185,969 | -28,448 | 1467,1256 |
|       | 80-Hg-187 | 2.4 мин                           | 13/2+  | 186,970 | -28,145 | 1474,8940 |
|       | 80-Hg-188 | 3.25 мин                          | 0+     | 187,968 | -30,223 | 1485,0430 |
|       | 80-Hg-189 | 7.6 мин                           | 3/2-   | 188,968 | -29,685 | 1492,5770 |
|       | 80-Hg-190 | 20.0 мин                          | 0+     | 189,966 | -31,413 | 1502,3760 |
|       | 80-Hg-191 | 49 мин                            | (3/2-) | 190,967 | -30,681 | 1509,7149 |
|       | 80-Hg-192 | 4.85 ч                            | 0+     | 191,966 | -32,069 | 1519,1750 |
|       | 80-Hg-193 | 3.80 ч                            | 3/2-   | 192,967 | -31,071 | 1526,2478 |
|       | 80-Hg-194 | 444 лет                           | 0+     | 193,965 | -32,247 | 1535,4950 |
|       | 80-Hg-195 | 9.9 ч                             | 1/2-   | 194,967 | -31,076 | 1542,3953 |
|       | 80-Hg-196 | 0.15%                             | 0+     | 195,966 | -31,843 | 1551,2343 |
|       | 80-Hg-197 | 64.14 ч                           | 1/2-   | 196,967 | -30,557 | 1558,0197 |
|       | 80-Hg-198 | 9.97%                             | 0+     | 197,967 | -30,970 | 1566,5041 |
|       | 80-Hg-199 | 16.87%                            | 1/2-   | 198,968 | -29,563 | 1573,1683 |
|       | 80-Hg-200 | 23.10%                            | 0+     | 199,968 | -29,520 | 1581,1965 |
|       | 80-Hg-201 | 13.18%                            | 3/2-   | 200,970 | -27,679 | 1587,4267 |
|       | 80-Hg-202 | 29.86%                            | 0+     | 201,971 | -27,362 | 1595,1810 |
|       | 80-Hg-203 | 46.612 дн.                        | 5/2-   | 202,973 | -25,283 | 1601,1737 |
|       | 80-Hg-204 | 6.87%                             | 0+     | 203,973 | -24,707 | 1608,6689 |

|          |           |              |         |         |           |           |
|----------|-----------|--------------|---------|---------|-----------|-----------|
|          | 80-Нг-205 | 5.2 мин      | 1/2-    | 204,976 | -22,304   | 1614,3365 |
|          | 80-Нг-206 | 8.15 мин     | 0+      | 205,977 | -20,960   | 1621,0641 |
|          | 80-Нг-207 | 2.9 мин      | (9/2+)  | 206,983 | -16,229   | 1624,4049 |
|          | 80-Нг-208 | 41 мин +5-4  | 0+      | 207,986 | -13,097   | 1629,3440 |
| Галлий   | 81-П-177  | 18 мс        | (1/2+)  | 176,997 | -2,905    | 1368,1590 |
|          | 81-П-178  | 60 мс        |         | 177,995 | -4,445    | 1377,7700 |
|          | 81-П-179  | 0.43 с       | (11/2-) | 178,991 | -7,949    | 1389,3460 |
|          | 81-П-180  | 1.5 с        |         | 179,990 | -9,135    | 1398,6020 |
|          | 81-П-181  | 3.2 с        | (1/2+)  | 180,987 | -12,199   | 1409,7380 |
|          | 81-П-182  | 3.1 с        | (7+)    | 181,986 | -13,404   | 1419,0140 |
|          | 81-П-183  | 6.9 с        | (1/2+)  | 182,983 | -16,118   | 1429,7990 |
|          | 81-П-184  | 11 с         | (2+)    | 183,982 | -16,990   | 1438,7430 |
|          | 81-П-185  | 19.5 с       | (1/2+)  | 184,979 | -19,468   | 1449,2920 |
|          | 81-П-187  | 51 с         | (1/2+)  | 186,976 | -22,197   | 1468,1640 |
|          | 81-П-189  | 2.3 мин      | (1/2+)  | 188,974 | -24,508   | 1486,6180 |
|          | 81-П-191  | ?            | (1/2+)  | 190,972 | -26,188   | 1504,4400 |
|          | 81-П-192  | 9.6 мин      | (2-)    | 191,972 | -25,949   | 1512,2730 |
|          | 81-П-193  | 21.6 мин     | 1/2+    | 192,971 | -27,434   | 1521,8290 |
|          | 81-П-194  | 33.0 мин     | 2-      | 193,971 | -26,964   | 1529,4300 |
|          | 81-П-195  | 1.16 ч       | 1/2+    | 194,970 | -28,271   | 1538,8080 |
|          | 81-П-196  | 1.84 ч       | 2-      | 195,971 | -27,466   | 1546,0740 |
|          | 81-П-197  | 2.84 ч       | 1/2+    | 196,970 | -28,377   | 1555,0568 |
|          | 81-П-198  | 5.3 ч        | 2-      | 197,970 | -27,510   | 1562,2618 |
|          | 81-П-199  | 7.42 ч       | 1/2+    | 198,970 | -28,118   | 1570,9408 |
|          | 81-П-200  | 26.1 ч       | 2-      | 199,971 | -27,064   | 1577,9581 |
| 81-П-201 | 72.912 ч  | 1/2+         | 200,971 | -27,196 | 1586,1614 |           |
| 81-П-202 | 12.23 дн. | 2-           | 201,972 | -25,997 | 1593,0340 |           |
| 81-П-203 | 29.524%   | 1/2+         | 202,972 | -25,775 | 1600,8832 |           |
| 81-П-204 | 3.78 лет  | 2-           | 203,974 | -24,360 | 1607,5391 |           |
| 81-П-205 | 70.476%   | 1/2+         | 204,974 | -23,835 | 1615,0854 |           |
| 81-П-206 | 4.200 мин | 0-           | 205,976 | -22,267 | 1621,5889 |           |
| 81-П-207 | 4.77 мин  | 1/2+         | 206,977 | -21,044 | 1628,4376 |           |
| 81-П-208 | 3.053 мин | 5(+)         | 207,982 | -16,763 | 1632,2271 |           |
| 81-П-209 | 2.161 мин | (1/2+)       | 208,985 | -13,647 | 1637,1830 |           |
| 81-П-210 | 1.30 мин  | (5+)         | 209,990 | -9,254  | 1640,8610 |           |
| Свинец   | 82-Рб-180 | 4 с +4-2     | 0+      |         | 0,000     |           |
|          | 82-Рб-181 | 45 мс        | (13/2+) | 180,997 | -3,061    | 1399,8180 |
|          | 82-Рб-182 | 55 мс +40-35 | 0+      | 181,993 | -6,822    | 1411,6499 |
|          | 82-Рб-183 | 300 мс       | (1/2-)  | 182,992 | -7,517    | 1420,4160 |
|          | 82-Рб-184 | 0.55 с       | 0+      | 183,988 | -10,993   | 1431,9640 |
|          | 82-Рб-185 | 4.1 с        |         | 184,988 | -11,569   | 1440,6110 |
|          | 82-Рб-186 | 4.82 с       | 0+      | 185,984 | -14,623   | 1451,7360 |
|          | 82-Рб-188 | 24 с         | 0+      | 187,981 | -17,642   | 1470,8980 |
|          | 82-Рб-190 | 1.2 мин      | 0+      | 189,978 | -20,325   | 1489,7235 |
|          | 82-Рб-191 | 1.33 мин     | (3/2-)  | 190,978 | -20,307   | 1497,7760 |
|          | 82-Рб-192 | 3.5 мин      | 0+      | 191,976 | -22,577   | 1508,1180 |
|          | 82-Рб-193 |              | (3/2-)  | 192,976 | -22,281   | 1515,8940 |
|          | 82-Рб-194 | 12.0 мин     | 0+      | 193,974 | -24,250   | 1525,9340 |
|          | 82-Рб-195 | 15 мин       | 3/2-    | 194,974 | -23,780   | 1533,5350 |
|          | 82-Рб-196 | 37 мин       | 0+      | 195,973 | -25,420   | 1543,2470 |
|          | 82-Рб-197 | 8 мин        | 3/2-    | 196,973 | -24,796   | 1550,6940 |
|          | 82-Рб-198 | 2.40 ч       | 0+      | 197,972 | -26,100   | 1560,0690 |

|           |           |              |         |         |           |           |
|-----------|-----------|--------------|---------|---------|-----------|-----------|
|           | 82-Pb-199 | 90 мин       | 3/2-    | 198,973 | -25,235   | 1567,2750 |
|           | 82-Pb-200 | 21.5 ч       | 0+      | 199,972 | -26,254   | 1576,3652 |
|           | 82-Pb-201 | 9.33 ч       | 5/2-    | 200,973 | -25,293   | 1583,4761 |
|           | 82-Pb-202 | 52.5e+3 лет  | 0+      | 201,972 | -25,948   | 1592,2021 |
|           | 82-Pb-203 | 51.873 ч     | 5/2-    | 202,973 | -24,801   | 1599,1261 |
|           |           | 1.4% 1.4e+17 |         |         |           |           |
|           | 82-Pb-204 | лет          | 0+      | 203,973 | -25,124   | 1607,5204 |
|           | 82-Pb-205 | 1.53e+7 лет  | 5/2-    | 204,974 | -23,784   | 1614,2519 |
|           | 82-Pb-206 | 24.1%        | 0+      | 205,974 | -23,801   | 1622,3401 |
|           | 82-Pb-207 | 22.1%        | 1/2-    | 206,976 | -22,467   | 1629,0779 |
|           | 82-Pb-208 | 52.4%        | 0+      | 207,977 | -21,764   | 1636,4457 |
|           | 82-Pb-209 | 3.253 ч      | 9/2+    | 208,981 | -17,629   | 1640,3822 |
|           | 82-Pb-210 | 22.3 лет     | 0+      | 209,984 | -14,743   | 1645,5674 |
|           | 82-Pb-211 | 36.1 мин     | 9/2+    | 210,989 | -10,497   | 1649,3927 |
|           | 82-Pb-212 | 10.64 ч      | 0+      | 211,992 | -7,557    | 1654,5242 |
|           | 82-Pb-213 | 10.2 мин     | (9/2+)  | 212,997 | -3,260    | 1658,2990 |
|           | 82-Pb-214 | 26.8 мин     | 0+      | 214,000 | -0,188    | 1663,2981 |
| Висмут    | 83-Bi-186 | 15.0 мс      | (3+)    | 185,996 | -3,279    | 1439,6100 |
|           | 83-Bi-187 | 32 мс        | (9/2-)  | 186,993 | -6,094    | 1450,4960 |
|           | 83-Bi-189 | 728 мс       | (9/2-)  | 188,990 | -9,776    | 1470,3210 |
|           | 83-Bi-191 | 12.3 с       | (9/2-)  | 190,986 | -12,991   | 1489,6790 |
|           | 83-Bi-192 | 34.6 с       | (3+)    | 191,985 | -13,629   | 1498,3880 |
|           | 83-Bi-193 | 67 с         | (9/2-)  | 192,983 | -15,779   | 1508,6090 |
|           | 83-Bi-194 | 95 с         | (3+)    | 193,983 | -16,070   | 1516,9710 |
|           | 83-Bi-195 | 183 с        | (9/2-)  | 194,981 | -17,930   | 1526,9030 |
|           | 83-Bi-196 | 308 с        | (3+)    | 195,981 | -18,064   | 1535,1080 |
|           | 83-Bi-197 | 9.33 мин     | (9/2-)  | 196,979 | -19,623   | 1544,7378 |
|           | 83-Bi-198 | 10.3 мин     | (2+,3+) | 197,979 | -19,539   | 1552,7252 |
|           | 83-Bi-199 | 27 мин       | 9/2-    | 198,978 | -20,887   | 1562,1448 |
|           | 83-Bi-200 | 36.4 мин     | 7+      | 199,978 | -20,361   | 1569,6898 |
|           | 83-Bi-201 | 108 мин      | 9/2-    | 200,977 | -21,452   | 1578,8522 |
|           | 83-Bi-202 | 1.72 ч       | 5+      | 201,978 | -20,796   | 1586,2679 |
|           | 83-Bi-203 | 11.76 ч      | 9/2-    | 202,977 | -21,547   | 1595,0904 |
|           | 83-Bi-204 | 11.22 ч      | 6+      | 203,978 | -20,674   | 1602,2889 |
|           | 83-Bi-205 | 15.31 дн.    | 9/2-    | 204,977 | -21,075   | 1610,7612 |
|           | 83-Bi-206 | 6.243 дн.    | 6(+)    | 205,978 | -20,043   | 1617,8003 |
|           | 83-Bi-207 | 31.55 лет    | 9/2-    | 206,978 | -20,069   | 1625,8973 |
|           | 83-Bi-208 | 3.68e+5 лет  | (5+)    | 207,980 | -18,884   | 1632,7843 |
| 83-Bi-209 | 100%      | 9/2-         | 208,980 | -18,273 | 1640,2440 |           |
| 83-Bi-210 | 5.013 дн. | 1-           | 209,984 | -14,806 | 1644,8486 |           |
| 83-Bi-211 | 2.14 мин  | 9/2-         | 210,987 | -11,869 | 1649,9827 |           |
| 83-Bi-212 | 60.55 мин | 1(-)         | 211,991 | -8,131  | 1654,3156 |           |
| 83-Bi-213 | 45.59 мин | 9/2-         | 212,994 | -5,240  | 1659,4962 |           |
| 83-Bi-214 | 19.9 мин  | 1-           | 213,999 | -1,212  | 1663,5399 |           |
| 83-Bi-215 | 7.6 мин   |              | 215,002 | 1,707   | 1668,6923 |           |
| 83-Bi-216 | 2.17 мин  | (1-)         | 216,006 | 5,775   | 1672,6960 |           |
| 83-Bi-217 | 97 с      |              |         | 0,000   |           |           |
| Полоний   | 84-Po-190 | 2.53 мс      | 0+      | 189,995 | -4,555    | 1472,3890 |
|           | 84-Po-191 | 22 мс        | (3/2-)  | 190,995 | -4,980    | 1480,8850 |
|           | 84-Po-192 | 33.2 мс      | 0+      | 191,992 | -7,897    | 1491,8730 |
|           | 84-Po-194 | 0.392 с      | 0+      | 193,988 | -10,913   | 1511,0322 |
|           | 84-Po-195 | 4.64 с       | (3/2-)  | 194,988 | -11,136   | 1519,3260 |

