

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ

РЕПЕТИТОР ПО ФИЗИКЕ

**ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА.
ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ**

Учебное пособие

Новосибирск
2016

УДК 539.1(075)
ББК 22.38, Я 73
Р 411

Кафедра теоретической и прикладной физики

Составители: канд. техн. наук, доц. *В. Я. Чечуев*;
д-р техн. наук, проф. *С. В. Викулов*

Рецензент д-р физ.-мат. наук, проф. *М. П. Синюков* (СГУВТ)

Репетитор по физике. Ядерная физика. Элементарные частицы:
учеб. пособие / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инженер. ин-т; сост.: В. Я. Чечуев,
С. В. Викулов. – Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой колос», 2016. – 42 с.

Учебное пособие содержит материал, изучаемый, согласно программе, в курсе общей физики.

Предназначено для студентов дневной и заочной формы обучения всех направлений подготовки, реализуемых в НГАУ.

Утверждено и рекомендовано к изданию методическим советом Инженерного института (протокол № 8 от 29 марта 2016 г.)

ВВЕДЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрены три темы: «Дефект массы. Энергия связи», «Радиоактивность» и «Ядерные реакции. Элементарные частицы».

Материал тем изложен следующим образом: даны определения основных вводимых в теме физических величин и приведены соотношения между ними. Показаны примеры решения задач рассмотренных типов.

В заключение предлагаются 12 вариантов задач индивидуальных заданий, охватывающих материал рассмотренных тем.

1. ДЕФЕКТ МАССЫ И ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДРА

Масса ядра $m_{\text{я}}$ всегда меньше суммы масс входящих в него частиц. Это обусловлено тем, что при объединении нуклонов в ядро выделяется энергия связи нуклонов друг с другом.

$$E_{\text{св}} = c^2 \{ [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_{\text{я}} \}. \quad (1.1)$$

Эта величина и есть энергия связи нуклонов в ядре. Она равна той работе, которую нужно совершить, чтобы разделить образующие ядро нуклоны и удалить их друг от друга на такие расстояния, при которых они практически не взаимодействуют друг с другом.

Соотношение (1.1) практически не нарушится, если заменить массу протона m_p массой атома водорода m_{H} , а массу ядра $m_{\text{я}}$ — массой атома m_{a} .

Тогда получим:

$$E_{\text{св}} = c^2 \{ [Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n] - m_{\text{a}} \}. \quad (1.2)$$

Последняя формула удобнее, потому что в таблицах обычно даются не массы ядер, а массы атомов.

Величина

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_{\text{я}} \quad (1.3)$$

называется дефектом массы ядра. Дефект массы связан с энергией связи соотношением

$$\Delta = \frac{E_{\text{св}}}{c^2}. \quad (1.4)$$

Энергия связи, приходящаяся на один нуклон, т.е. $E_{\text{св}}/A$, называется удельной энергией связи нуклонов в ядре.

На рис. 1.4 изображён график зависимости $E_{\text{св}}/A$ от массового числа A .

Из этого рисунка видно, что сильнее всего нуклоны связаны в ядрах с массовыми числами порядка 50–60 (т.е. для элементов от Cr до Zn).

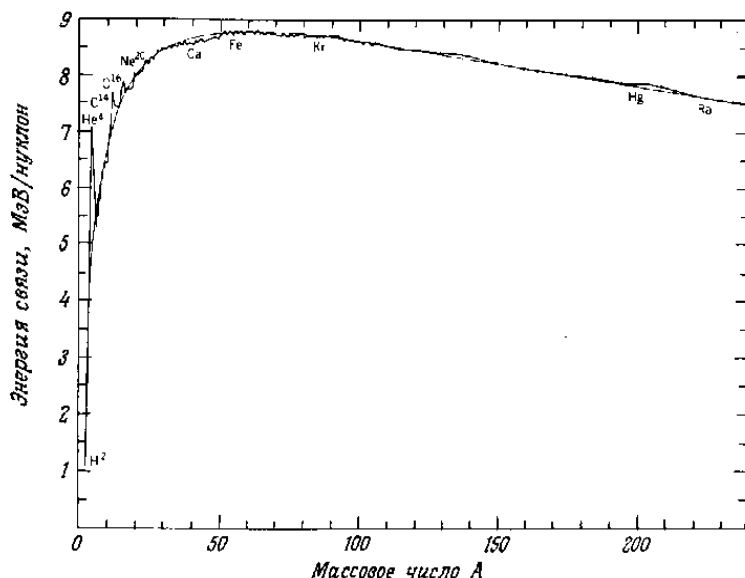


Рис. 1.1

С ростом A удельная энергия связи постепенно уменьшается. Уменьшение энергии связи у тяжёлых элементов и тот факт, что ядра перестают быть устойчивыми вблизи $A = 210$, являются следствием двух факторов: близкодействующего характера ядерных сил и того, что протоны и нейтроны по отдельности подчиняются принципу Паули.

Поскольку ядерные силы – близкодействующие, силы притяжения действуют только между данным нуклоном и его непосредственными соседями. Вместе с тем, так как кулоновские силы дальнего действия, между данным протоном и остальными протонами в ядре действует электростатическое отталкивание. Для ядер с достаточно большими атомными номерами кулоновское отталкивание

превышает ядерное притяжение. Таким образом, должен существовать предел, за которым при добавлении протонов уже не может образоваться устойчивое ядро.

Аналогичную роль играет принцип Паули. По мере добавления новых протонов или нейтронов они должны занимать всё более высокие энергетические состояния. В конце концов энергия одного из этих состояний превысит энергию связи, и ядро окажется неустойчивым. Таким образом, принцип Паули, как и кулоновское отталкивание, ограничивает число нуклонов в ядрах.

Характер зависимости удельной энергии связи от массового числа делает энергетически возможными два процесса: 1) деление тяжёлых ядер на несколько более лёгких ядер и 2) слияние лёгких ядер в одно ядро. Оба процесса должны сопровождаться выделением большого количества энергии. Так, например, деление одного ядра с массовым числом 240 (удельная энергия связи 7,5 МэВ) на два ядра с массовыми числами $A = 120$ (удельная энергия связи равна 8,5 МэВ) привело бы к высвобождению энергии в 240 МэВ. Слияние двух ядер тяжёлого водорода ${}_1\text{H}^2$ в ядро гелия ${}_2\text{He}^4$ привело бы к выделению энергии, равной 24 МэВ. Для сравнения укажем, что при соединении одного атома углерода с двумя атомами кислорода (сгорание угля до CO_2) выделяется энергия порядка 5 эВ.

2. РАДИОАКТИВНОСТЬ

Радиоактивность – явление самопроизвольного превращения одних ядер в другие с испусканием различных частиц.

Различают естественную и искусственную радиоактивность. Естественная радиоактивность – радиоактивность, наблюдаемая у неустойчивых изотопов, существующих в природе.

Искусственная радиоактивность – радиоактивность изотопов, полученных искусственно при ядерных реакциях.

Между искусственной и естественной радиоактивностью нет принципиального различия. Процесс радиоактивного превращения в обоих случаях подчиняется одинаковым законам.

Закон радиоактивного превращения. Отдельные радиоактивные ядра претерпевают превращения независимо друг от друга. Поэтому можно считать, что число ядер dN , распадающихся за время dt , пропорционально как числу имеющихся ядер N , так и промежутку времени dt :

$$dN = -\lambda N \cdot dt. \quad (2.1)$$

Здесь λ – константа, характерная для данного радиоактивного вещества, называемая постоянной распада. Знак минус взят для того, чтобы dN можно было рассматривать как приращение числа нераспавшихся ядер N .

Интегрируя (2.1), получим закон радиоактивного превращения:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (2.2)$$

где N_0 – количество ядер в начальный момент; N – количество нераспавшихся ядер в момент времени t .