|           |           |               |         |         |           |           |
|-----------|-----------|---------------|---------|---------|-----------|-----------|
|           | 84-Рo-196 | 5.8 с         | 0+      | 195,986 | -13,495   | 1529,7570 |
|           | 84-Рo-197 | 1.4 мин       | (3/2-)  | 196,986 | -13,445   | 1537,7780 |
|           | 84-Рo-198 | 1.87 мин      | 0+      | 197,983 | -15,516   | 1547,9200 |
|           | 84-Рo-199 | 4.58 мин      | (3/2-)  | 198,984 | -15,281   | 1555,7570 |
|           | 84-Рo-200 | 10.9 мин      | 0+      | 199,982 | -17,014   | 1565,5610 |
|           | 84-Рo-201 | 15.3 мин      | 3/2-    | 200,982 | -16,572   | 1573,1910 |
|           | 84-Рo-202 | 44.7 мин      | 0+      | 201,981 | -17,975   | 1582,6640 |
|           | 84-Рo-203 | 36.7 мин      | 5/2-    | 202,981 | -17,314   | 1590,0746 |
|           | 84-Рo-204 | 3.53 ч        | 0+      | 203,980 | -18,344   | 1599,1760 |
|           | 84-Рo-205 | 1.66 ч        | 5/2-    | 204,981 | -17,544   | 1606,4478 |
|           | 84-Рo-206 | 8.8 дн.       | 0+      | 205,980 | -18,197   | 1615,1713 |
|           | 84-Рo-207 | 5.80 ч        | 5/2-    | 206,982 | -17,160   | 1622,2059 |
|           | 84-Рo-208 | 2.898 лет     | 0+      | 207,981 | -17,483   | 1630,6006 |
|           | 84-Рo-209 | 102 лет       | 1/2-    | 208,982 | -16,380   | 1637,5684 |
|           | 84-Рo-210 | 138.376 дн.   | 0+      | 209,983 | -15,968   | 1645,2283 |
|           | 84-Рo-211 | 0.516 с       | 9/2+    | 210,987 | -12,448   | 1649,7791 |
|           | 84-Рo-212 | 0.299 мкс     | 0+      | 211,989 | -10,385   | 1655,7873 |
|           | 84-Рo-213 | 3.65 мкс      | 9/2+    | 212,993 | -6,667    | 1660,1412 |
|           | 84-Рo-214 | 164.3 мкс     | 0+      | 213,995 | -4,484    | 1666,0297 |
|           | 84-Рo-215 | 1.781 мс      | 9/2+    | 214,999 | -0,545    | 1670,1620 |
|           | 84-Рo-216 | 0.145 с       | 0+      | 216,002 | 1,775     | 1675,9134 |
|           | 84-Рo-217 | 1.47 с        |         | 217,006 | 5,825     | 1679,9340 |
|           | 84-Рo-218 | 3.10 мин      | 0+      | 218,009 | 8,352     | 1685,4791 |
|           | 84-Рo-219 | 2 мин         |         |         | 0,000     |           |
| Астат     | 85-At-193 | 40 мс         |         | 193,000 | 0,175     | 1491,0900 |
|           | 85-At-195 | 146 мс +21-17 |         | 194,997 | -3,210    | 1510,6180 |
|           | 85-At-196 | 0.253 с       |         | 195,996 | -4,003    | 1519,4830 |
|           | 85-At-197 | 0.37 с +9-6   | (9/2-)  | 196,993 | -6,250    | 1529,8010 |
|           | 85-At-198 | 4.6 с +18-10  | (3+)    | 197,993 | -6,751    | 1538,3730 |
|           | 85-At-199 | 7.2 с         | (9/2-)  | 198,991 | -8,725    | 1548,4190 |
|           | 85-At-200 | 43 с          | (3+)    | 199,990 | -9,042    | 1556,8070 |
|           | 85-At-201 | 89 с          | (9/2-)  | 200,988 | -10,724   | 1566,5602 |
|           | 85-At-202 | 184 с         | (2,3)+  | 201,988 | -10,760   | 1574,6672 |
|           | 85-At-203 | 7.4 мин       | 9/2-    | 202,987 | -12,252   | 1584,2302 |
|           | 85-At-204 | 9.2 мин       | 7+      | 203,987 | -11,866   | 1591,9156 |
|           | 85-At-205 | 26.2 мин      | 9/2-    | 204,986 | -13,007   | 1601,1282 |
|           | 85-At-206 | 30.6 мин      | (5)+    | 205,987 | -12,483   | 1608,6752 |
|           | 85-At-207 | 1.80 ч        | 9/2-    | 206,986 | -13,250   | 1617,5135 |
|           | 85-At-208 | 1.63 ч        | 6+      | 207,987 | -12,498   | 1624,8334 |
|           | 85-At-209 | 5.41 ч        | 9/2-    | 208,986 | -12,893   | 1633,2995 |
|           | 85-At-210 | 8.1 ч         | (5)+    | 209,987 | -11,987   | 1640,4649 |
|           | 85-At-211 | 7.214 ч       | 9/2-    | 210,987 | -11,662   | 1648,2106 |
|           | 85-At-212 | 0.314 с       | (1-)    | 211,991 | -8,631    | 1653,2510 |
|           | 85-At-213 | 125 нс        | 9/2-    | 212,993 | -6,594    | 1659,2856 |
|           | 85-At-214 | 558 нс        | 1-      | 213,996 | -3,394    | 1664,1570 |
|           | 85-At-215 | 0.10 мс       | 9/2-    | 214,999 | -1,266    | 1670,1000 |
|           | 85-At-216 | 0.30 мс       | 1-      | 216,002 | 2,244     | 1674,6619 |
|           | 85-At-217 | 32.3 мс       | 9/2-    | 217,005 | 4,387     | 1680,5900 |
|           | 85-At-218 | 1.5 с         |         | 218,009 | 8,087     | 1684,9616 |
|           | 85-At-219 | 56 с          |         | 219,011 | 10,523    | 1690,5971 |
| 85-At-220 | 3.71 мин  | 3             | 220,015 | 14,253  | 1694,9380 |           |
| 85-At-221 | 2.3 мин   |               | 221,018 | 16,897  | 1700,3650 |           |

|           |            |              |            |         |           |           |
|-----------|------------|--------------|------------|---------|-----------|-----------|
|           | 85-At-222  | 54 с         |            | 222,022 | 20,800    | 1704,5330 |
|           | 85-At-223  | 50 с         |            | 223,025 | 23,604    | 1709,8010 |
| Радон     | 86-Rn-197  | 65 мс +25-14 | (3/2-)     | 197,002 | 1,547     | 1521,2210 |
|           | 86-Rn-198  | 84 мс +16-12 | 0+         | 197,999 | -1,136    | 1531,9760 |
|           | 86-Rn-199  | 0.62 с       | (3/2-)     | 198,998 | -1,575    | 1540,4860 |
|           | 86-Rn-200  | 0.96 с       | 0+         | 199,996 | -4,027    | 1551,0090 |
|           | 86-Rn-201  | 7.1 с        | (3/2-)     | 200,996 | -4,159    | 1559,2120 |
|           | 86-Rn-202  | 10.0 с       | 0+         | 201,993 | -6,318    | 1569,4430 |
|           | 86-Rn-203  | 42 с         | (3/2,5/2)- | 202,993 | -6,226    | 1577,4220 |
|           | 86-Rn-204  | 1.17 мин     | 0+         | 203,991 | -8,044    | 1587,3110 |
|           | 86-Rn-205  | 2.8 мин      | 5/2-       | 204,992 | -7,761    | 1595,1000 |
|           | 86-Rn-206  | 5.67 мин     | 0+         | 205,990 | -9,166    | 1604,5760 |
|           | 86-Rn-207  | 9.25 мин     | 5/2-       | 206,991 | -8,638    | 1612,1193 |
|           | 86-Rn-208  | 24.35 мин    | 0+         | 207,990 | -9,658    | 1621,2112 |
|           | 86-Rn-209  | 28.5 мин     | 5/2-       | 208,990 | -8,964    | 1628,5882 |
|           | 86-Rn-210  | 2.4 ч        | 0+         | 209,990 | -9,613    | 1637,3085 |
|           | 86-Rn-211  | 14.6 ч       | 1/2-       | 210,991 | -8,770    | 1644,5364 |
|           | 86-Rn-212  | 23.9 мин     | 0+         | 211,991 | -8,673    | 1652,5113 |
|           | 86-Rn-213  | 25.0 мс      | (9/2+)     | 212,994 | -5,712    | 1657,6210 |
|           | 86-Rn-214  | 0.27 мкс     | 0+         | 213,995 | -4,335    | 1664,3156 |
|           | 86-Rn-215  | 2.30 мкс     | 9/2+       | 214,999 | -1,184    | 1669,2358 |
|           | 86-Rn-216  | 45 мкс       | 0+         | 216,000 | 0,240     | 1675,8829 |
|           | 86-Rn-217  | 0.54 мс      | 9/2+       | 217,004 | 3,646     | 1680,5483 |
|           | 86-Rn-218  | 35 мс        | 0+         | 218,006 | 5,204     | 1687,0624 |
| 86-Rn-219 | 3.96 с     | 5/2+         | 219,009    | 8,826   | 1691,5116 |           |
| 86-Rn-220 | 55.6 с     | 0+           | 220,011    | 10,604  | 1697,8044 |           |
| 86-Rn-221 | 25.7 мин   | 7/2(+)       | 221,015    | 14,396  | 1702,0840 |           |
| 86-Rn-222 | 3.8235 дн. | 0+           | 222,018    | 16,367  | 1708,1845 |           |
| 86-Rn-223 | 23.2 мин   | 38900        | 223,022    | 20,297  | 1712,3250 |           |
| 86-Rn-224 | 107 мин    | 0+           | 224,024    | 22,440  | 1718,2540 |           |
| 86-Rn-225 | 4.66 мин   | 7/2-         | 225,028    | 26,492  | 1722,2740 |           |
| 86-Rn-226 | 7.4 мин    | 0+           | 226,031    | 28,774  | 1728,0630 |           |
| 86-Rn-227 | 22.5 с     | 38839        | 227,035    | 32,981  | 1731,9270 |           |
| 86-Rn-228 | 65 с       | 0+           | 228,038    | 35,475  | 1737,5040 |           |
| Франций   | 87-Fr-199  | 12 мс +10-4  |            |         | 0,000     |           |
|           | 87-Fr-200  | 19 мс +13-6  | (3+)       | 200,006 | 6,054     | 1540,1460 |
|           | 87-Fr-201  | 69 мс +16-11 | (9/2-)     | 201,004 | 3,713     | 1550,5580 |
|           | 87-Fr-202  | 0.23 с +8-4  | (3+)       | 202,003 | 3,062     | 1559,2810 |
|           | 87-Fr-203  | 0.55 с       | (9/2-)     | 203,001 | 0,976     | 1569,4370 |
|           | 87-Fr-204  | 1.7 с        | (3+)       | 204,001 | 0,552     | 1577,9330 |
|           | 87-Fr-205  | 3.85 с       | (9/2-)     | 204,999 | -1,245    | 1587,8009 |
|           | 87-Fr-206  | 16 с         | (2+,3+)    | 205,998 | -1,409    | 1596,0372 |
|           | 87-Fr-207  | 14.8 с       | 9/2-       | 206,997 | -2,925    | 1605,6245 |
|           | 87-Fr-208  | 59.1 с       | 7+         | 207,997 | -2,670    | 1613,4402 |
|           | 87-Fr-209  | 50.0 с       | 9/2-       | 208,996 | -3,805    | 1622,6465 |
|           | 87-Fr-210  | 3.18 мин     | 6+         | 209,996 | -3,355    | 1630,2680 |
|           | 87-Fr-211  | 3.10 мин     | 9/2-       | 210,996 | -4,164    | 1639,1488 |
|           | 87-Fr-212  | 20.0 мин     | 5+         | 211,996 | -3,544    | 1646,6000 |
|           | 87-Fr-213  | 34.6 с       | 9/2-       | 212,996 | -3,563    | 1654,6901 |
|           | 87-Fr-214  | 5.0 мс       | (1-)       | 213,999 | -0,974    | 1660,1720 |
| 87-Fr-215 | 86 нс      | 9/2-         | 215,000    | 0,304   | 1666,9660 |           |
| 87-Fr-216 | 0.70 мкс   | (1-)         | 216,003    | 2,969   | 1672,3715 |           |