Из (2.2) следует, что количество ядер, распавшихся за время t , определяется выражением

$$N_0 - N = N_0 (1 - e^{-\lambda t}). \quad (2.3)$$

Время, за которое распадается половина первоначального количества ядер, называется периодом полураспада T :

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (2.4)$$

Среднее время жизни ядра τ – величина обратная λ :

$$\tau = \frac{1}{\lambda}. \quad (2.5)$$

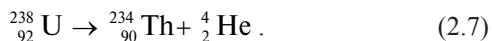
Во всех видах радиоактивных превращений выполняются законы сохранения энергии, импульса, момента импульса, электрического, барионного и лептонного зарядов. При α -распаде и при γ -излучении выполняется закон сохранения чётности (при β -распаде он нарушается). Кроме того, при α -распаде выполняется закон сохранения изотопического спина (законы сохранения барионного и лептонного зарядов, чётности и изотопического спина будут рассмотрены ниже).

Активностью A нуклида (общее название атомных ядер, отличающихся числом протонов Z и нейтронов N) в радиоактивном источнике называется число распадов, происходящих с ядрами образца в 1с:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda \cdot N. \quad (2.6)$$

Единица активности в СИ – беккерель (Бк): 1Бк – активность нуклида, при которой за 1с происходит 1 акт распада. Внесистемной единицей активности является кюри (Ки): $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$.

Альфа-распад является свойством в основном тяжёлых ядер с массовыми числами $A > 200$ и зарядом $Z > 82$. Только небольшая группа α -активных ядер приходится на область с $A = 140 \div 160$. При α -распаде из радиоактивного ядра испускается α -частица, т.е. ядро гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов (дважды магическое ядро). Таким образом, дочернее ядро имеет на два протона и два нейтрона меньше, чем исходное. Примером может служить распад изотопа урана ${}_{92}\text{U}^{238}$, протекающий с образованием ${}_{90}\text{Th}^{234}$:



Возможность α -распада связана с тем, что масса (а значит и энергия покоя) α -радиоактивного ядра больше суммы масс (суммарной энергии покоя) α -частицы и образующегося

после α -распада дочернего ядра. Избыток энергии исходного (материнского) ядра освобождается в форме кинетической энергии α -частицы и дочернего ядра.

Экспериментальными исследованиями установлен закон Гейгера–Нэттола:

$$\ln T = A \cdot E^{-\frac{1}{2}} - B, \quad (2.8)$$

где A и B – некоторые эмпирические константы.

Альфа-распад объясняется только в квантовой механике.

Построим кривую зависимости потенциальной энергии от расстояния для системы «тяжёлый элемент (например, уран) – α -частица». При её построении примем во внимание два обстоятельства: 1) на больших расстояниях от центра ядра ядро отталкивает α -частицу по закону Кулона; 2) на малых расстояниях преобладают ядерные силы, имеющие короткодействующий характер. Они создают потенциальную яму притяжения с очень крутыми краями (рис. 2.1).

Пусть в нашем ядре (внутри потенциальной ямы) содержится много протонов и нейтронов. Тогда группа из близко расположенных двух протонов и двух нейтронов случайно может оказаться вблизи границы, отделяющей область притяжения от области отталкивания, и может иметь

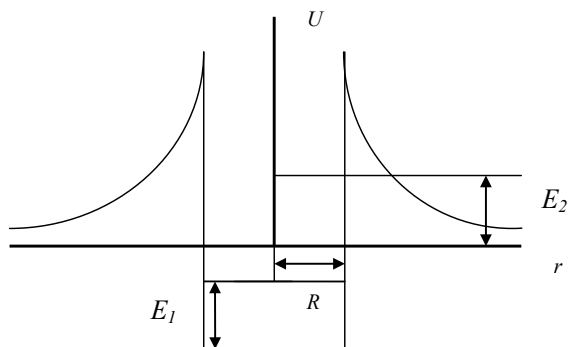


Рис.2.1

импульс, направленный наружу, т.е. α -частица будет двигаться к «стенке» ядра. Поэтому задачу α -распада можно рассматривать в предположении, что в ядре существует α -частица, которая колеблется внутри потенциальной ямы в состоянии с энергией E .

Энергия α -частицы внутри потенциальной ямы дискретна. Последнее подтверждается тем, что у одного и того же α -радиоактивного элемента имеется несколько групп α -частиц, отличающихся друг от друга энергиями.

Таким образом, задача сводится к определению поведения α -частиц внутри потенциальной ямы с дискретными уровнями энергии.

Если энергия α - частицы E_1 отрицательна, то ядро устойчиво по отношению к α -распаду.

Если же энергия E_2 положительна, но всё же меньше, чем $U(r)$, то ядро находится в метастабильном состоянии. Удалению частицы из ядра мешает наличие потенциального барьера. Опыты по рассеянию α -частиц тяжёлыми α -радиоактивными ядрами показывают, что высота барьера имеет величину порядка 30 МэВ.

Наряду с этим обнаружилось, что α -частицы, испускаемые ядром, имеют энергию лишь $\sim 4 \div 9$ МэВ, т.е. много меньшую высоты барьера. Частица с такой энергией не может преодолеть барьер, но она может сквозь него *туннелировать*.

Вероятность ω туннельного эффекта для случая прямоугольного потенциального барьера шириной d описывается соотношением

$$\omega \sim e^{-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(U-E)}d}. \quad (2.9)$$

Из (2.9) видно, что вероятность увеличивается с уменьшением d и $U-E_2$, т.е. чем больше E_1 , тем больше вероятность вылета и тем меньше период полураспада. Полное кванто-

во-механическое решение этой задачи приводит к уравнению Гейгера–Нэттола, т.е. теория хорошо согласуется с данными опыта.

Бета-распад. Существуют три разновидности β -распада. В одном случае ядро, претерпевающее превращение, испускает электрон, в другом – его античастицу – позитрон, в третьем случае ядро поглощает один из электронов K -оболочки, значительно реже L - или M -оболочки (соответственно говорят о K -захвате, L -захвате или M -захвате).

Явление β -радиоактивности поставило три проблемы:

1. Откуда берутся вылетающие электроны?
2. Почему их энергии могут принимать всевозможные значения от нуля до E_{\max} ?
3. Как совместить сохранение при β -распаде спина ядра с тем, что электрон уносит из ядра спин, равный $\hbar/2$?

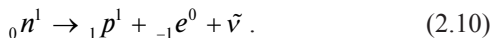
Решение этих проблем было предложено Паули. Он предположил, что при β -распаде, помимо электрона, вылетает ещё одна частица, обладающая нулевым зарядом, ничтожно малой массой и спином, равным $\hbar/2$. Эта частица была названа Ферми нейтрино (согласно современным представлениям, частицей, испускаемой при β -распаде, является антинейтрино. Нейтрино выделяется при позитронном распаде).

Введение нейтрино и антинейтрино позволило объяснить наличие сплошного энергетического спектра у β -радиоактивных излучателей. Полная энергия, теряемая ядром при испускании электрона, действительно равна E_{\max} – энергии верхней границы β -спектра. Но она может различным образом распределиться между электроном и антинейтрино.

Легко в этом случае объясняется и сохранение спина ядра при β -распаде. Поскольку вместе с электроном уносится и антинейтрино, обладающее, как электрон, спином $\hbar/2$, суммарный спин обеих частиц при взаимно противоположных спинах может быть равен нулю.

Рассмотрим вопрос о возникновении электронов при распаде. При β -распаде число нуклонов в ядре не меняется, а заряд ядра увеличивается на единицу.

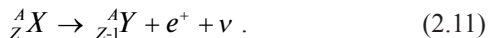
Очевидно, что единственной возможностью осуществления этих условий является превращение в ядре нейтрона ${}_0n^1$ в протон ${}_1p^1$ с одновременным вылетом электрона и антинейтрино:



Превращение нейтрона в протон оказывается возможным ввиду различия масс и энергий покоя этих частиц.

Изложенная теория получила подтверждение в 1950 г., когда было экспериментально обнаружено, что свободные нейтроны действительно распадаются по схеме (2.10) с периодом полураспада 12,8 мин.

Второй вид распада (β^+ -распад, или позитронный распад) протекает по схеме



Распад (2.11) протекает так, как если бы один из протонов исходного ядра превратился в нейтрон, испустив при этом позитрон и нейтрино:

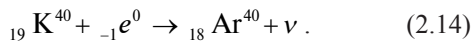


Для свободного протона такой процесс невозможен. Однако протон в ядре может заимствовать требуемую энергию от других нуклонов, входящих в состав ядра.