|           |           |              |              |         |           |           |
|-----------|-----------|--------------|--------------|---------|-----------|-----------|
|           | 87-Fr-217 | 22 мкс       | 9/2-         | 217,005 | 4,300     | 1679,1121 |
|           | 87-Fr-218 | 1.0 мс       | 1-           | 218,008 | 7,045     | 1684,4384 |
|           | 87-Fr-219 | 20 мс        | 9/2-         | 219,009 | 8,608     | 1690,9472 |
|           | 87-Fr-220 | 27.4 с       | 1+           | 220,012 | 11,469    | 1696,1568 |
|           | 87-Fr-221 | 4.9 мин      | 5/2-         | 221,014 | 13,270    | 1702,4279 |
|           | 87-Fr-222 | 14.2 мин     | 2-           | 222,018 | 16,342    | 1707,4268 |
|           | 87-Fr-223 | 22.00 мин    | 3/2(-)       | 223,020 | 18,379    | 1713,4612 |
|           | 87-Fr-224 | 3.33 мин     | 1-           | 224,023 | 21,644    | 1718,2678 |
|           | 87-Fr-225 | 4.0 мин      | 3/2-         | 225,026 | 23,853    | 1724,1302 |
|           | 87-Fr-226 | 49 с         | 1-           | 226,029 | 27,333    | 1728,7210 |
|           | 87-Fr-227 | 2.47 мин     | 1/2+         | 227,032 | 29,652    | 1734,4731 |
|           | 87-Fr-228 | 38 с         | 2-           | 228,036 | 33,276    | 1738,9210 |
|           | 87-Fr-229 | 50.2 с       | (1/2+)       | 229,038 | 35,793    | 1744,4750 |
|           | 87-Fr-230 | 19.1 с       |              | 230,043 | 39,598    | 1748,7410 |
|           | 87-Fr-231 | 17.5 с       |              | 231,045 | 42,296    | 1754,1140 |
|           | 87-Fr-232 | 5 с          |              | 232,050 | 46,253    | 1758,2290 |
| Радий     | 88-Ra-202 | 0.7 мс +33-3 | 0+           |         | 0,000     |           |
|           | 88-Ra-203 | 1.1 мс +50-5 | (3/2-)       | 203,009 | 8,579     | 1561,0520 |
|           | 88-Ra-204 | 59 мс +12-9  | 0+           | 204,006 | 6,034     | 1571,6690 |
|           | 88-Ra-205 | 0.21 с +6-4  | (3/2-)       | 205,006 | 5,763     | 1580,0110 |
|           | 88-Ra-206 | 0.24 с       | 0+           | 206,004 | 3,523     | 1590,3220 |
|           | 88-Ra-207 | 1.3 с        | (5/2-, 3/2-) | 207,004 | 3,472     | 1598,4450 |
|           | 88-Ra-208 | 1.3 с        | 0+           | 208,002 | 1,654     | 1608,3340 |
|           | 88-Ra-209 | 4.6 с        | 5/2-         | 209,002 | 1,811     | 1616,2490 |
|           | 88-Ra-210 | 3.7 с        | 0+           | 210,000 | 0,416     | 1625,7150 |
|           | 88-Ra-211 | 13 с         | 5/2(-)       | 211,001 | 0,833     | 1633,3693 |
|           | 88-Ra-212 | 13.0 с       | 0+           | 212,000 | -0,202    | 1642,4750 |
|           | 88-Ra-213 | 2.74 мин     | 1/2-         | 213,000 | 0,322     | 1650,0225 |
|           | 88-Ra-214 | 2.46 с       | 0+           | 214,000 | 0,085     | 1658,3311 |
|           | 88-Ra-215 | 1.59 мс      | (9/2+)       | 215,003 | 2,519     | 1663,9684 |
|           | 88-Ra-216 | 182 нс       | 0+           | 216,004 | 3,277     | 1671,2813 |
|           | 88-Ra-217 | 1.6 мкс      | (9/2+)       | 217,006 | 5,874     | 1676,7559 |
|           | 88-Ra-218 | 25.6 мкс     | 0+           | 218,007 | 6,636     | 1684,0654 |
|           | 88-Ra-219 | 10 мс        | (7/2+)       | 219,010 | 9,379     | 1689,3936 |
|           | 88-Ra-220 | 18 мс        | 0+           | 220,011 | 10,260    | 1696,5838 |
|           | 88-Ra-221 | 28 с         | 5/2+         | 221,014 | 12,955    | 1701,9602 |
|           | 88-Ra-222 | 38.0 с       | 0+           | 222,015 | 14,309    | 1708,6771 |
|           | 88-Ra-223 | 11.435 дн.   | 3/2+         | 223,018 | 17,230    | 1713,8279 |
|           | 88-Ra-224 | 3.66 дн.     | 0+           | 224,020 | 18,818    | 1720,3112 |
|           | 88-Ra-225 | 14.9 дн.     | 1/2+         | 225,024 | 21,987    | 1725,2131 |
|           | 88-Ra-226 | 1600 лет     | 0+           | 226,025 | 23,662    | 1731,6095 |
|           | 88-Ra-227 | 42.2 мин     | 3/2+         | 227,029 | 27,172    | 1736,1709 |
| 88-Ra-228 | 5.75 лет  | 0+           | 228,031      | 28,936  | 1742,4785 |           |
| 88-Ra-229 | 4.0 мин   | 5/2(+)       | 229,035      | 32,435  | 1747,0509 |           |
| 88-Ra-230 | 93 мин    | 0+           | 230,037      | 34,544  | 1753,0129 |           |
| 88-Ra-231 | 103 с     | (7/2-, 1/2+) | 231,041      | 38,396  | 1757,2320 |           |
| 88-Ra-232 | 250 с     | 0+           | 232,044      | 40,700  | 1763,0000 |           |
| 88-Ra-233 | 30 с      | (1/2+)       | 233,048      | 44,707  | 1767,0640 |           |
| 88-Ra-234 | 30 с      | 0+           | 234,051      | 47,085  | 1772,7580 |           |
| Активный  | 89-Ac-207 | 27 мс +11-6  | (9/2-)       | 207,012 | 11,265    | 1589,8690 |
|           | 89-Ac-208 | 95 мс +24-16 | (3+)         | 208,011 | 10,698    | 1598,5080 |
|           | 89-Ac-209 | 0.10 с       | (9/2-)       | 209,010 | 8,913     | 1608,3638 |

|           |                 |               |         |         |           |           |
|-----------|-----------------|---------------|---------|---------|-----------|-----------|
|           | 89-Ас-210       | 0.35 с        |         | 210,009 | 8,623     | 1616,7257 |
|           | 89-Ас-211       | 0.25 с        |         | 211,008 | 7,124     | 1626,2954 |
|           | 89-Ас-212       | 0.93 с        |         | 212,008 | 7,276     | 1634,2147 |
|           | 89-Ас-213       | 0.80 с        |         | 213,007 | 6,123     | 1643,4390 |
|           | 89-Ас-214       | 8.2 с         |         | 214,007 | 6,421     | 1651,2128 |
|           | 89-Ас-215       | 0.17 с        | 9/2-    | 215,006 | 6,009     | 1659,6960 |
|           | 89-Ас-216       | 0.33 мс       | (1-)    | 216,009 | 8,124     | 1665,6525 |
|           | 89-Ас-217       | 69 нс         | 9/2-    | 217,009 | 8,693     | 1673,1543 |
|           | 89-Ас-218       | 1.08 мкс      | (1-)    | 218,012 | 10,829    | 1679,0903 |
|           | 89-Ас-219       | 11.8 мкс      | 9/2-    | 219,012 | 11,555    | 1686,4351 |
|           | 89-Ас-220       | 26.4 мс       | (3-)    | 220,015 | 13,741    | 1692,3201 |
|           | 89-Ас-221       | 52 мс         |         | 221,016 | 14,509    | 1699,6242 |
|           | 89-Ас-222       | 5.0 с         | 1-      | 222,018 | 16,607    | 1705,5967 |
|           | 89-Ас-223       | 2.10 мин      | (5/2-)  | 223,019 | 17,816    | 1712,4598 |
|           | 89-Ас-224       | 2.78 ч        | 0-      | 224,022 | 20,221    | 1718,1256 |
|           | 89-Ас-225       | 10.0 дн.      | (3/2-)  | 225,023 | 21,630    | 1724,7884 |
|           | 89-Ас-226       | 29.37 ч       | -1      | 226,026 | 24,303    | 1730,1870 |
|           | 89-Ас-227       | 21.773 лет    | 3/2-    | 227,028 | 25,846    | 1736,7147 |
|           | 89-Ас-228       | 6.15 ч        | 3+      | 228,031 | 28,890    | 1741,7420 |
|           | 89-Ас-229       | 62.7 мин      | (3/2+)  | 229,033 | 30,675    | 1748,0286 |
|           | 89-Ас-230       | 122 с         | (1+)    | 230,036 | 33,557    | 1753,2176 |
|           | 89-Ас-231       | 7.5 мин       | (1/2+)  | 231,039 | 35,910    | 1758,9356 |
|           | 89-Ас-232       | 119 с         | (1+)    | 232,042 | 39,144    | 1763,7738 |
|           | 89-Ас-233       | 145 с         | (1/2+)  | 233,045 | 41,498    | 1769,4910 |
|           | 89-Ас-234       | 44 с          |         | 234,048 | 45,103    | 1773,9570 |
|           | 89-Ас-235       | 40 с          |         | 235,051 | 47,601    | 1779,5300 |
|           | 89-Ас-236       | 2 мин         |         | 236,055 | 51,398    | 1783,8050 |
| Торий     | 90-Th-209       | 3.8 мс +69-15 | (5/2-)  |         | 0,000     |           |
|           | 90-Th-210       | 9 мс +17-4    | 0+      | 210,015 | 14,001    | 1610,5650 |
|           | 90-Th-211       | 37 мс +28-11  |         | 211,015 | 13,840    | 1618,7980 |
|           | 90-Th-212       | 30 мс +20-10  | 0+      | 212,013 | 12,032    | 1628,6770 |
|           | 90-Th-213       | 140 мс        |         | 213,013 | 12,074    | 1636,7060 |
|           | 90-Th-214       | 100 мс        | 0+      | 214,011 | 10,666    | 1646,1850 |
|           | 90-Th-215       | 1.2 с         | (1/2-)  | 215,012 | 10,923    | 1653,9993 |
|           | 90-Th-216       | 0.028 с       | 0+      | 216,011 | 10,294    | 1662,7000 |
|           | 90-Th-217       | 0.252 мс      | (9/2+)  | 217,013 | 12,171    | 1668,8942 |
|           | 90-Th-218       | 109 нс        | 0+      | 218,013 | 12,359    | 1676,7777 |
|           | 90-Th-219       | 1.05 мкс      |         | 219,016 | 14,458    | 1682,7499 |
|           | 90-Th-220       | 9.7 мкс       | 0+      | 220,016 | 14,655    | 1690,6239 |
|           | 90-Th-221       | 1.68 мс       | (7/2+)  | 221,018 | 16,927    | 1696,4239 |
|           | 90-Th-222       | 2.8 мс        | 0+      | 222,018 | 17,190    | 1704,2319 |
|           | 90-Th-223       | 0.60 с        | (5/2+)  | 223,021 | 19,371    | 1710,1226 |
|           | 90-Th-224       | 1.05 с        | 0+      | 224,021 | 19,989    | 1717,5753 |
|           | 90-Th-225       | 8.72 мин      | (3/2+)  | 225,024 | 22,301    | 1723,3345 |
|           | 90-Th-226       | 30.57 мин     | 0+      | 226,025 | 23,186    | 1730,5216 |
|           | 90-Th-227       | 18.72 дн.     | (1/2+)  | 227,028 | 25,801    | 1735,9772 |
|           | 90-Th-228       | 1.9116 лет    | 0+      | 228,029 | 26,763    | 1743,0867 |
|           | 90-Th-229       | 7340 лет      | 5/2+    | 229,032 | 29,580    | 1748,3412 |
|           | 90-Th-230       | 7.538e+4 лет  | 0+      | 230,033 | 30,857    | 1755,1352 |
| 90-Th-231 | 25.52 ч<br>100% | 5/2+          | 231,036 | 33,810  | 1760,2533 |           |
| 90-Th-232 | 1.405e+10 лет   | 0+            | 232,038 | 35,444  | 1766,6914 |           |

|                  |           |               |              |         |           |           |
|------------------|-----------|---------------|--------------|---------|-----------|-----------|
|                  | 90-Th-233 | 22.3 мин      | 1/2+         | 233,042 | 38,729    | 1771,4778 |
|                  | 90-Th-234 | 24.10 дн.     | 0+           | 234,044 | 40,609    | 1777,6688 |
|                  | 90-Th-235 | 7.1 мин       | (1/2+)       | 235,048 | 44,250    | 1782,0990 |
|                  | 90-Th-236 | 37.5 мин      | 0+           | 236,050 | 46,305    | 1788,1160 |
|                  | 90-Th-237 | 5.0 мин       | (5/2+)       | 237,054 | 50,202    | 1792,2900 |
|                  | 90-Th-238 | 20 мин        | 0+           | 238,056 | 52,390    | 1798,1730 |
| Протакти-<br>ний | 91-Pa-212 | 5.1 мс +61-19 |              |         | 0,000     |           |
|                  | 91-Pa-213 | 5.3 мс +40-16 | (9/2-)       | 213,021 | 19,732    | 1628,2656 |
|                  | 91-Pa-214 | 17 мс         |              | 214,021 | 19,318    | 1636,7505 |
|                  | 91-Pa-215 | 15 мс         | (9/2-)       | 215,019 | 17,789    | 1646,3509 |
|                  | 91-Pa-216 | 105 мс        |              | 216,019 | 17,801    | 1654,4110 |
|                  | 91-Pa-217 | 2.3 мс +5-3   | (9/2-)       | 217,018 | 17,036    | 1663,2472 |
|                  | 91-Pa-218 | 0.11 мс       |              | 218,020 | 18,637    | 1669,7170 |
|                  | 91-Pa-219 | 53 нс         | 9/2-         | 219,020 | 18,518    | 1677,9071 |
|                  | 91-Pa-221 | 4.9 мкс       | 9/2-         | 221,022 | 20,366    | 1692,2022 |
|                  | 91-Pa-222 | 3.3 мс        |              | 222,024 | 22,100    | 1698,5390 |
|                  | 91-Pa-223 | 5 мс          |              | 223,024 | 22,322    | 1706,3887 |
|                  | 91-Pa-224 | 0.85 с        |              | 224,026 | 23,860    | 1712,9221 |
|                  | 91-Pa-225 | 1.7 с         |              | 225,026 | 24,326    | 1720,5274 |
|                  | 91-Pa-226 | 1.8 мин       |              | 226,028 | 26,019    | 1726,9056 |
|                  | 91-Pa-227 | 38.3 мин      | (5/2-)       | 227,029 | 26,821    | 1734,1755 |
|                  | 91-Pa-228 | 22 ч          | 3+           | 228,031 | 28,911    | 1740,1567 |
|                  | 91-Pa-229 | 1.50 дн.      | (5/2+)       | 229,032 | 29,890    | 1747,2484 |
|                  | 91-Pa-230 | 17.4 дн.      | (2-)         | 230,035 | 32,167    | 1753,0432 |
|                  | 91-Pa-231 | 32760 лет     | 3/2-         | 231,036 | 33,421    | 1759,8604 |
|                  | 91-Pa-232 | 1.31 дн.      | (2-)         | 232,039 | 35,939    | 1765,4141 |
|                  | 91-Pa-233 | 26.967 дн.    | 3/2-         | 233,040 | 37,484    | 1771,9405 |
|                  | 91-Pa-234 | 6.70 ч        | 4+           | 234,043 | 40,336    | 1777,1595 |
|                  | 91-Pa-235 | 24.5 мин      | (3/2-)       | 235,045 | 42,324    | 1783,2426 |
|                  | 91-Pa-236 | 9.1 мин       | 1(-)         | 236,049 | 45,341    | 1788,2974 |
| 91-Pa-237        | 8.7 мин   | (1/2+)        | 237,051      | 47,636  | 1794,0733 |           |
| 91-Pa-238        | 2.3 мин   | (3-)          | 238,054      | 50,764  | 1799,0170 |           |
| 91-Pa-239        | 106 мин   | (1/2+)        | 239,057      | 53,216  | 1804,6360 |           |
| 91-Pa-240        | 2 мин     |               | 240,061      | 56,802  | 1809,1210 |           |
| Уран             | 92-U-218  | 1.5 мс +73-7  | 0+           | 218,023 | 21,878    | 1665,6940 |
|                  | 92-U-219  | 42 мкс +34-13 | (9/2+)       | 219,025 | 23,209    | 1672,4346 |
|                  | 92-U-220  | 60 нс         | 0+           | 220,025 | 23,019    | 1680,6960 |
|                  | 92-U-221  | 0.7 мкс       |              | 221,026 | 24,546    | 1687,2400 |
|                  | 92-U-222  | 1.0 мкс +10-4 | 0+           | 222,026 | 24,284    | 1695,5730 |
|                  | 92-U-223  | 55 мкс        | (7/2+)       | 223,028 | 25,824    | 1702,1047 |
|                  | 92-U-224  | 0.9 мс        | 0+           | 224,028 | 25,700    | 1710,2998 |
|                  | 92-U-225  | 60 мс         |              | 225,029 | 27,371    | 1716,6998 |
|                  | 92-U-226  | 0.35 с        | 0+           | 226,029 | 27,330    | 1724,8126 |
|                  | 92-U-227  | 1.1 мин       | (3/2+)       | 227,031 | 29,007    | 1731,2070 |
|                  | 92-U-228  | 9.1 мин       | 0+           | 228,031 | 29,218    | 1739,0675 |
|                  | 92-U-229  | 58 мин        | (3/2+)       | 229,033 | 31,201    | 1745,1550 |
|                  | 92-U-230  | 20.8 дн.      | 0+           | 230,034 | 31,603    | 1752,8246 |
|                  | 92-U-231  | 4.2 дн.       | (5/2-)       | 231,036 | 33,803    | 1758,6959 |
|                  | 92-U-231  | 4.2 дн.       | (3/2+, 5/2+) | 231,036 | 33,803    | 1758,6959 |
|                  | 92-U-232  | 68.9 лет      | 0+           | 232,037 | 34,602    | 1765,9688 |
|                  | 92-U-233  | 1.592e+5 лет  | 5/2+         | 233,040 | 36,913    | 1771,7283 |

|           |            |                                    |         |         |           |           |
|-----------|------------|------------------------------------|---------|---------|-----------|-----------|
|           | 92-U-234   | 0.0054%<br>2.455e+5 лет<br>0.7204% | 0+      | 234,041 | 38,141    | 1778,5724 |
|           | 92-U-235   | 703.8e+6 лет                       | 7/2-    | 235,044 | 40,914    | 1783,8703 |
|           | 92-U-236   | 2.342e+7 лет                       | 0+      | 236,046 | 42,441    | 1790,4150 |
|           | 92-U-237   | 6.75 дн.<br>99.2742%               | 1/2+    | 237,049 | 45,386    | 1795,5409 |
|           | 92-U-238   | 4.468e+9 лет                       | 0+      | 238,051 | 47,304    | 1801,6947 |
|           | 92-U-239   | 23.45 мин                          | 5/2+    | 239,054 | 50,569    | 1806,5009 |
|           | 92-U-240   | 14.1 ч                             | 0+      | 240,057 | 52,709    | 1812,4317 |
|           | 92-U-241   | 5 мин                              |         | 241,060 | 56,197    | 1817,0150 |
|           | 92-U-242   | 16.8 мин 5                         | 0+      | 242,063 | 58,614    | 1822,6690 |
| Нептуний  | 93-Np-225  | 2 мкс                              | (9/2-)  | 225,034 | 31,577    | 1711,7114 |
|           | 93-Np-226  | 35 мс                              |         | 226,035 | 32,723    | 1718,6380 |
|           | 93-Np-227  | 0.51 с                             |         | 227,035 | 32,563    | 1726,8680 |
|           | 93-Np-228  | 61.4 с                             |         | 228,036 | 33,701    | 1733,8010 |
|           | 93-Np-229  | 4.0 мин                            |         | 229,036 | 33,764    | 1741,8103 |
|           | 93-Np-230  | 4.6 мин                            |         | 230,038 | 35,222    | 1748,4232 |
|           | 93-Np-231  | 48.8 мин                           | (5/2)   | 231,038 | 35,614    | 1756,1027 |
|           | 93-Np-232  | 14.7 мин                           | (4+)    | 232,040 | 37,352    | 1762,4360 |
|           | 93-Np-233  | 36.2 мин                           | (5/2+)  | 233,041 | 37,942    | 1769,9174 |
|           | 93-Np-234  | 4.4 дн.                            | (0+)    | 234,043 | 39,950    | 1775,9802 |
|           | 93-Np-235  | 396.1 дн.                          | 5/2+    | 235,044 | 41,038    | 1782,9642 |
|           | 93-Np-236  | 154e+3 лет                         | (6-)    | 236,047 | 43,370    | 1788,7032 |
|           | 93-Np-237  | 2.144e+6 лет                       | 5/2+    | 237,048 | 44,868    | 1795,2771 |
|           | 93-Np-238  | 2.117 дн.                          | 2+      | 238,051 | 47,451    | 1800,7652 |
| 93-Np-239 | 2.3565 дн. | 5/2+                               | 239,053 | 49,305  | 1806,9820 |           |
| 93-Np-240 | 7.22 мин   | 1(+)                               | 240,056 | 52,321  | 1812,0377 |           |
| 93-Np-240 | 61.9 мин   | (5+)                               | 240,056 | 52,321  | 1812,0377 |           |
| 93-Np-241 | 13.9 мин   | (5/2+)                             | 241,058 | 54,256  | 1818,1739 |           |
| 93-Np-243 | 1.85 мин   | (5/2-)                             | 243,064 | 59,870  | 1828,7030 |           |
| 93-Np-244 | 2.29 мин   | (7-)                               | 244,068 | 63,202  | 1833,4420 |           |
| Плутоний  | 94-Pu-228  | 0.2 с                              | 0+      | 228,039 | 36,075    | 1730,6458 |
|           | 94-Pu-229  | 2 мкс                              | (3/2+)  | 229,040 | 37,389    | 1737,4025 |
|           | 94-Pu-230  | 200 с                              | 0+      | 230,040 | 36,930    | 1745,9334 |
|           | 94-Pu-231  | 8.6 мин                            | (3/2+)  | 231,041 | 38,432    | 1752,5030 |
|           | 94-Pu-232  | 34.1 мин                           | 0+      | 232,041 | 38,358    | 1760,6473 |
|           | 94-Pu-233  | 20.9 мин                           |         | 233,043 | 40,043    | 1767,0343 |
|           | 94-Pu-234  | 8.8 ч                              | 0+      | 234,043 | 40,338    | 1774,8103 |
|           | 94-Pu-235  | 25.3 мин                           | (5/2+)  | 235,045 | 42,179    | 1781,0402 |
|           | 94-Pu-236  | 2.858 лет                          | 0+      | 236,046 | 42,894    | 1788,3975 |
|           | 94-Pu-237  | 45.2 дн.                           | 7/2-    | 237,048 | 45,088    | 1794,2745 |
|           | 94-Pu-238  | 87.7 лет                           | 0+      | 238,050 | 46,159    | 1801,2749 |
|           | 94-Pu-239  | 24110 лет                          | 1/2+    | 239,052 | 48,583    | 1806,9215 |
|           | 94-Pu-240  | 6564 лет                           | 0+      | 240,054 | 50,121    | 1813,4549 |
|           | 94-Pu-241  | 14.290 лет                         | 5/2+    | 241,057 | 52,951    | 1818,6965 |
|           | 94-Pu-242  | 3.733e+5 лет                       | 0+      | 242,059 | 54,713    | 1825,0059 |
|           | 94-Pu-243  | 4.956 ч                            | 7/2+    | 243,062 | 57,750    | 1830,0404 |
|           | 94-Pu-244  | 8.00e+7 лет                        | 0+      | 244,064 | 59,800    | 1836,0618 |
| 94-Pu-245 | 10.5 ч     | (9/2-)                             | 245,068 | 63,098  | 1840,8347 |           |
| 94-Pu-246 | 10.84 дн.  | 0+                                 | 246,070 | 65,389  | 1846,6148 |           |
| 94-Pu-247 | 2.27 дн.   |                                    | 247,074 | 68,996  | 1851,0800 |           |