Третий вид β -распада (электронный захват) заключается в том, что ядро поглощает один из K -электронов (реже из L - или M -электронов) своего атома, в результате чего один из протонов превращается в нейтрон, испуская при этом нейтрино:



Примером электронного захвата может служить превращение ${}_{19}\text{K}^{40}$ в ${}_{18}\text{Ar}^{40}$:



Бета-радиоактивные ядра можно создать искусственно, если присоединить к стабильному ядру (или отнять у него) один или несколько однотипных нуклонов.

Гамма-излучение. Гамма-излучение не является самостоятельным видом радиоактивности. Оно только сопровождает α - и β -распады, а также возникает в ряде других явлений.

Кроме рассмотренных радиоактивных процессов, известно ещё несколько процессов, происходящих по закону радиоактивного распада, — это протонная радиоактивность, спонтанное деление тяжёлых ядер, испускание запаздывающих нейтронов, испускание запаздывающих протонов, запаздывающая двухпротонная и запаздывающая двухнейтронная радиоактивность.

Радиоактивные семейства. Возникающие в результате α -распадов ядра могут быть в свою очередь радиоактивными. «Родона начальниками» цепочек ядер, возникающих при их последовательных α -распадах, являются изотопы ${}^{232}\text{Th}$, ${}^{237}\text{Np}$, ${}^{238}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$. Поскольку при каждом из таких распадов число нуклонов A уменьшается на 4, то массовые числа изотопов одного ряда можно представить в виде числа n этих четвёрок плюс некоторое фиксированное для каждого ряда число от 0 до 3: $A = 4n$; $4n + 1$; $4n + 2$; $4n + 3$.

Таким образом, имеем четыре радиоактивных семейства. Три из них ($A = 4n$; $4n + 2$; $4n + 3$) включают изотопы, присутствующие в настоящее время на Земле.

Четвёртый ряд $A = 4n + 1$, родоначальником которого является ${}^{237}\text{Np}$, состоит из ядер, радиоактивные изотопы которых успели распасться за время существования Земли.

После цепочки последовательных распадов в конце каждого ряда образуются стабильные ядра с близкими или равными магическим числам количествами протонов и нейтронов: соответственно ${}^{208}\text{Pb}(4n)$; ${}^{206}\text{Pb}(4n + 2)$; ${}^{207}\text{Pb}(4n + 3)$;

$^{209}\text{Bi}(4n+1)$. Альфа-распады изотопов каждого ряда перемежаются β -распадами, так как при α -распадах конечные ядра оказываются всё дальше от линии β -стабильности. Конечно, невозможен переход ядер из одного семейства в другое.

3. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

При сближении двух сильновзаимодействующих частиц (ядро и нуклон, два ядра, два нуклона) до расстояния, на котором действуют ядерные силы (порядка 10^{-15}м), они вступают между собой в ядерную реакцию. В результате ядерной реакции вместо двух первоначальных частиц возникают две (или больше) другие ядерные частицы, которые разлетаются от места ядерного взаимодействия.

Ядерное взаимодействие между двумя данными частицами может приводить к разным конечным продуктам.

Основные закономерности протекания многих реакций можно объяснить при помощи теории составного ядра. Согласно этой теории, ядерная реакция протекает в две стадии. На первой стадии из взаимодействующих частиц образуется составное (промежуточное) ядро, которое существует около 10^{-15}с . На второй стадии промежуточное ядро распадается на продукты реакции. Одно и то же составное ядро может возникать в разных реакциях.

Однако в ряде случаев эта теория даёт результаты, противоречащие опыту. Для объяснения этих результатов был предложен механизм прямого ядерного взаимодействия. Этот механизм заключается в передаче одного или нескольких нуклонов из одного взаимодействующего ядра в другое без предварительного образования промежуточного ядра (реакции срыва и подхвата).

В ядерной физике вероятность взаимодействия принято характеризовать с помощью эффективного сечения σ . Эта

величина определяется соотношением

$$\sigma = \frac{1}{n\delta} \ln \frac{N_0}{N_\delta}, \quad (3.1)$$

где N_0 – первичный поток падающих на мишень частиц; N_δ – поток на глубине δ ; n – концентрация ядер в мишени.

Эффективное сечение измеряется в барнах:

$$1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2. \quad (3.2)$$

Из всего многообразия ядерных реакций мы рассмотрим кратко только реакции деления и синтеза ядер.

Реакция деления ядер была открыта радиохимиками Ганном и Штрассманом, которые облучали уран нейтронами, обнаружили образование ядер $_{56}\text{Ba}$, отстоящего от урана по заряду на целых 36 единиц.

Объяснение этого результата было дано Фришем и Мейтнер, которые показали гипотезу о неустойчивости ядра урана при его деформации. При захвате нейтрона ядро урана возбуждается и приходит в колебания, которые в некоторых случаях могут привести к разрыву ядра на две части. Позднее было установлено, что осколки деления имеют довольно широкий спектр масс, причём наиболее вероятным является деление на осколки, массы которых соотносятся как 2:3.

Масса (и энергия) делящегося ядра значительно превышает сумму масс осколков. В связи с этим при делении освобождается очень большая энергия (порядка 200 МэВ), значительную часть которой (около 170 МэВ) уносят осколки в виде кинетической энергии.

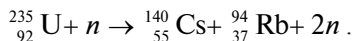
Гипотеза Фриша и Мейтнер позволяет предсказать ещё два важных свойства осколков деления. При разделении ядра урана на два осколка все Z протонов и все N нейтронов ядра урана распределяются между этими осколками, поэтому в осколках должно быть примерно такое же соотношение между Z и N , что и в уране:

$$\frac{N_{\text{оск}}}{Z_{\text{оск}}} = \frac{N_{\text{U}}}{Z_{\text{U}}} = \frac{146}{92} = 1,6.$$

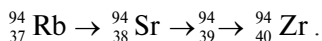
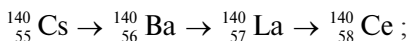
Но это соотношение не типично для стабильных изотопов ядер середины периодической таблицы (к которым относятся осколки). Например, для ядра $^{137}_{56}\text{Ba}$ значение $\frac{N}{Z} = 1,45$, а не 1,6. Таким образом осколки, образующиеся при делении, оказываются перегруженными нейтронами, а следовательно, они должны быть β^- -радиоактивными и могут испускать нейтроны.

Эти свойства были подтверждены экспериментально. Действительно, при делении урана на один акт деления в среднем испускается 2,4 нейтрона, а осколки действительно β^- -радиоактивны.

Пример:



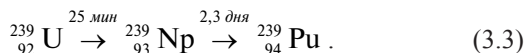
Осколки деления – цезий и рубидий – претерпевают превращения:



Конечные продукты ^{140}Ce и ^{94}Zr являются стабильными.

Кроме урана при облучении нейтронами делятся торий $^{232}_{90}\text{Th}$ и протактиний $^{231}_{91}\text{Pa}$, а также плутоний $^{239}_{94}\text{Pu}$.

Плутоний образуется, когда ядра $^{238}_{92}\text{U}$ поглощают нейтроны с энергиями, меньшими 1 МэВ. В результате образуются ядра $^{239}_{92}\text{U}$. Дальнейшая цепочка превращений выглядит следующим образом:



Над стрелками указаны периоды полураспада. Плутоний α -радиоактивен. Однако его период полураспада так велик

(24400 лет), что его можно считать практически стабильным.

Испускание при делении ядер ^{235}U и ^{239}Pu нескольких нейтронов делает возможным осуществление цепной ядерной реакции. Действительно, испущенные при делении одного ядра Z нейтронов могут вызвать деление Z ядер, в результате будет испущено Z^2 новых нейтронов, которые вызовут деление Z^2 ядер и т.д. Таким образом, количество нейтронов, рождающихся в каждом поколении, нарастает в геометрической прогрессии. Нейтроны, испускаемые при делении ядер $^{235}_{92}\text{U}$, имеют скорость $\sim 2 \cdot 10^7$ м/с. Поэтому время, протекающее между испусканием нейтрона и захватом его новым делящимся ядром, очень мало, так что процесс размножения нейтронов в делящемся веществе протекает очень быстро.