|           |           |             |         |         |           |           |
|-----------|-----------|-------------|---------|---------|-----------|-----------|
| Америций  | 95-Am-231 | 10 с        |         | 231,046 | 42,439    | 1747,7130 |
|           | 95-Am-232 | 79 с        |         | 232,047 | 43,398    | 1754,8250 |
|           | 95-Am-233 | 2 мин       |         | 233,046 | 43,289    | 1763,0060 |
|           | 95-Am-234 | 2.32 мин    |         | 234,048 | 44,520    | 1769,8460 |
|           | 95-Am-235 | 15 мс       |         | 235,048 | 44,739    | 1777,6980 |
|           | 95-Am-236 | 4.4 мин     |         | 236,050 | 46,174    | 1784,3350 |
|           | 95-Am-237 | 73.0 мин    | 5/2(-)  | 237,050 | 46,547    | 1792,0325 |
|           | 95-Am-238 | 98 мин      | 1+      | 238,052 | 48,417    | 1798,2342 |
|           | 95-Am-239 | 11.9 ч      | (5/2)-  | 239,053 | 49,386    | 1805,3362 |
|           | 95-Am-240 | 50.8 ч      | (3-)    | 240,055 | 51,500    | 1811,2936 |
|           | 95-Am-241 | 432.2 лет   | 5/2-    | 241,057 | 52,930    | 1817,9350 |
|           | 95-Am-242 | 16.02 ч     | 1-      | 242,060 | 55,464    | 1823,4726 |
|           | 95-Am-243 | 7370 лет    | 5/2-    | 243,061 | 57,168    | 1829,8396 |
|           | 95-Am-244 | 10.1 ч      | (6-)    | 244,064 | 59,876    | 1835,2033 |
|           | 95-Am-245 | 2.05 ч      | (5/2)+  | 245,066 | 61,893    | 1841,2570 |
| 95-Am-246 | 39 мин    | (7-)        | 246,070 | 64,989  | 1846,2330 |           |
| 95-Am-247 | 23.0 мин  | (5/2)       | 247,072 | 67,148  | 1852,1460 |           |
| 95-Am-248 | 10 мин    |             | 248,076 | 70,556  | 1856,8080 |           |
| 95-Am-249 | 2 мин     |             | 249,078 | 73,104  | 1862,3320 |           |
| Кюрий     | 96-Cm-232 | 1 мин ?     | 0+      |         | 0,000     |           |
|           | 96-Cm-233 | 1 мин       |         | 233,051 | 47,320    | 1758,1920 |
|           | 96-Cm-234 | 2 мин       | 0+      | 234,050 | 46,798    | 1766,7850 |
|           | 96-Cm-235 | 5 мин       |         | 235,052 | 48,057    | 1773,5980 |
|           | 96-Cm-236 | 10 мин      | 0+      | 236,051 | 47,883    | 1781,8430 |
|           | 96-Cm-237 | 20 мин      |         | 237,053 | 49,268    | 1788,5300 |
|           | 96-Cm-238 | 2.4 ч       | 0+      | 238,053 | 49,384    | 1796,4845 |
|           | 96-Cm-239 | 2.9 ч       | (7/2-)  | 239,055 | 51,186    | 1802,7540 |
|           | 96-Cm-240 | 27 дн.      | 0+      | 240,056 | 51,716    | 1810,2959 |
|           | 96-Cm-241 | 32.8 дн.    | 1/2+    | 241,058 | 53,698    | 1816,3853 |
|           | 96-Cm-242 | 162.8 дн.   | 0+      | 242,059 | 54,799    | 1823,3550 |
|           | 96-Cm-243 | 29.1 лет    | 5/2+    | 243,061 | 57,177    | 1829,0483 |
|           | 96-Cm-244 | 18.10 лет   | 0+      | 244,063 | 58,448    | 1835,8490 |
|           | 96-Cm-245 | 8500 лет    | 7/2+    | 245,065 | 60,999    | 1841,3687 |
|           | 96-Cm-246 | 4760 лет    | 0+      | 246,067 | 62,613    | 1847,8267 |
|           | 96-Cm-247 | 1.56e+7 лет | 9/2-    | 247,070 | 65,528    | 1852,9832 |
|           | 96-Cm-248 | 3.48e+5 лет | 0+      | 248,072 | 67,386    | 1859,1958 |
| 96-Cm-249 | 64.15 мин | 1/2(+)      | 249,076 | 70,744  | 1863,9092 |           |
| 96-Cm-250 | 9700 лет  | 0+          | 250,078 | 72,983  | 1869,7416 |           |
| 96-Cm-251 | 16.8 мин  | (1/2+)      | 251,082 | 76,641  | 1874,1548 |           |
| 96-Cm-252 | 2 дн.     | 0+          | 252,085 | 79,056  | 1879,8120 |           |
| Берклий   | 97-Bk-235 | 20 с        |         | 235,057 | 52,704    | 1768,1690 |
|           | 97-Bk-236 | 1 мин       |         | 236,057 | 53,403    | 1775,5410 |
|           | 97-Bk-237 | 1 мин       |         | 237,057 | 53,214    | 1783,8020 |
|           | 97-Bk-238 | 144 с       |         | 238,058 | 54,274    | 1790,8120 |
|           | 97-Bk-239 | 3 мин       | (7/2+)  | 239,058 | 54,364    | 1798,7940 |
|           | 97-Bk-240 | 4.8 мин     |         | 240,060 | 55,656    | 1805,5740 |
|           | 97-Bk-241 | 3 мин       | (7/2+)  | 241,060 | 56,098    | 1813,2030 |
|           | 97-Bk-242 | 7.0 мин     |         | 242,062 | 57,799    | 1819,5730 |
|           | 97-Bk-243 | 4.5 ч       | (3/2-)  | 243,063 | 58,686    | 1826,7576 |
|           | 97-Bk-244 | 4.35 ч      | (1-)    | 244,065 | 60,703    | 1832,8110 |
|           | 97-Bk-245 | 4.94 дн.    | 3/2-    | 245,066 | 61,810    | 1839,7762 |
|           | 97-Bk-247 | 1380 лет    | (3/2-)  | 247,070 | 65,483    | 1852,2458 |

|            |            |             |         |         |           |           |
|------------|------------|-------------|---------|---------|-----------|-----------|
|            | 97-Bk-248  | 9 лет       |         | 248,073 | 68,074    | 1857,7260 |
|            | 97-Bk-249  | 330 дн.     | 7/2+    | 249,075 | 69,843    | 1864,0277 |
|            | 97-Bk-250  | 3.217 ч     | 2-      | 250,078 | 72,946    | 1868,9966 |
|            | 97-Bk-251  | 55.6 мин    | (3/2-)  | 251,081 | 75,221    | 1874,7924 |
|            | 97-Bk-252  | 2 мин       |         | 252,084 | 78,528    | 1879,5570 |
|            | 97-Bk-253  | 10 мин      |         | 253,087 | 80,929    | 1885,2280 |
|            | 97-Bk-254  | 2 мин       |         | 254,091 | 84,393    | 1889,8340 |
| Калифорний | 98-Cf-237  | 2.1 с       |         | 237,062 | 57,818    | 1778,4150 |
|            | 98-Cf-238  | 21. мс      | 0+      | 238,061 | 57,203    | 1787,1010 |
|            | 98-Cf-239  | 39 с +37-12 |         | 239,063 | 58,292    | 1794,0840 |
|            | 98-Cf-240  | 1.06 мин    | 0+      | 240,062 | 58,027    | 1802,4200 |
|            | 98-Cf-241  | 3.78 мин    |         | 241,064 | 59,351    | 1809,1670 |
|            | 98-Cf-242  | 3.4 мин     | 0+      | 242,064 | 59,326    | 1817,2638 |
|            | 98-Cf-243  | 10.7 мин    | (1/2+)  | 243,065 | 60,939    | 1823,7220 |
|            | 98-Cf-244  | 19.4 мин    | 0+      | 244,066 | 61,470    | 1831,2625 |
|            | 98-Cf-245  | 45.0 мин    | (5/2+)  | 245,068 | 63,378    | 1837,4250 |
|            | 98-Cf-246  | 35.7 ч      | 0+      | 246,069 | 64,086    | 1844,7891 |
|            | 98-Cf-247  | 3.11 ч      | (7/2+)  | 247,071 | 66,129    | 1850,8174 |
|            | 98-Cf-248  | 333.5 дн.   | 0+      | 248,072 | 67,233    | 1857,7840 |
|            | 98-Cf-249  | 351 лет     | 9/2-    | 249,075 | 69,719    | 1863,3694 |
|            | 98-Cf-250  | 13.08 лет   | 0+      | 250,076 | 71,166    | 1869,9940 |
|            | 98-Cf-251  | 898 лет     | 1/2+    | 251,080 | 74,128    | 1875,1031 |
|            | 98-Cf-252  | 2.645 лет   | 0+      | 252,082 | 76,028    | 1881,2746 |
| 98-Cf-253  | 17.81 дн.  | (7/2+)      | 253,085 | 79,295  | 1886,0790 |           |
| 98-Cf-254  | 60.5 дн.   | 0+          | 254,087 | 81,335  | 1892,1109 |           |
| 98-Cf-255  | 85 мин     | (7/2+)      | 255,091 | 84,803  | 1896,7140 |           |
| 98-Cf-256  | 12.3 мин   | 0+          | 256,093 | 87,039  | 1902,5490 |           |
| Эйнштейний | 99-Es-241  | 8 с +6-4    | (3/2-)  | 241,069 | 63,959    | 1803,7770 |
|            | 99-Es-242  | 23.9 с      |         | 242,070 | 64,924    | 1810,8830 |
|            | 99-Es-243  | 19 с        |         | 243,070 | 64,861    | 1819,0180 |
|            | 99-Es-244  | 37 с        |         | 244,071 | 66,107    | 1825,8430 |
|            | 99-Es-245  | 1.1 мин     | (3/2-)  | 245,071 | 66,432    | 1833,5890 |
|            | 99-Es-247  | 4.55 мин    | (7/2+)  | 247,074 | 68,604    | 1847,5600 |
|            | 99-Es-248  | 27 мин      | (2,-0+) | 248,075 | 70,289    | 1853,9460 |
|            | 99-Es-249  | 102.2 мин   | 7/2+    | 249,076 | 71,170    | 1861,1360 |
|            | 99-Es-250  | 2.22 ч      | 1(-)    | 250,079 | 73,266    | 1867,1120 |
|            | 99-Es-250  | 8.6 ч       | (6+)    | 250,079 | 73,266    | 1867,1120 |
|            | 99-Es-251  | 33 ч        | (3/2-)  | 251,080 | 74,504    | 1873,9448 |
|            | 99-Es-252  | 471.7 дн.   | (5-)    | 252,083 | 77,288    | 1879,2322 |
|            | 99-Es-253  | 20.47 дн.   | 7/2+    | 253,085 | 79,007    | 1885,5843 |
|            | 99-Es-254  | 275.7 дн.   | (7+)    | 254,088 | 81,986    | 1890,6766 |
| 99-Es-255  | 39.8 дн.   | (7/2+)      | 255,090 | 84,083  | 1896,6517 |           |
| 99-Es-256  | 25.4 мин   | (1+,-0)     | 256,094 | 87,180  | 1901,6260 |           |
| 99-Es-257  | 7.7 дн.    |             | 257,096 | 89,403  | 1907,4740 |           |
| Фермий     | 100-Fm-242 | 0.8 мс      | 0+      | 242,073 | 68,400    | 1806,6250 |
|            | 100-Fm-243 | 0.18 с +8-4 |         | 243,075 | 69,406    | 1813,6910 |
|            | 100-Fm-244 | 3.3 мс      | 0+      | 244,074 | 69,002    | 1822,1650 |
|            | 100-Fm-245 | 4.2 с       |         | 245,075 | 70,212    | 1829,0270 |
|            | 100-Fm-246 | 1.1 с       | 0+      | 246,075 | 70,124    | 1837,1857 |
|            | 100-Fm-247 | 35 с        |         |         | 71,556    |           |

|            |            |              |         |         |           |           |
|------------|------------|--------------|---------|---------|-----------|-----------|
|            | 100-Fm-248 | 36 с         | 0+      | 248,077 | 71,897    | 1851,5559 |
|            | 100-Fm-249 | 2.6 мин      | (7/2+)  | 249,079 | 73,611    | 1857,9130 |
|            | 100-Fm-250 | 33 мин       | 0+      | 250,080 | 74,068    | 1865,5279 |
|            | 100-Fm-251 | 5.30 ч       | (9/2-)  | 251,082 | 75,979    | 1871,6880 |
|            | 100-Fm-252 | 25.39 ч      | 0+      | 252,082 | 76,811    | 1878,9270 |
|            | 100-Fm-253 | 3.00 дн.     | (1/2)+  | 253,085 | 79,341    | 1884,4682 |
|            | 100-Fm-254 | 3.240 ч      | 0+      | 254,087 | 80,898    | 1890,9825 |
|            | 100-Fm-255 | 20.07 ч      | 7/2+    | 255,090 | 83,793    | 1896,1590 |
|            | 100-Fm-256 | 157.6 мин    | 0+      | 256,092 | 85,480    | 1902,5433 |
|            | 100-Fm-257 | 100.5 дн.    | (9/2+)  | 257,095 | 88,584    | 1907,5108 |
|            | 100-Fm-258 | 360 мкс      | 0+      | 258,097 | 90,419    | 1913,7470 |
|            | 100-Fm-259 | 1.5 с        |         | 259,101 | 93,697    | 1918,5400 |
|            | 100-Fm-260 | 4 мс         | 0+      |         | 0,000     |           |
| Менделевий | 101-Md-245 | 900 мкс      | (1/2-)  | 245,081 | 75,467    | 1822,9890 |
|            | 101-Md-247 | 0.38 с       |         | 247,082 | 76,200    | 1838,3990 |
|            | 101-Md-248 | 7 с          |         | 248,083 | 77,229    | 1845,4410 |
|            | 101-Md-249 | 24 с         |         | 249,083 | 77,316    | 1853,4260 |
|            | 101-Md-250 | 52 с         |         | 250,084 | 78,700    | 1860,1130 |
|            | 101-Md-251 | 4.0 мин      |         | 251,085 | 79,101    | 1867,7830 |
|            | 101-Md-252 | 2.3 мин      |         | 252,087 | 80,695    | 1874,2600 |
|            | 101-Md-253 | 6 мин +12-3  | (1/2-)  | 253,087 | 81,301    | 1881,7260 |
|            | 101-Md-254 | 10 мин       |         | 254,090 | 83,578    | 1887,5200 |
|            | 101-Md-255 | 27 мин       | (7/2-)  | 255,091 | 84,836    | 1894,3336 |
|            | 101-Md-256 | 77 мин       | (1-)    | 256,094 | 87,610    | 1899,6314 |
|            | 101-Md-257 | 5.52 ч       | (7/2-)  | 257,096 | 88,990    | 1906,3223 |
| 101-Md-258 | 51.5 дн.   | (8-)         | 258,098 | 91,683  | 1911,7010 |           |
| 101-Md-259 | 96 мин     |              | 259,101 | 93,617  | 1917,8370 |           |
| 101-Md-260 | 31.8 дн.   |              | 260,104 | 96,545  | 1922,9810 |           |
| Нобелий    | 102-No-249 |              |         | 249,088 | 81,807    | 1848,1530 |
|            | 102-No-250 | 0.25 мс      | 0+      | 250,087 | 81,499    | 1856,5310 |
|            | 102-No-251 | 0.8 с        | (7/2+)  | 251,089 | 82,866    | 1863,2360 |
|            | 102-No-252 | 2.27 с       | 0+      | 252,089 | 82,871    | 1871,3021 |
|            | 102-No-253 | 1.62 мин     | (9/2-)  | 253,091 | 84,439    | 1877,8060 |
|            | 102-No-254 | 54 с         | 0+      | 254,091 | 84,718    | 1885,5977 |
|            | 102-No-255 | 3.1 мин      | (1/2+)  | 255,093 | 86,845    | 1891,5418 |
|            | 102-No-256 | 2.91 с       | 0+      | 256,094 | 87,817    | 1898,6412 |
|            | 102-No-257 | 25 с         | (7/2+)  | 257,097 | 90,218    | 1904,3121 |
|            | 102-No-258 | 1.2 мс       | 0+      | 258,098 | 91,473    | 1911,1280 |
|            | 102-No-259 | 58 мин       |         | 259,101 | 94,103    | 1916,5690 |
|            | 102-No-260 | 106 мс       | 0+      | 260,103 | 95,605    | 1923,1390 |
| 102-No-261 |            |              | 261,106 | 98,499  | 1928,3170 |           |
| 102-No-262 | 5 мс       | 0+           | 262,108 | 100,154 | 1934,7320 |           |
| Лоуренсий  | 103-Lr-251 |              |         | 251,094 | 87,896    | 1857,4240 |
|            | 103-Lr-252 | 0.36 с +11-7 |         | 252,095 | 88,799    | 1864,5920 |
|            | 103-Lr-254 | 13 с         |         | 254,097 | 89,971    | 1879,5630 |
|            | 103-Lr-255 | 22 с         |         | 255,097 | 90,140    | 1887,4650 |
|            | 103-Lr-256 | 27 с         |         | 256,099 | 91,997    | 1893,6790 |
|            | 103-Lr-257 | 0.646 с      |         | 257,100 | 92,782    | 1900,9650 |
|            | 103-Lr-258 | 3.9 с        |         | 258,102 | 94,903    | 1906,9160 |
|            | 103-Lr-259 | 6.2 с        |         | 259,103 | 95,935    | 1913,9550 |
|            | 103-Lr-260 | 180 с        |         | 260,106 | 98,340    | 1919,6210 |

|             |            |               |        |         |         |           |
|-------------|------------|---------------|--------|---------|---------|-----------|
|             | 103-Lr-261 | 39 мин        |        | 261,107 | 99,615  | 1926,4180 |
|             | 103-Lr-262 | 3.6 ч         |        | 262,110 | 102,177 | 1931,9270 |
|             | 103-Lr-263 |               |        | 263,111 | 103,762 | 1938,4130 |
| Резерфордий | 104-Rf-254 | 23 мкс        | 0+     | 254,100 | 93,304  | 1875,4470 |
|             | 104-Rf-255 | 1.5 с         | (9/2-) | 255,101 | 94,539  | 1882,2840 |
|             | 104-Rf-256 | 6.4 мс        | 0+     | 256,101 | 94,248  | 1890,6457 |
|             | 104-Rf-257 | 4.7 с         | (1/2+) | 257,103 | 96,011  | 1896,9540 |
|             | 104-Rf-258 | 12 мс         | 0+     | 258,104 | 96,473  | 1904,5630 |
|             | 104-Rf-259 | 3.2 с         |        | 259,106 | 98,392  | 1910,7160 |
|             | 104-Rf-260 | 21 мс         | 0+     | 260,106 | 99,142  | 1918,0370 |
|             | 104-Rf-261 | 65 с          |        | 261,109 | 101,302 | 1923,9490 |
|             | 104-Rf-262 | 2.1 с         | 0+     | 262,110 | 102,388 | 1930,9340 |
|             | 104-Rf-263 | 10 мин        |        | 263,113 | 104,830 | 1936,5630 |
|             | 104-Rf-264 |               | 0+     | 264,114 | 106,170 | 1943,2950 |
| Дубний      | 105-Db-255 | 1.6 с +6-4    |        | 255,107 | 100,041 | 1876,0000 |
|             | 105-Db-256 | 1.9 с +5-3    |        | 256,108 | 100,704 | 1883,4070 |
|             | 105-Db-257 | 0.76 с +15-11 |        | 257,108 | 100,469 | 1891,7130 |
|             | 105-Db-258 | 4.4 с +9-6    |        | 258,109 | 101,941 | 1898,3130 |
|             | 105-Db-259 |               |        | 259,110 | 102,205 | 1906,1210 |
|             | 105-Db-260 | 1.52 с        |        | 260,111 | 103,794 | 1912,6030 |
|             | 105-Db-261 | 1.8 с         |        | 261,112 | 104,426 | 1920,0420 |
|             | 105-Db-262 | 34 с          |        | 262,114 | 106,333 | 1926,2060 |
|             | 105-Db-263 | 27 с +10-7    |        | 263,115 | 107,194 | 1933,4170 |
|             | 105-Db-264 |               |        | 264,117 | 109,425 | 1939,2570 |
|             | 105-Db-265 |               |        | 265,119 | 110,530 | 1946,2240 |
| Сиборгий    | 106-Sg-258 | 2.9 мс +13-7  | 0+     | 258,113 | 105,399 | 1894,0730 |
|             | 106-Sg-259 | 0.48 с +28-13 | (1/2+) | 259,115 | 106,798 | 1900,7450 |
|             | 106-Sg-260 | 3.6 мс        | 0+     | 260,114 | 106,596 | 1909,0186 |
|             | 106-Sg-261 | 0.23 с        |        | 261,116 | 108,238 | 1915,4470 |
|             | 106-Sg-262 |               | 0+     | 262,116 | 108,498 | 1923,2590 |
|             | 106-Sg-263 | 1.0 с         |        | 263,118 | 110,208 | 1929,6200 |
|             | 106-Sg-264 |               | 0+     | 264,119 | 110,777 | 1937,1230 |
|             | 106-Sg-265 | 8 с           | (9/2+) | 265,121 | 112,772 | 1943,1990 |
|             | 106-Sg-266 | 21 с +20-12   | 0+     | 266,122 | 113,575 | 1950,4680 |
|             |            | 106-Sg-269    | ?      |         |         | 0,000     |
| Борий       | 107-Bh-260 |               |        | 260,122 | 113,459 | 1901,3730 |
|             | 107-Bh-261 | 12 мс +5-3    |        | 261,122 | 113,456 | 1909,4470 |
|             | 107-Bh-262 | 102 мс        |        | 262,123 | 114,582 | 1916,3930 |
|             | 107-Bh-263 |               |        | 263,123 | 114,710 | 1924,3360 |
|             | 107-Bh-264 | 0.44 с +60-16 |        | 264,125 | 116,186 | 1930,9320 |
|             | 107-Bh-265 |               |        | 265,125 | 116,621 | 1938,5680 |
|             | 107-Bh-266 |               |        | 266,127 | 118,308 | 1944,9520 |
| Хассий      | 108-Hs-263 |               |        | 263,129 | 119,893 | 1918,3710 |
|             | 108-Hs-264 | 0.8 мс        | 0+     | 264,128 | 119,612 | 1926,7236 |
|             | 108-Hs-265 | 2.0 мс +3-2   |        | 265,130 | 121,096 | 1933,3110 |
|             | 108-Hs-266 |               | 0+     | 266,130 | 121,133 | 1941,3450 |
|             | 108-Hs-267 | 26 мс +20-10  | (9/2+) | 267,132 | 122,746 | 1947,8030 |
|             | 108-Hs-269 | 9 с           | (3/2+) | 269,134 | 124,927 | 1961,7650 |
|             | 108-Hs-273 | 1.2 с +17-6   |        |         | 0,000   |           |
|             | 108-Hs-277 | 16.5 мин      |        |         | 0,000   |           |
| Майтнерий   | 109-Mt-266 | 0.8 мс        |        | 266,138 | 128,490 | 1933,2050 |
|             | 109-Mt-267 |               |        | 267,138 | 128,105 | 1941,6620 |



### Таблица 3. Характеристики элементарных частиц

Таблица элементарных частиц состоит из двух частей:

**ЛЕПТОНЫ** – бесструктурные частицы со спином  $J=1/2$ , которые не участвуют в сильных взаимодействиях;

**АДРОНЫ** – частицы, участвующие в сильных взаимодействиях.

В таблице для лептонов приведены их символы, массы в  $MэВ$ , времена жизни  $\tau$ , лептонные заряды  $L_e, L_\mu, L_\tau$ , и основные моды распада.

Адроны подразделяются на **мезоны** – частицы с целым спином и нулевым барионным зарядом  $B=0$  и **барионы** – частицы с полуцелым спином и барионным зарядом  $B=1$ .

В таблице для адронов приведены их общепринятые символы, кварковый состав, масса в  $MэВ$ , времена жизни  $\tau$  или ширины резонансов  $\Gamma = \sum \Gamma_i = \hbar / \tau$  относительно распадов по всем каналам, спин с четностью  $J^P$ , изоспин  $I$  и основные моды распада частиц.

В таблицу не включены частицы-резонансы и обменные частицы-переносчики взаимодействия.

Таблица составлена О.Ю. Панищевым на основе данных из интернет-сайта

<http://nuclphys.sinp.msu.ru/introduction/particltab.html>.

Работа частично поддержана грантом РНП.2.1.1.741.