Природный уран содержит 99,27% изотопа ^{238}U , 0,72% ^{235}U и около 0,01% ^{234}U . Следовательно, на каждое делящееся под действием медленных нейтронов ядро ^{235}U приходится 140 ядер ^{238}U , которые захватывают не слишком быстрые нейтроны без деления. Поэтому в природном уране цепная реакция деления не возникает. Обычно для её осуществления используют либо чистый уран ^{235}U , либо плутоний ^{239}Pu .

В обоих случаях в куске делящегося вещества каждый захваченный ядром нейтрон вызывает деление с испусканием $\sim 2,5$ новых нейтронов.

Поскольку объём тела растёт как куб, а поверхность как квадрат линейных размеров, то относительная доля вылетающих наружу нейтронов уменьшается с ростом массы делящегося вещества. Отсюда следует, что существует некоторая масса, при которой может начаться цепная реакция. Эта масса называется критической. При массе большей критической нейтроны быстро размножаются, и реакция приобретает взрывной характер. На этом основано действие атомной бомбы.

Ядерный заряд такой бомбы представляет собой два или более кусков почти чистого ^{235}U или ^{239}Pu . Масса каждого куска меньше критической, вследствие чего цепная реакция не возникает.

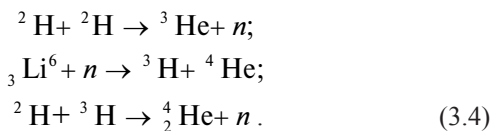
В земной атмосфере всегда присутствует некоторое количество нейтронов, рождённых космическими лучами. Поэтому, чтобы вызвать взрыв, достаточно соединить части ядерного заряда в один кусок массой больше критической. Такую массу нужно сконцентрировать за время порядка 10^{-3} с. Для соединения используют обычное взрывчатое вещество, с помощью которого одной частью заряда выстреливают в другую. Всё устройство заключено в массивную оболочку из металла большой плотности. Оболочка служит отражателем нейтронов и, кроме того, удерживает заряд от распыления. Цепная реакция в атомной бомбе идёт на быстрых нейтронах. При взрыве успевает прореагировать только часть ядерного заряда. Первые американские атомные бомбы содержали около 2 кг ^{235}U и приводились в действие указанным способом.

Реакции синтеза. При соединении двух лёгких ядер и образовании прочно связанного ядра со средним значением массового числа A также происходит высвобождение энергии. Например, если бы удалось соединить два дейтрона (H^2) и получить ядро гелия (^4_2He), масса которого меньше суммарной массы двух дейтронов на 24 МэВ, то удалось бы высвободить энергию синтеза в количестве 24 МэВ. Отметим, в воде озёр и океанов имеются неограниченные запасы дейтерия, который сравнительно легко отделить от обычного водорода.

Препятствием на пути получения энергии из воды является закон Кулона. Электростатическое отталкивание двух дейтронов не позволяет им сблизиться до расстояний $\sim 10^{-15}$ м, на которых сказываются короткодействующие силы притяжения.

Расчёты показывают, чтобы свести дейтроны на это расстояние, им необходимо сообщить кинетическую энергию 0,35 МэВ на каждый дейтрон. Средней энергии теплового движения, равной 0,35 МэВ, соответствует температура порядка $2 \cdot 10^9$ К. Однако синтез ядер дейтерия и других лёгких ядер может протекать и при значительно меньших температурах. Дело в том, что из-за случайного распределения частиц по скоростям всегда имеется некоторое число ядер, энергия которых значительно превышает среднее значение. Кроме того, что особенно существенно, слияние ядер может произойти вследствие туннельного эффекта. Поэтому для получения управляемой термоядерной энергии и для инициирования термоядерного взрыва водородной бомбы достаточно температуры около $5 \cdot 10^7$ К. Ядерные реакции, требующие для своего осуществления температур порядка миллионов градусов, называются термоядерными. Мгновенные температуры, развивающиеся при взрыве атомной бомбы, оказываются достаточно высокими, чтобы поджечь термоядерное горючее.

В качестве горючего в современных водородных бомбах используется соединение LiH, причём только с изотопами ${}^6_3\text{Li}$ и ${}^2_1\text{H}$. Реакции протекают в следующей последовательности:



Начавшись, термоядерные реакции сопровождаются выделением энергии, и этим обеспечивается поддержание высоких температур, пока большая часть вещества не «выгорит».

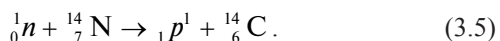
Управляемый синтез. Чтобы с помощью ядерного синтеза можно было получить полезную энергию, термоядерные реакции должны быть управляемыми. Необходимо найти способы создания и поддержания температуры во много

миллионов градусов. Кроме того, высокотемпературный газ или плазму нужно удерживать так, чтобы не расплавились стенки соответствующего объёма.

В настоящее время осуществляется международный проект ITER. Сомнений в возможности создания действующего термоядерного реактора нет.

Другой возможный путь осуществления управляемой термоядерной реакции – сверхбыстрый (порядка 10^{-9} с) нагрев небольших (диаметром около 1 мм) «таблеток» из конденсированного термоядерного топлива при помощи всестороннего облучения их короткими импульсами лазерного излучения или сильнооточных пучков релятивистских электронов.

В заключение коротко об ядерной реакции, играющей большую роль в археологии. В атмосфере постоянно протекает реакция:



Возникающий углерод ${}^{14}_6\text{C}$ называется радиоуглеродом. Он β -радиоактивен, его период полураспада составляет 5375 лет. Радиоуглерод усваивается при фотосинтезе растениями и участвует в круговороте веществ в природе.

Специальные исследования показали, что под действием ветров и океанических течений равновесная концентрация ${}^{14}\text{C}$ в различных местах земного шара одинакова и соответствует примерно 14 распадам в минуту на каждый грамм углерода.

Пока организм живёт, убыль в нём ${}^{14}\text{C}$ из-за радиоактивности восполняется за счёт участия в круговороте веществ в природе. В момент смерти организма процесс усвоения прекращается, и концентрация ${}^{14}\text{C}$ в обычном углероде начинает убывать по закону радиоактивного распада. Следовательно, измерив концентрацию ${}^{14}\text{C}$ в останках организма (в костях), в древесине и т.д., можно определить дату смерти или возраст.

4. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Дать строгое определение понятия элементарной частицы оказывается затруднительным. В качестве первого приближения можно понимать под элементарными частицами такие микрочастицы, внутреннюю структуру которых на современном уровне развития физики нельзя представить как объединение других частиц.

В настоящее время частицы, претендующие на роль первичных элементов материи, принято называть истинно элементарными.

По современным представлениям, таких частиц 48: 36 кварков и 12 лептонов.

Существуют ли ещё более глубокие уровни строения материи, в настоящее время неизвестно, хотя такие возможности обсуждаются и даже строятся конкретные модели (субкварки, преоны, ришоны и др.). Этот важнейший вопрос может быть решён только экспериментально. Из соотношения неопределённостей $\Delta r \cdot \Delta p \sim \hbar$ следует, что для выявления деталей структуры с размером порядка Δr нужны зондирующие частицы с импульсами p , не меньшими $\Delta p \sim \frac{\hbar}{\Delta r}$. Таким образом, для изучения очень мелких деталей нужны частицы с очень большими энергиями. Максимальные значения энергии, достигнутые в ускорительных лабораториях сейчас, составляют $\sim 10^3$ ГэВ ($1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$), чему отвечают минимальные расстояния $r \sim 10^{-19} \text{ м}$. На этих расстояниях выше указанные истинно элементарные частицы ещё не выявляют внутренней структуры. Но конструируются ускорители, которые позволят проникнуть вглубь материи на ещё меньшие расстояния.

Лептоны – это частицы, не участвующие в сильных взаимодействиях. Таких частиц 6. Это электрон e , мюон μ^- , тяжёлый тау-лептон τ^- , или таон, с массой примерно $3487 m_e$.

(m_e – масса электрона) и три сорта нейтрино: электронное ν_e , мюонное ν_μ и тау-нейтрино ν_τ . У каждой из частиц есть анти-частица.

Лептоны группируются в пары: электрон – с электронным нейтрино, мюон – с мюонным нейтрино, тау-лептон – с тау-нейтрино. Это объединение обусловлено тем, что каждый сорт нейтрино участвует в реакциях вместе со своим партнёром по паре. Первые три частицы имеют электрический заряд, равный заряду электрона. Все нейтрино электронейтральны. Всего лептонов равно 12.

Кварки – это частицы, участвующие во всех взаимодействиях. В исходной схеме кварков шесть и они группируются в три семейства, соответствующие семействам лептонов: (u, d), (c, s), (t, b).

Буквы u, d, c, s, t, b – сокращения от общепринятых названий кварков: *up* – верхний, *down* – нижний, *strange* – странный, *charm* – очарованный, *t* – правдивый, *beauty* – прелестный.

Из кварков слагаются частицы, участвующие в сильных взаимодействиях. Они называются адронами. Адроны, в свою очередь, подразделяются на барионы и мезоны.

Первая группа объединяет в себе нуклоны (p, n) и нестабильные частицы с массой, большей массы нуклонов. Они получили название гиперонов ($\lambda, \Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Xi^-, \Xi^0, \Omega^-$). Они обладают ненулевым барионным зарядом и нулевым лептонным зарядом.

Самым лёгким барионом является протон. Все барионы являются фермионами.

Мезоны – это частицы с нулевым лептонным и барионным зарядами. Когда их вводили, объединяющим признаком мезонов являлось то, что их массы имели значения, промежуточные между массами электрона и нуклона. Сейчас же известны мезонные резонансы, массы которых превосходят нуклонную. Все мезоны являются бозонами.

Мезоны образуются из пары «кварк – антикварк», а барионы – из трёх кварков.

Квантовая хромодинамика. К настоящему времени в свободном состоянии кварки не найдены. Но большинство физиков верит в то, что кварки существуют, но только в связанном состоянии внутри адронов.

Пленение кварков является, пожалуй, главной трудностью кварковой модели. Другая трудность этой модели связана с тем, что она допускает барионные комбинации из трёх тождественных кварков, находящихся в одинаковом состоянии. Например, Ω^- -гиперон состоит из трёх s -кварков ($\Omega^- = \hat{s}\hat{s}\hat{s}$). А это запрещено принципом Паули, согласно которому два (а тем более три) фермиона с одинаковыми квантовыми числами не могут находиться в одном и том же состоянии. Обе эти трудности удалось преодолеть введением ещё одной характеристики кварков, которая условно называется *цветом*.

Каждый кварк независимо от его типа (u, d, c, s, t, b), который называется *аромсето* (*flavour*), имеет три цветовые разновидности, соответствующие трём «основным цветам»: «красному», «синему» и «зелёному».

В состав любого бариона входят обязательно «разноцветные» кварки, так что Ω^- -гиперон, например, является «бесцветной» («белой») комбинацией вида $\hat{s}_k \hat{s}_3 \hat{s}_c$, которая не противоречит принципу Паули. Соответственно каждый мезон представляет собой комбинацию кварков и антикварков с «дополнительными» цветами (например, «красный» и «антикрасный» и т.п.), которые также в сумме дают «белый цвет».

Кроме этой функции нового квантового числа цвет играет очень важную роль нового заряда. Согласно современной теории сильных взаимодействий – квантовой хромодинамике, взаимодействие между кварками осуществляется при помощи восьми цветных глюонов (от слова *glue* – клей),

которые являются квантами, т.е. переносчиками сильного взаимодействия между кварками любых ароматов и цветов.

Наличие цветового заряда у глюонов резко отличает их от квантов электромагнитного взаимодействия – фотонов, которые не имеют заряда. В отличие от фотона глюон может испускать новые глюоны, что приводит к росту эффективного заряда кварка с увеличением расстояния и, следовательно, к возрастанию энергии взаимодействия между кварками. В результате кварки не могут освободиться друг от друга (периферическая тюрьма, пленение) и встречаются в природе только в связанном состоянии – в форме «белых», «бесцветных» адронов.

Наоборот, на очень малых расстояниях кварки взаимодействуют относительно слабо, и их можно рассматривать как практически свободные частицы (центральная, асимптотическая свобода). Это обстоятельство позволило получить ряд количественных соотношений, подтверждённых экспериментами.

5. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Задача 1. Вычислить дефект массы, энергию связи ядра и удельную энергию связи для элемента $^{108}_{47}\text{Ag}$.

Дано: $m_{\text{H}} = 1,007783 \text{ а.е.м.}; m_n = 1,00867 \text{ а.е.м.};$
 $m_{\text{Ag}} = 107,869 \text{ а.е.м.}; Z = 47; A = 108.$

Найти: $\Delta m, E_{\text{св}}, \varepsilon_{\text{св}}.$

Решение

Дефект массы ядра Δm равен

$$\begin{aligned}\Delta m &= Z m_{\text{H}} + (A - Z) m_n - m_{\text{Ag}} = \\ &= 47 \cdot 1,007783 + (108 - 47) \cdot 1,00867 - 107,869 = 1,028 \text{ а.е.м.}\end{aligned}$$

Энергия связи

$$E_{\text{св}} = \Delta m c^2 = 1,028 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} \approx \\ \approx 15,36 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} \approx 960 \text{ (МэВ)}.$$

Удельная энергия связи

$$\varepsilon_{\text{св}} = \frac{E_{\text{св}}}{A} = \frac{960}{108} = 8,9 \text{ (МэВ)}.$$

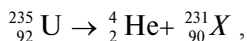
Задача 2. Ядро, состоящее из 92 протонов и 143 нейтронов, выбросило α -частицу. Какое ядро образовалось при α -распаде? Определить дефект массы и энергию связи образовавшегося ядра.

Дано: $Z = 92$; $A = 92 + 143$; $N = 143$.

Найти: X , Δm , $E_{\text{св}}$.

Решение

Реакция α -распада имеет вид

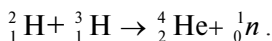


т.е. образовалось ядро тория ${}_{90}^{231}\text{Th}$; $m_{\text{Th}} = 231,02944 \text{ а.е.м.}$

Дефект массы

$$\Delta m = Z m_{\text{H}} + (A - 2) m_n - m_{\text{Th}} = 90 \cdot 1,00783 + 141 \cdot 1,00867 - \\ - 231,02944 \approx 1,898 \text{ (а.е.м.)} = 3,15 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Задача 3. Вычислить энергию термоядерной реакции



Дано: $m_{\text{H}} = 2,0141 \text{ а.е.м.}$; $m_{\text{H}} = 3,01605 \text{ а.е.м.}$;

$$m_{\text{He}} = 4,0026 \text{ а.е.м.}; m_n = 1,00867 \text{ а.е.м.}$$

Найти: E .

Решение

Энергия ядерной реакции определяется по формуле $E = \Delta m c^2$:

$$\begin{aligned}
 E &= c^2 (m_{\text{H}}^2 + m_{\text{H}}^1 - m_{\text{He}}^4 - m_n) = \\
 &= c^2 (2,0141 + 3,01605 - 4,0026 - 1,00867) = c^2 \cdot 0,01888 = \\
 &= 9 \cdot 10^{16} \cdot 0,01888 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} = 28,2 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} \approx 17,6 (\text{МэВ}).
 \end{aligned}$$

Задача 4. Какова высота кулоновского барьера для α -частицы в ядре Pb^{206} ?