## ЛЕПТОНЫ (J=1/2)

| Частица    | Масса, МэВ          | Время жизни               | Лептонный заряд |         |          | Основные моды распада              |
|------------|---------------------|---------------------------|-----------------|---------|----------|------------------------------------|
|            |                     |                           | $L_e$           | $L_\mu$ | $L_\tau$ |                                    |
| $\nu_e$    | $< 7 \cdot 10^{-6}$ | Стабильно                 | +1              | 0       | 0        |                                    |
| $\nu_\mu$  | $< 0.17$            | Стабильно                 | 0               | +1      | 0        |                                    |
| $\nu_\tau$ | $< 18$              | Стабильно                 | 0               | 0       | +1       |                                    |
| $e^-$      | 0.511               | $> 4.3 \cdot 10^{23}$ лет | +1              | 0       | 0        |                                    |
| $\mu^-$    | 105.66              | $2.2 \cdot 10^{-6}$ с     | 0               | +1      | 0        | $e^- \bar{\nu}_\nu$                |
| $\tau^-$   | 1777                | $2.9 \cdot 10^{-13}$ с    | 0               | 0       | +1       | адроны + $\nu$ , $\mu\nu\bar{\nu}$ |

## АДРОНЫ: Мезоны (B=0, L=0)

| Частица            | Кварковый состав  | Масса, Мс <sup>2</sup> (МэВ) | Время жизни (с) или ширина   | Спин-четность, изоспин J <sup>P</sup> (I)          | Основные моды распада   |
|--------------------|---|------------------------------|--|--|---|
| $\pi^+, \pi^-$     | $u\bar{d}, d\bar{u}$  | 139.7                        | $2.6 \cdot 10^{-8}$  | 0 <sup>(1)</sup>                                   | $\nu\mu^+, \bar{\nu}\mu^-$  |
| $\pi^0$            | $u\bar{u} - d\bar{d}$   | 134.98                       | $8.4 \cdot 10^{-17}$   | 0 <sup>(1)</sup>                                   | $2\gamma$   |
| $K^+, K^-$         | $u\bar{s}, s\bar{u}$  | 494                          | $1.2 \cdot 10^{-8}$  | 0 <sup>(1/2)</sup>                                 | $\nu\mu^+, \bar{\nu}\mu^-, \pi^0 \pi^\pm$                                     |
| $K^0, \bar{K}^0$   | $d\bar{s}, s\bar{d}$  | 498                          | $\begin{cases} 0.89 \cdot 10^{-10} & K_S^0 \\ 5.2 \cdot 10^{-8} & K_L^0 \end{cases}$ | $\begin{matrix} 0^-(1/2) \\ 0^-(1/2) \end{matrix}$ | $\pi^+ \pi^-, \pi^0 \pi^0$<br>$\rho\pi, \pi\mu\nu, 3\pi^0, \pi^0 \pi^+ \pi^-$ |
| $\eta$             | $u\bar{u} + d\bar{d}, s\bar{s}$   | 547                          | 1.2 кэВ  | 0 <sup>(0)</sup>                                   | $2\gamma, 3\pi^0, \pi^0 \pi^+ \pi^-$  |
| $\eta'$            | $u\bar{u} + d\bar{d}, s\bar{s}$   | 958                          | 0.20 МэВ   | 0 <sup>(0)</sup>                                   | $\eta \pi^+ \pi^-, \rho^0 \gamma, \pi^0 \pi^0 \pi^0$                          |
| $\rho^\pm, \rho^0$ | $\left. \begin{matrix} u\bar{d}, d\bar{u} \\ u\bar{u} - d\bar{d} \end{matrix} \right\}$ | 770                          | 151 МэВ  | 1 <sup>(1)</sup>                                   | $\pi \pi$   |
| $\omega$           | $u\bar{u} + d\bar{d}$   | 782                          | 8.4 МэВ  | 1 <sup>(0)</sup>                                   | $\pi^+ \pi^- \pi^0$   |
| $\phi$             | $s\bar{s}$  | 1020                         | 4.4 МэВ  | 1 <sup>(0)</sup>                                   | $K^+ K^-, \pi^+ \pi^- \pi^0$  |

|                             |  |      |                      |            |            |  |
|-----------------------------|--|------|----------------------|------------|------------|--|
| $D^\pm$                     | $c\bar{d}, d\bar{c}$                         | 1869 | $1.1 \cdot 10^{-12}$ | $0^-(1/2)$ | }          | $K + \text{др.},$                                      |
| $D^0, \bar{D}^0$            | $c\bar{u}, u\bar{c}$                         | 1865 | $4.2 \cdot 10^{-13}$ | $0^-(1/2)$ |            | $e + \text{др.}, \mu + \text{др.}$                     |
| $D_S^\pm$                   | $c\bar{s}, s\bar{c}$                         | 1969 | $4.7 \cdot 10^{-13}$ | $0^-(0)$   |            | $K + \text{другие}$                                    |
| $B^\pm$<br>$B^0, \bar{B}^0$ | $u\bar{b}, b\bar{u}$<br>$d\bar{b}, b\bar{d}$ | 5279 | $1.6 \cdot 10^{-12}$ | {          | $0^-(1/2)$ | $D^0 + \text{др.}, D^* + \text{др.}$                   |
|                             |  |      |                      |            | $0^-(1/2)$ | $\nu + \text{др.}, D^+ + \text{др.}, D^* + \text{др.}$ |
| $J/\psi$                    | $c\bar{c}$                                   | 3097 | 87 кэВ               | $1^-(0)$   |            | адроны, $e^+e^-, \mu^+\mu^-$                           |
| $Y$                         | $b\bar{b}$                                   | 9460 | 53 кэВ               | $1^-(0)$   |            | $\tau^+\tau^-, e^+e^-, \mu^+\mu^-$                     |

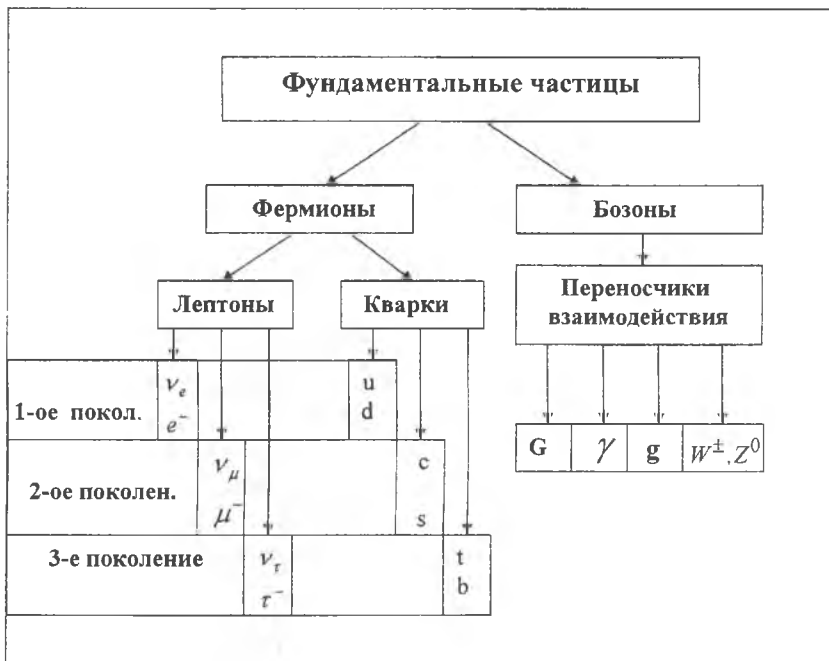
### АДРОНЫ: Барионы ( $B = 1, L = 0$ )

| Частица    | Кварковый состав | Масса, $mc^2$ (МэВ) | Время жизни ( $\tau$ ) или ширина ( $\Gamma$ ) (МэВ) | Спин-четность, изоспин $J^P(I)$ | Основные моды распада      |
|------------|------------------|---------------------|--|---------------------------------|----------------------------|
| p          | uud              | 938.27              | $> 10^{31}$ лет                                      | $1/2^+(1/2)$                    |                            |
| n          | udd              | 939.57              | $887 \pm 2$  | $1/2^+(1/2)$                    | $p e \bar{\nu}$            |
| $\Lambda$  | uds              | 1116                | $2.6 \cdot 10^{-10}$                                 | $1/2^+(0)$                      | $p \pi^-, n \pi^0$         |
| $\Sigma^+$ | uus              | 1189                | $0.80 \cdot 10^{-10}$                                | $1/2^+(1)$                      | $p \pi^0, n \pi^+$         |
| $\Sigma^0$ | uds              | 1193                | $7.4 \cdot 10^{-20}$                                 | $1/2^+(1)$                      | $\Lambda \gamma$           |
| $\Sigma^-$ | dds              | 1197                | $1.5 \cdot 10^{-10}$                                 | $1/2^+(1)$                      | $n \pi^-$                  |
| $\Xi^0$    | uss              | 1315                | $2.9 \cdot 10^{-10}$                                 | $1/2^+(1/2)$                    | $\Lambda \pi^0$            |
| $\Xi^-$    | dss              | 1321                | $1.6 \cdot 10^{-10}$                                 | $1/2^+(1/2)$                    | $\Lambda \pi^-$            |
| $\Omega^-$ | sss              | 1672                | $0.82 \cdot 10^{-10}$                                | $3/2^+(0)$                      | $\Lambda K^-, \Xi^0 \pi^-$ |

|   |  |           |                     |   |              |                           |
|---|--|-----------|---------------------|---|--------------|---------------------------|
| $\Delta^{++}$<br>$\Delta^+$<br>$\Delta^0$<br>$\Delta^-$ | $\left. \begin{array}{l} \text{uuuu} \\ \text{uud} \\ \text{udd} \\ \text{ddd} \end{array} \right\}$ | 1230-1234 | 115-125             |   | $3/2^+(3/2)$ | $(n,p) + \pi$             |
| $\Sigma^+(1385)$  | uus  | 1383      | 36                  | } | $3/2^+(1)$   | $\Lambda \pi, \Sigma \pi$ |
| $\Sigma^0(1385)$  | uds  | 1384      | 36                  |   |              |                           |
| $\Sigma^-(1385)$  | dds  | 1387      | 39                  |   |              |                           |
| $\Xi^0(1530)$   | uss  | 1532      | 9.1                 | } | $3/2^+(1/2)$ | $\Xi \pi$                 |
| $\Xi^-(1530)$   | dss  | 1535      | 9.1                 |   |              |                           |
| N(1440)   | $N^+ \text{uud}$   | 1430-1470 | 250-450             |   | $1/2^+(1/2)$ | $n(p) + \pi 2 \pi$        |
|   | $N^0 \text{udd}$   |           |                     |   |              |                           |
| N(1520)   | $N^+ \text{uud}$   | 1515-1530 | 110-135             |   | $3/2^-(1/2)$ | $n(p) + \pi(2 \pi)$       |
|   | $N^0 \text{udd}$   |           |                     |   |              |                           |
| $\Lambda_C^+$   | udc  | 2285      | $2.0 \cdot 10^{13}$ |   | $1/2^+(0)$   | $(n, p) + \text{dp}$      |
| $\Sigma_C^{++}$   | uuc  | 2453      | }                   |   | $1/2^+(1)$   | $\Lambda_C^+ \pi$         |
| $\Sigma_C^+$  | udc  | 2454      |                     |   |              |                           |
| $\Sigma_C^0$  | ddc  | 2452      |                     |   |              |                           |

K. Hagiwara et al., Phys. Rev. D66, 010001 (2002)

Таблица 4. Фундаментальные частицы



ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

| Периоды | ряды | I                                  | II                                 | III                                   | IV                                    |
|---------|------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1       | 1    | 1 <b>H</b><br>Водород<br>1,0079    |                                    |                                       |                                       |
| 2       | 2    | 3 <b>Li</b><br>Литий<br>6,941      | 4 <b>Be</b><br>Бериллий<br>9,01218 | 5 <b>B</b><br>Бор<br>10,81            | 6 <b>C</b><br>Углерод<br>12,011       |
| 3       | 3    | 11 <b>Na</b><br>Натрий<br>22,98977 | 12 <b>Mg</b><br>Магний<br>24,305   | 13 <b>Al</b><br>Алюминий<br>26,98154  | 14 <b>Si</b><br>Кремний<br>28,0855    |
| 4       | 4    | 19 <b>K</b><br>Калий<br>39,0983    | 20 <b>Ca</b><br>Кальций<br>40,08   | 21 <b>Sc</b><br>Скандий<br>44,9559    | 22 <b>Ti</b><br>Титан<br>47,88        |
|         | 5    | 29 <b>Cu</b><br>Медь<br>63,546     | 30 <b>Zn</b><br>Цинк<br>65,38      | 31 <b>Ga</b><br>Галлий<br>69,72       | 32 <b>Ge</b><br>Германий<br>72,59     |
| 5       | 6    | 37 <b>Rb</b><br>Рубидий<br>85,4678 | 38 <b>Sr</b><br>Стронций<br>87,62  | 39 <b>Y</b><br>Иттрий<br>88,9059      | 40 <b>Zr</b><br>Цирконий<br>91,22     |
|         | 7    | 47 <b>Ag</b><br>Серебро<br>107,868 | 48 <b>Cd</b><br>Кадмий<br>112,41   | 49 <b>In</b><br>Индий<br>114,82       | 50 <b>Sn</b><br>Олово<br>118,69       |
| 6       | 8    | 55 <b>Cs</b><br>Цезий<br>132,9054  | 56 <b>Ba</b><br>Барий<br>137,33    | 57* <b>La</b><br>Лантан<br>138,9055   | 72 <b>Hf</b><br>Гафний<br>178,49      |
|         | 9    | 79 <b>Au</b><br>Золото<br>196,9665 | 80 <b>Hg</b><br>Ртуть<br>200,59    | 81 <b>Tl</b><br>Таллий<br>204,383     | 82 <b>Pb</b><br>Свинец<br>207,2       |
| 7       | 10   | 87 <b>Fr</b><br>Франций<br>[223]   | 88 <b>Ra</b><br>Радий<br>226,0254  | 89** <b>Ac</b><br>Актиний<br>227,0278 | 104 <b>Rf</b><br>Резерфордий<br>[261] |