Решение

Высота кулоновского барьера $E_{\text{кул}}$ равна электростатической потенциальной энергии двух ядер при расстоянии между их центрами, равном сумме их радиусов, т.е. когда ядра находятся в непосредственном «контакте». Радиусы находим по формуле $R_0 = 1,4 \cdot A^{1/3} \cdot 10^{-15} \text{ м}$, где A – массовое число ядра. Тогда

$$R_{\text{Pb}} \approx 1,4 \cdot 206^{\frac{1}{3}} \cdot 10^{-15} \approx 8,2 \cdot 10^{-15} \text{ м};$$

$$R_{\alpha} = 1,4 \cdot 4^{\frac{1}{3}} \cdot 10^{-15} = 2,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}.$$

Следовательно,

$$E_{\text{кул}} = \frac{(Z \cdot e)_{\text{Pb}} (Z \cdot e)_{\alpha}}{R_{\text{Pb}} + R_{\alpha}} = \frac{82 \cdot e \cdot 2e}{8,2 \cdot 10^{-15} + 2,2 \cdot 10^{-15}} = 22,7 \text{ МэВ}.$$

Задача 5. Среднее время жизни атомов некоторого радиоактивного вещества $\tau = 1 \text{ с}$. Определить вероятность P того, что ядро атома распадется за промежуток времени $t = 1 \text{ с}$.

Решение

За время t распадается число атомов, равное

$$N_{\text{расп}} = N_0 - N = N_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \text{ т. к. } \lambda = \frac{1}{\tau}.$$

Вероятность распада равна

$$P = \frac{N_{\text{расп}}}{N_0} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} = 1 - \frac{1}{e} = 1 - \frac{1}{2,73} = 0,63.$$

Задача 6. Сколько ядер, содержащихся в 1 г трития ${}^3_1\text{H}$, распадается за среднее время жизни τ этого изотопа?

Решение

По закону распада

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}; \quad (1)$$

$$t = \tau = \frac{1}{\lambda}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим:

$$N = \frac{N_0}{e}. \quad (3)$$

С учётом (3) число распавшихся атомов за время $t = \tau$ равно

$$N' = N_0 - N = N_0 \left(1 - \frac{1}{e}\right). \quad (4)$$

Найдём число атомов N_0 , содержащихся в массе $m = 1$ г изотопа ${}^3_1\text{H}$:

$$N_0 = \frac{m}{\mu} N_A, \quad (5)$$

где $\mu = 3 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярная масса изотопа ${}^3_1\text{H}$;

$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$ – постоянная Авогадро.

С учётом (5) выражение (4) примет вид:

$$N' = \frac{m}{\mu} N_A \left(1 - \frac{1}{e}\right) = \frac{10^{-3} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{3 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(1 - \frac{1}{2,73}\right) = 1,27 \cdot 10^{23}.$$

Задача 7. Определить начальную активность A_0 радиоактивного препарата ${}^{27}\text{Mg}$ массой $m = 0,2 \cdot 10^{-9}$ кг, а также его активность A через 6 ч. Период полураспада $T = 600$ с.

Решение

$$A = -\frac{dN}{dt}, N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \text{ тогда } A = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t}. \quad (1)$$

Полагая в (1) $t = 0$, получим:

$$A_0 = \lambda \cdot N_0. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), будем иметь:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}; \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T}; \quad (4)$$

$$N_0 = \frac{m}{\lambda} N_A. \quad (5)$$

Подставив (4) и (5) в (1) и (2), получим:

$$\begin{aligned} A_0 &= \lambda \frac{m}{\mu} N_A = \frac{m}{\mu} N_A \cdot \frac{\ln 2}{T} = \\ &= \frac{0,2 \cdot 10^{-9}}{27 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0,63}{600} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 5,13 \cdot 10^{12} \text{ Бк}; \\ A &= \frac{m}{\mu} N_A \frac{\ln 2}{\lambda} e^{-\frac{\ln 2}{T}} = \\ &= \frac{0,2 \cdot 10^{-9}}{27 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{0,623}{600} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot e^{-\frac{0,693}{600} \cdot 2,16 \cdot 10^4} = 81,3 \text{ Бк}. \end{aligned}$$

Задача 8. Построить кварковую схему нейтрального каона K^0 .

Решение

Каон K^0 имеет странность $S = +1$. Следовательно, в своём составе он должен содержать антикварк \tilde{S} , для которого $S = +1$ и $Q = \frac{1}{3}$. Чтобы получить комбинацию, которая имела бы $Q = 0$, возможен единственный вариант:

$$K^0 = d\tilde{S}.$$

Задача 9. Возможны ли следующие распады частиц и если нет, то по какой причине:

- 1) $\Omega^- \rightarrow \lambda^0 + \pi^-$; 4) $\Xi^- \rightarrow n + \pi^-$;
- 2) $n \rightarrow p + \mu^- + \tilde{\nu}_\mu$; 5) $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_\mu$;
- 3) $p \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$; 6) $\Omega^- \rightarrow \Xi^0 + \mu^-$?

Решение

Такие распады запрещены, поскольку:

- 1) $\Delta S = 2$;
- 2) $\Delta S = 2$;
- 3) $m_n < m_p + m_\mu$;
- 4) не сохраняются лептонные заряды L_e и L_μ ;
- 5) не сохраняются барионный B и лептонный L заряды;
- 6) не сохраняется L_μ .

Задача 10. Рассмотреть, какие из приведённых реакций запрещены законами сохранения лептонных зарядов:

- 1) $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \tilde{\nu}_\mu$; 2) $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \tilde{\nu}_e$; 3) $\mu^+ \rightarrow e^- + \gamma$;
- 4) $K^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \pi_0$; 5) $\nu_e + p \rightarrow n + e^+$.

Решение

Запрещены реакции 1, 2, 5.

Задача 11. Найти наибольшую скорость, которую может иметь электрон, образовавшийся при распаде свободного покоящегося нейтрона.

Решение

Максимальная полная энергия возникшего электрона равна разности энергий покоя нейтрона и протона:

$$\frac{m_e \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = (m_n - m_p) c^2.$$

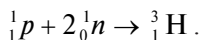
Отсюда

$$v = c \sqrt{1 - \left(\frac{m_e}{m_n - m_p} \right)^2} = 3 \cdot 10^8 \sqrt{1 - \frac{0,511}{939,57 - 938,38}} = 0,92 \text{ м/с}.$$

Задача 12. Какое количество энергии освобождается при соединении одного протона и двух нейтронов в одно ядро?

Решение

Результатом ядерной реакции синтеза является образование ядра трития:



Энергетический эффект ядерной реакции $E = \Delta mc^2$:

$$\Delta m = m_p + 2m_n - m_{{}_1^3\text{H}}.$$

Масса протона $m_p = 1,00728 \text{ а.е.м.}$, масса нейтрона $m_n = 1,00867 \text{ а.е.м.}$, масса трития $m_{{}_1^3\text{H}} = 3,01605 \text{ а.е.м.}$

Тогда

$$E = \Delta m \cdot c^2 = (1,00728 + 2 \cdot 1,00867 - 3,01605) \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} \approx \\ \approx 12,8 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} \approx 8(\text{МэВ}).$$

6. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Вариант 1

1. Сколько атомов радона распадается за сутки из 1 млн атомов?

2. Некоторый радиоактивный препарат имеет постоянную распада $\lambda = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$. Через сколько времени распадается 75% первоначального количества атомов?

3. Найти энергию связи ядра изотопа лития ${}_3\text{Li}^7$.

4. Найти энергию, выделяющуюся при реакции ${}_4^9\text{Be} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_4^8\text{Be} + {}_0^1n$.

5. Ядро, состоящее из 92 протонов и 143 нейтронов, выбросило α -частицу. Какое ядро образовалось при α -распаде? Определить дефект массы и энергию связи образовавшегося ядра.

6. При бомбардировке изотопа азота ${}_{7}^{14}\text{N}$ нейтронами образуется изотоп углерода ${}_{6}^{14}\text{C}$, который оказывается β -радиоактивным. Написать уравнения обеих реакций.

7. Определить, какие из приведённых ниже процессов разрешены законом сохранения лептонного числа

$$1) p \rightarrow n + e^+ + \nu_e; \quad 3) \pi^+ \rightarrow \mu^+ + e^- + e^+;$$

$$2) K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu; \quad 4) K^+ \rightarrow e^+ + \pi^0 + \nu_e.$$

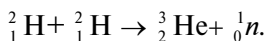
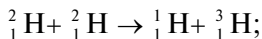
8. Объяснить, почему понадобилось введение цвета кварков.