\*Лантаноиды

|                                 |                                       |                                  |                                   |                                   |                                   |                                     |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 58 <b>Ce</b><br>Церий<br>140,12 | 59 <b>Pr</b><br>Празеодим<br>140,9077 | 60 <b>Nd</b><br>Неодим<br>144,24 | 61 <b>Pm</b><br>Прометий<br>[145] | 62 <b>Sm</b><br>Самарий<br>150,36 | 63 <b>Eu</b><br>Европий<br>151,96 | 64 <b>Gd</b><br>Гадолиний<br>157,25 |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|

\*\*Актиноиды

|                                   |   |                                 |                                      |                                   |                                   |                                |
|-----------------------------------|---|---------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 90 <b>Th</b><br>Торий<br>232,0381 | 91 <b>Pa</b><br>Протактиний<br>231,0359 | 92 <b>U</b><br>Уран<br>238,0389 | 93 <b>Np</b><br>Нептуний<br>237,0482 | 94 <b>Pu</b><br>Плутоний<br>[244] | 95 <b>Am</b><br>Америций<br>[243] | 96 <b>Cm</b><br>Кюрий<br>[247] |
|-----------------------------------|---|---------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|

ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

|                             |                             |                              |                            |                              |                             |                         |  |
|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|--|
| V                           |                             | VI                           |                            | VII                          |                             | VIII                    |  |
|                             |                             |                              |                            |                              |                             | 2 He<br>Гелий<br>4,0026 |  |
| 7 N<br>Азот<br>14,0067      | 8 O<br>Кислород<br>15,9994  | 9 F<br>Фтор<br>18,9984       | 10 Ne<br>Неон<br>20,179    |                              |                             |                         |  |
| 15 P<br>Фосфор<br>30,97376  | 16 S<br>Сера<br>32,06       | 17 Cl<br>Хлор<br>35,453      | 18 Ar<br>Аргон<br>39,948   |                              |                             |                         |  |
| 23 V<br>Ванадий<br>50,9415  | 24 Cr<br>Хром<br>51,996     | 25 Mn<br>Марганец<br>54,9380 | 26 Fe<br>Железо<br>55,847  | 27 Co<br>Кобальт<br>58,9332  | 28 Ni<br>Никель<br>58,69    |                         |  |
| 33 As<br>Мышьяк<br>74,9216  | 34 Se<br>Селен<br>78,96     | 35 Br<br>Бром<br>79,904      | 36 Kr<br>Криптон<br>83,80  |                              |                             |                         |  |
| 41 Nb<br>Ниобий<br>92,9064  | 42 Mo<br>Молибден<br>95,94  | 43 Tc<br>Технеций<br>[98]    | 44 Ru<br>Рутений<br>101,07 | 45 Rh<br>Родий<br>102,9055   | 46 Pd<br>Палладий<br>106,42 |                         |  |
| 51 Sb<br>Сурьма<br>121,75   | 52 Te<br>Теллур<br>127,60   | 53 I<br>Иод<br>126,9045      | 54 Xe<br>Ксенон<br>131,29  |                              |                             |                         |  |
| 73 Ta<br>Тантал<br>180,9479 | 74 W<br>Вольфрам<br>183,85  | 75 Re<br>Рений<br>186,207    | 76 Os<br>Осмий<br>190,2    | 77 Ir<br>Иридий<br>192,22    | 78 Pt<br>Платина<br>195,08  |                         |  |
| 83 Bi<br>Висмут<br>208,9804 | 84 Po<br>Полоний<br>[209]   | 85 At<br>Астат<br>[210]      | 86 Rn<br>Радон<br>[222]    |                              |                             |                         |  |
| 105 Db<br>Дубний<br>[262]   | 106 Sg<br>Сиборгий<br>[263] | 107 Bh<br>Борий<br>[262]     | 108 Hs<br>Хассий<br>[265]  | 109 Mt<br>Майтнерий<br>[266] | 110 Uun<br>[?]              |                         |  |

\*Лантаноиды

|                             |                              |                              |                          |                            |                             |                             |
|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 65 Tb<br>Тербий<br>158,9254 | 66 Dy<br>Диспрозий<br>162,50 | 67 Ho<br>Гольмий<br>164,9304 | 68 Er<br>Эрбий<br>167,26 | 69 Tm<br>Тулий<br>168,9342 | 70 Yb<br>Иттербий<br>173,04 | 71 Lu<br>Лютеций<br>174,967 |
|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|

\*\*Актиноиды

|                           |                              |                              |                           |                               |                            |                              |
|---------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 97 Bk<br>Берклий<br>[247] | 98 Cf<br>Калифорний<br>[251] | 99 Es<br>Эйнштейний<br>[252] | 100 Fm<br>Фермий<br>[257] | 101 Md<br>Менделевий<br>[258] | 102 No<br>Нобелий<br>[255] | 103 Lr<br>Лоуренсий<br>[260] |
|---------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|

## Литература

1. Наумов А.И. Физика атомного ядра и элементарных частиц. М.: Просвещение, 1984.
2. Ишханов Б.С. Субатомная физика. МГУ, 1994.
3. Широков Ю.М., Юдин Н.П. Ядерная физика. М.: Наука, 1972.
4. Сивухин Д.В. Атомная и ядерная физика. Часть 2. Ядерная физика. М.: Наука, 1989.
5. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. Т.1, Т.2. Энергоатомиздат, 1983.
6. Иродов И.Е. Сборник задач по ядерной физике. М.: Госатомиздат, 1960.
7. Храмов Ю.А. Физики. Биографический справочник. М.: Наука, 1983.



## Оглавление

### Часть I. Физика атомного ядра

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Глава 1. Свойства атомных ядер.....</b>   | <b>3</b>  |
| 1.1.Опыт Резерфорда. Открытие атомного ядра, протона и нейтрона. Гипотеза о нейтрон-протонной структуре ядра (3). 1.2.Составные части атома (5).1.3.Нуклон и его квантовые числа: изоспин и барионный заряд (8). 1.4. Нейтронно-протонная диаграмма. Изотопы, изобары и изотоны. Магические числа (10).1.5.Масса и энергия связи. Полуэмпирическая формула Вайцеккера (13).1.6.Квантовомеханические характеристики состояния ядра (18). 1.7.Электромагнитные моменты ядер (20).1.8*.Распределение плотности ядерной материи (22). Вопросы для закрепления знаний (26). Примеры решения задач (27). Задание для самостоятельной работы (31).  |           |
| <b>Глава 2. Ядерные силы и модели.....</b>   | <b>32</b> |
| 2.1.Основные свойства ядерных сил (32). 2. Коллективные модели ядра. Колебательные и вращательные возбуждения ядра (36). 2.3. Модель оболочек. Одночастичные состояния ядер (40). 2.4. Обобщенная модель (47).2.5. Учет остаточных взаимодействий нуклонов. Микроскопические теории структуры ядра (52). Вопросы для закрепления знаний (54). Примеры решения задач (55). Задание для самостоятельной работы (59).   |           |
| <b>Глава 3. Радиоактивные превращения ядер.....</b>  | <b>61</b> |
| 3.1. Радиоактивность. Основной закон распада, постоянная распада, период полураспада, среднее время жизни. Единицы активности источника (61). 3.2. Типы радиоактивных превращений. Правила сдвигов(66). 3.3.Радиоактивные ряды. Трансурановые элементы(68). 3.4. Альфа-распад. Закон Гейгера-Неттола. Туннельный механизм (72). 3.5. Бета-распад. Слабое взаимодействие. Теория Ферми. График Ферми (74). 3.6.Нейтрино и его свойства. Типы нейтрино. Законы сохранения. Несохранение четности (79). 3.7.Гамма-излучение ядер. Мультипольность излучения. Правила отбора. Изомерия. Внутренняя конверсия (80). Вопросы для закрепления знаний (83). Примеры решения задач (84). Задание для самостоятельной работы (89). |           |

### Часть II. Ядерные излучения и их воздействие на вещество

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Глава 4. Ядерные реакции.....</b>  | <b>90</b> |
| 4.1. Законы сохранения ядерных реакций (90). 4.2 Эффективное сечение ядерных реакций (92). 4.3 Механизмы ядерных реакций. Прямые ядерные реакции (95). 4.4 Ядерная реакция через составное ядро (96). Вопросы для закрепления знаний (99). Примеры решения задач (100). Задание для самостоятельной работы (103). |           |

**Глава 5. Деление ядер. Ядерная энергетика.....105**  
5.1 Механизмы деления ядер (105). 5.2 Деление ядер под действием нейтронов. Цепная реакция (108). 5.3 Ядерные реакторы на тепловых и быстрых нейтронах (112). 5.4. Реакции синтеза. Проблема управляемого термоядерного синтеза. Критерий Лоусона. Токамаки (115). Вопросы для закрепления знаний (119). Примеры решения задач (120). Задание для самостоятельной работы (124).

**Глава 6. Взаимодействие излучения с веществом.....126**  
6.1. Прохождение ионизирующих излучений через вещество. Проникающая способность излучения (126). 6.2 Единицы измерения поглощенной дозы (130). 6.3. Источники радиации. Биологическое действие радиации (133). 6.4. Стохастические эффекты малых доз радиаций (138). Вопросы для закрепления знаний (140). Примеры решения задач (142). Задание для самостоятельной работы (144).

### **Часть III. Элементарные частицы**

**Глава 7. Свойства элементарных частиц.....146**  
7.1.Фундаментальные взаимодействия. Бозоны – переносчики взаимодействий и мезоны. Фермионы: лептоны и барионы. Странные и очарованные частицы (146). 7.2 Законы сохранения (152). 7.3. Несохранение пространственной четности в слабых взаимодействиях (154). Вопросы для закрепления знаний (155). Примеры решения задач (158). Задание для самостоятельной работы (161).

**Глава 8. Систематика элементарных частиц.....163**  
8.1. Соотношение Гелл-Мана и Нишиджимы. Восьмеричный формализм. Октет барионов. Октет мезонов. Декуплет барионов и открытие  $\Omega^-$ -гиперона. (163). 8.2. Адроны как составные частицы. Кварки и их характеристики: аромат и цвет. Проблема пленения кварков (169).8.3.Ускорители заряженных частиц (175). Вопросы для закрепления знаний (178). Примеры решения задач (179). Задание для самостоятельной работы (185).

**Глава 9. Великое объединение. Современное представление о структуре материи.....186**  
9.1 Обменный характер фундаментальных взаимодействий (186). 9.2 Квантовая электродинамика. Диаграммы Фейнмана (187). 9.3 Электрослабое взаимодействие и промежуточные бозоны (193). 9.4 Сильное взаимодействие. Квантовая хромодинамика (197). 9.5 Великое объединение. Проблема неустойчивости протона (201). 9.6. Супергравитация и суперобъединение (204). 9.7. Современное представление о структуре материи (205). Вопросы для закрепления знаний (206).

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

|   |     |
|---|-----|
| Таблица 1. Значения некоторых физических величин..... | 208 |
| Таблица 2. Характеристики атомных ядер.....           | 210 |
| Таблица 3. Характеристики элементарных частиц.....    | 269 |
| Таблица 4. Фундаментальные частицы.....               | 273 |
| Периодическая система элементов Д.И.Менделеева.....   | 274 |
| Литература.....                                       | 276 |
| Оглавление.....                                       | 277 |

**Рафкат Хабибуллаевич САФАРОВ**

**ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА  
И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**

*(С приложениями к живым системам)*

*Лицензия № 0209 от 06.10.97*

Подписано к печати 30.10.2008.  
Формат 60x84 <sup>1/16</sup>. Бумага офсетная.  
Гарнитура «Таймс». Печать ризографическая.  
Усл. печ. л. 17,5. Тираж 100 экз. Заказ К-225.

---

Министерство образования и науки РТ  
Редакционно-издательский центр «Школа».  
420111, Казань, Дзержинского, 3. Тел. 292-24-76  
Отпечатано с готового оригинал-макета  
на множительном участке центра.