Вариант 2

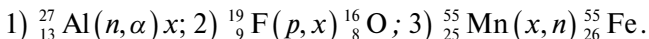
1. Чему равна активность радона, образовавшегося из 1 г радия за 1 ч?

2. Из какого наименьшего количества руды, содержащей 42% чистого урана, можно получить 1 г радия?

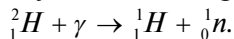
3. Найти энергию, выделяющуюся при ядерных реакциях:



4. Написать недостающие обозначения в следующих ядерных реакциях:



5. Найти наименьшее значение энергии γ -кванта для осуществления реакции разложения дейтона γ -лучами:



6. Какое количество энергии освобождается при соединении одного протона и двух нейтронов в одно ядро?

7. Применить операцию зарядового сопряжения к следующим процессам: 1) $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$;

$$2) p + K^- \rightarrow \varepsilon^0 + \pi^+ + \pi^-.$$

8. Записать, какие комбинации известных в настоящее время кварков воспроизводят свойства: 1) нейтрона; 2) протона; 3) ε^0 -гиперона.

Вариант 3

1. Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи ядра $^{16}_8\text{O}$.

2. В какой элемент превращается $^{238}_{92}\text{U}$ после трёх α -распадов и двух β -распадов?

3. Вычислить дефект массы и энергию связи ядра $^{108}_{47}\text{Ag}$.

4. Каким законам сохранения противоречит процесс $\gamma = p + e^-$?

5. Сколько ядер, содержащихся в 1 г трития ^3_1H , распадается за среднее время жизни этого изотопа?

6. Период полураспада радиоактивного аргона $^{41}_{18}\text{Ar}$ равен 110 мин. Определить время, в течение которого распадается 25% начального количества ядер.

7. Охарактеризовать основные свойства кварков (антикварков) – числа (зарядовое и барионное), спин, странность, цвет, очарование, прелесть.

8. Применить операцию зарядового сопряжения к следующим процессам: 1) $\varepsilon^+ \rightarrow p + \pi^0$;

$$2) p + \tilde{p} \rightarrow \varepsilon^- + \tilde{\Lambda}^0 + K^0 + K^-.$$

Вариант 4

1. Каким законам сохранения противоречит процесс: $\gamma = \mu^+ + e^-$?

2. Период полураспада $^{60}_{27}\text{Co}$ равен 5,3 года. Определить, какая доля первоначального количества ядер этого изотопа

распадается через 5 лет?

3. Определить постоянную распада и число атомов радона, распавшихся в течение суток, если первоначальная масса радона 10 г. Период полураспада $^{222}_{86}\text{Rn}$ равен 3,82 сут.

4. Указать процесс, в котором под действием обычных (нестандартных) частиц образуются две странные частицы с противоположными странностями.

5. Вычислить дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи для ядра элемента $^{24}_{12}\text{Mg}$.

6. Вычислить энергию ядерной реакции
$$^4_2\text{He} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^1_1p + ^7_3\text{Li}.$$

7. Ниже приведены запрещённые способы распада. Перечислить для каждого из них законы сохранения, которые в нём нарушаются:

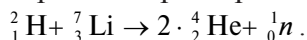
1) $p + p \rightarrow p + \pi^+$; 3) $\pi^- + n \rightarrow \Lambda^0 + K^-$;

2) $\pi^- + p \rightarrow K^- + \varepsilon^+$; 4) $\pi^- \rightarrow \mu^- + e^+ + e^-$.

8. Объяснить, к какой группе элементарных частиц и почему относятся: 1) мюонное нейтрино; 2) нейтрон; 3) фотон; 4) K^0 -мезон.

Вариант 5

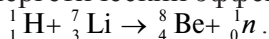
1. Вычислить энергию ядерной реакции



2. Какое количество энергии освобождается при соединении одного протона и двух нейтронов в одно ядро?

3. Вычислить дефект массы и энергию связи ядра $^{14}_7\text{N}$.

4. Вычислить энергетический эффект реакции



5. Указать кварковый состав Ω^- -гиперона.

6. Какой из двух процессов

$$\pi^- + p \rightarrow K^+ + \varepsilon \quad \text{и} \quad \pi^- + p \rightarrow K^- + \varepsilon^+$$

наблюдается, а какой запрещён и почему?

7. Определить, какие из приведённых ниже процессов разрешены законом сохранения лептонного числа:

$$1) p \rightarrow n + e^+ + \nu_e; \quad 3) \pi^+ \rightarrow \mu^+ + e^- + e^+;$$

$$2) K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu; \quad 4) K^+ \rightarrow e^+ + \pi^0 + \nu_e.$$

8. Объяснить, какая характеристика элементарных частиц положена в основу деления адронов на мезоны и барионы.

Вариант 6

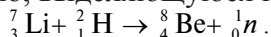
1. Почему стабилен протон?

2. Кинетическая энергия α -частицы, вылетающей из ядра атома радия при радиоактивном распаде, равна 4,78 МэВ. Найти скорость α -частицы и полную энергию, выделяющуюся при вылете α -частицы.

3. В результате распада 1 г радия за год образовалось некоторое количество гелия, занимающего при нормальных условиях объём 0,043 см³. Найти число Авагадро.

4. Вычислить удельную энергию связи для элемента $^{108}_{47}\text{Ag}$.

5. Найти энергию, выделяющуюся при реакции



6. Указать кварковый состав протона.

7. Назвать элементарную частицу, обладающую наименьшей массой. Чему равно зарядовое число этой частицы?

8. Перечислить основные свойства нейтрино и антинейтрино и объяснить, чем, по современным представлениям, они отличаются друг от друга.

Вариант 7

1. Зная постоянную распада λ , определить вероятность того, что оно распадается за промежуток времени от 0 до t .

2. Определить возраст древних деревянных предметов, если известно, что удельная активность изотопа $^{14}_6\text{C}$ у них

составляет $3/5$ удельной активности этого изотопа в только что срубленных деревьях. Период полураспада ядер ^{14}C равен 5570 лет.

3. Вычислить удельные активности (Ки/г) изотопов ^{24}Na и ^{235}U .

4. Считая, что в одном акте деления ядра $^{235}_{92}\text{U}$ освобождается энергия 200 МэВ, определить энергию, выделяющуюся при сгорании 1 кг изотопа ^{235}U , и массу каменного угля с теплотворной способностью 7000 ккал/кг, эквивалентную в тепловом отношении 1 кг ^{235}U .

5. Найти энергию связи ядра изотопа ^7_3Li .

6. Указать кварковый состав π^- и K^+ -мезонов.

7. Записать продукты распада антинейтрино ($\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$)

8. Выбрав из четырёх типов нейтрино (антинейтрино) правильное, написать недостающие обозначения (χ) в каждой из приведённых реакций:

$$1) \chi + {}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e;$$

$$2) \chi + {}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + \mu^-;$$

$$3) \chi + {}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + {}^0_{+1}e.$$

Вариант 8

1. Найти энергию связи ядра атома гелия ^4_2He .

2. При бомбардировке изотопа азота $^{14}_7\text{N}$ нейтронами образуется изотоп углерода $^{14}_6\text{C}$, который оказывается β -радиоактивным. Написать уравнения обеих реакций.

3. При бомбардировке изотопа лития ^6_3Li дейтонами образуются две α -частицы. Найти массу изотопа ^6_3Li .

4. Какая доля радиоактивных ядер ^{60}Co , период полураспада которых 71,3 дня, распадается за месяц?

5. За год распалось 60% некоторого исходного радио-

активного элемента. Определить период полураспада этого элемента.

6. Указать кварковый состав π^+ и π^- - мезонов .

7. Объяснить, в чём заключается принцип зарядового сопряжения.

8. Элементарным частицам приписывают чётность. Что она характеризует? В чём заключается закон сохранения чётности и при каких взаимодействиях он выполняется?

Вариант 9

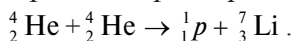
1. Удельная активность препарата, состоящего из β -активного кобальта ^{58}Co и неактивного ^{59}Co , равна 60 Ки/г . Период полураспада ^{58}Co равен 71,3 дня. Определить отношение массы активного кобальта в этом препарате к массе препарата (%).

2. Почему невозможна реакция ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + e^- + \nu$?

3. Период полураспада $^{60}_{27}\text{Co}$ равен 5,3 года. Определить постоянную распада и среднюю продолжительность жизни атомов этого элемента.

4. Вычислить удельную энергию связи ядра $^{16}_8\text{O}$.

5. Вычислить энергию ядерной реакции



6. Указать кварковый состав гиперона Σ^+ .

7. Назвать и охарактеризовать четыре типа фундаментальных взаимодействий, а также сравнить радиусы их действия. Какое из взаимодействий является универсальным?

8. В состоянии покоя π^0 -мезон распадается на два γ -кванта. Принимая массу пиона равной $264,1 m_e$, определить энергию каждого из возникших γ -квантов.

Вариант 10

1. Какая доля начального количества радиоактивного вещества останется нераспавшейся через 1,5 периода полураспада?

2. За какой промежуток времени скорость радиоактивного распада уменьшится в 2 раза?

3. Изменение массы при образовании ядра $^{15}_7\text{N}$ равно 0,12369 а.е.м. Определить массу атома.

4. Определить энергию быстрых нейтронов, возникающих в результате реакции $^9_4\text{Be} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{12}_6\text{C} + ^1_0\text{n}$.

5. Какой изотоп образуется из α -активного ^{226}Ra в результате пяти α -распадов и четырёх β -распадов?

6. Указать электрические заряды шести антикварков.

7. Известно, что продукты распада заряженных пионов испытывают дальнейший распад. Записать цепочку реакций для π^+ и π^- - мезонов.

8. При захвате протоном отрицательного мюона образуется нейтрон и ещё одна частица. Записать эту реакцию и определить, что это за частица.

Вариант 11

1. Указать кварковый состав Λ -гиперона.

2. При бомбардировке изотопа ^6_3Li дейтронами

^2_1H ($m_{^2_1\text{H}} = 3,3446 \cdot 10^{-27}$ кг) образуются две α -частицы

^4_2He ($m_{^4_2\text{He}} = 6,64 \cdot 67 \cdot 10^{-27}$ кг) и выделяется энергия

$\Delta E = 22,3$ МэВ. Определить массу изотопа лития.

3. В результате соударения дейтрона с ядрами бериллия ^9_4Be образовалось новое ядро и нейтрон. Определить порядковый номер и массовое число образовавшегося ядра. Записать ядерную реакцию и определить её энергетический эффект.

4. Определить массу нейтрального атома хрома $^{52}_{24}\text{Cr}$.

5. Определить период полураспада радиоактивного изотопа, если $5/8$ начального количества ядер этого изотопа распалось за время $t = 849$ с.

6. Записать схему электронного захвата (e -захвата) и объ-

яснить его отличие от β^+ -распадов. Привести пример электронного захвата.

7. Дать определение и объяснение происхождения первичного и вторичного космического излучения.

8. Записать схемы распада положительного и отрицательного мюонов.

Вариант 12

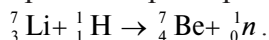
1. Указать кварковый состав π^+ и π^- -мезонов.

2. В опытах Жолио – Кюри магний ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ облучался α -частицами, в результате чего испускался нейтрон и образовывалось искусственно-радиоактивное ядро, испытывающее β^+ -распад. Записать данную реакцию.

3. В процессе осуществления реакции $\gamma \rightarrow {}^0_{-1}e + {}^0_{+1}e$ энергия фотона E_0 составляла 2,02 МэВ. Определить полную кинетическую энергию позитрона и электрона в момент их возникновения.

4. При захвате теплового нейтрона ядром ${}^{235}_{92}\text{U}$ образуются два осколка деления и два нейтрона. Определить зарядовое число Z и массовое число A одного из осколков, если другим осколком является ядро стронция ${}^{95}_{38}\text{Sr}$.

5. Определить энергию ядерной реакции



6. Начальная активность 1 г изотопа радия ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ равна 1 Ки. Определить период полураспада $T_{1/2}$ этого изотопа.

7. Объяснить, к какому типу относится цепная реакция деления, если коэффициент размножения: 1) $K > 1$; 2) $K = 1$; 3) $K < 1$.

8. Перечислить, какие величины сохраняются для процессов взаимопревращаемости элементарных частиц, обусловленных слабым и сильным взаимодействиями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ахиезер А. И.* Элементарные частицы /А.И. Ахиезер, М. П. Рекало.–М.: Наука, 1986.– 256 с.
2. *Белокуров В. В.* Теория взаимодействий частиц / В.В. Белокуров, Д. В. Широков.–М.: Наука, 1986.– 158 с.
3. *Вайнберг С.* Первые три минуты. Современный взгляд на происхождение Вселенной: пер. с англ./ под ред. Л. Б. Зельдовича.–М.: Энергоиздат, 1981.– 208 с.
4. *Гарднер М.* Этот правый, левый мир: пер.с англ.– Изд. 2-е.–М.: Мир, 1967.– 268 с.
5. *Детлаф А. А.* Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский.–М.: Высш. шк., 1989.– 607 с.
6. *Дирак П. А.* Пути физики: пер. с англ.–М.: Энергоатомиздат, 1983.– 88 с.
7. *Касьянов В. Я.* Физика. Класс 11.–М.: Дрофа,– 412 с.
8. *Мухин К. И.* Экспериментальная ядерная физика.–Изд. 4-е.–М.: Энергоатомиздат, 1983.–Т. 1.– 616 с.; Т. 2. – 376 с.
9. *Мэрион Дж. Б.* Физика и физический мир.–М.: Мир, 1975.– 623 с.
10. *Орир Дж.* Физика: пер. с англ.–М.: Мир, 1981.– Т. 1, 2.– 622 с.
11. *Окунь А. Б.* Физика элементарных частиц.–М.: Наука, 1984.– 224 с.
12. *Савельев И. В.* Курс общей физики.– М.: Наука, 1982.– 304 с.
13. *Трофимова Т. И.* Курс физики.–М.: Высш. шк., 2003.– 542 с.
14. *Чечуев В. Я.* Элементы физики атомного ядра / В.Я. Чечуев, Л. А. Митина.– Новосибирск: НГАУ, 2009.– 36 с.
15. *Фейнман Р.* Фейнмановские лекции по физике: пер. с англ. / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс.–М.: Мир, 1965. Вып. 1.– 268 с.; вып. 2.– 168 с.; вып. 3.– 238 с.; вып. 4.– 261 с.

16. *Фраунфельдер Г.* Субатомная физика: пер. с англ. / Г. Фраунфельд, Э. Хенли.—М.: Мир, 1979.— 736 с.

17. *Широков Ю. М.* Ядерная физика / Ю. М. Широков, Н. П. Юдин.—М.: Наука, 1980.— 727 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Дефект массы и энергия связи ядра.....	4
2. Радиоактивность.....	6
3. Ядерные реакции.....	14
4. Элементарные частицы.....	20
5. Примеры решения задач.....	24
6. Задачи для самостоятельного решения.....	30
Библиографический список.....	39

Составители:
Чечуев Владимир Яковлевич
Викулов Станислав Викторович

**РЕПЕТИТОР ПО ФИЗИКЕ.
ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ**

Учебное пособие

Редактор *Т. К. Коробкова*
Компьютерная верстка *Е. А. Орлова*

Подписано в печать 20 сентября 2016 г. Формат $60 \times 84^{1/16}$.

Объем 2,0 уч.-изд. л., 2,6 усл. печ. л. Тираж 100 экз.

Изд. № 35. Заказ № 1650.

Отпечатано в издательском центре НГАУ «Золотой колос»
630039, Новосибирск, ул. Добролюбова, 160, каб. 106.
Тел. (383) 267–09–10. E-mail: 2134539@mail.ru