

В учебном пособии рассматриваются вопросы ядерной физики и физики элементарных частиц с примерами решения базовых задач этих разделов физики микромира. В том числе в пособие включен раздел о гипотетических элементарных частицах - кварках и их свойствах, обычно упоминаемых только в спецкурсах по ядерной физике.

Учебное пособие рекомендуется для студентов инженерных специальностей при изучении ими курса физики, а также для преподавателей при подготовке студентов к различным формам оценки их текущих, промежуточных и итоговых знаний по физике, в том числе в период аттестации образовательного процесса.

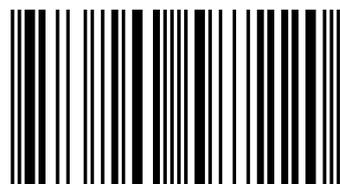


Евгений Вржаш  
Юлия Клибанова

**Евгений Вржаш** к.т.н., доц.,  
**Юлия Клибанова** к.ф.-м.н., доц.  
(Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского). Научные направления: общая физика, физика атмосферы и гидросферы, космическая физика. Научные конференции и публикации в России, Англии, Германии, Люксембурге, Польше, Чехии, Болгарии, Монголии, Украине, Казахстане.

# Физика микромира

Атомное ядро и элементарные частицы



978-620-0-58722-0

 **LAMBERT**  
Academic Publishing

**Евгений Вржац  
Юлия Клибанова**

**Физика микромира**

FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY

**Евгений Вржач  
Юлия Клибанова**

# **Физика микромира**

**Атомное ядро и элементарные частицы**

FOR AUTHOR USE ONLY

**LAP LAMBERT Academic Publishing**

## **Imprint**

Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this work is in no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: [www.ingimage.com](http://www.ingimage.com)

Publisher:

LAP LAMBERT Academic Publishing

is a trademark of

International Book Market Service Ltd., member of OmniScriptum Publishing Group

17 Meldrum Street, Beau Bassin 71504, Mauritius

Printed at: see last page

**ISBN: 978-620-0-58722-0**

Copyright © Евгений Вржаш, Юлия Клибанова

Copyright © 2020 International Book Market Service Ltd., member of  
OmniScriptum Publishing Group

FOR AUTHOR USE ONLY

Евгений Вржач  
Юлия Клибанова

**ФИЗИКА МИКРОМИРА: атомное ядро и элементарные  
частицы**

FOR AUTHOR USE ONLY

Учебное пособие

2020

УДК 539.1, 539.12

**Вржащ Е.Э., Клибанова Ю. Ю.**

**Физика микромира: атомное ядро и элементарные частицы**

Учебное пособие, 2020. – 55 с., илл.

Материал учебного пособия включает в себя разделы ядерной физики и физики элементарных частиц, которые изучаются в небольшом объеме в общем курсе физике в вузах нефизического профиля. Более того, этот материал основан на решении практических задач, теория которых требует отдельного, более глубокого изучения.

Данное пособие предназначено в первую очередь для самостоятельной работы студентов. Оно включает в себя основные теоретические сведения по ядерной физике и физике элементарных частиц, набор базовых задач по этим разделам физики, для решения которых необходимы абсолютное понимание физики рассматриваемых явлений и математическая подготовка. Все практические задания даны с решениями и методическими указаниями к большинству этих решений. Для российских студентов учебное пособие соответствует программе курса физики высшего образования уровня бакалавриата по направлениям подготовки 35.03.06 – Агроинженерия, 13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника, 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника высших учебных заведений и ориентировано на освоение общепрофессиональных компетенций.

Учебное пособие могут быть рекомендованы и для преподавателей, готовящих студентов к различным формам тестирования и итоговой оценке знаний по физике.

Научные направления: общая физика, физика атмосферы и гидросферы, космическая физика.

## **ОГЛАВЛЕНИЕ**

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>1. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА</b> .....	7
1.1. Открытие ядра у атома.....	7
1.2. Состав ядра и основные его характеристики.....	8
1.3. Энергия связи атомных ядер. Дефект массы.....	10
<b>2. РАДИОАКТИВНОСТЬ</b> .....	13
1.1. Естественная радиоактивность. $\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ - излучения.....	13
1.2. Закон радиоактивного распада.....	15
1.3. Искусственная радиоактивность. К-захват.....	17
1.4. Деление тяжелых ядер. Цепная реакция.....	20
1.5. Термоядерные реакции (синтез).....	23
<b>3. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПРИРОДЕ</b> .....	27
<b>4. ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ</b> .....	31
4.1. Основные характеристики элементарных частиц и их классификация.....	31
4.2. Превращение частиц.....	34
4.3. Законы сохранения в физике элементарных частиц.....	35
4.4. Понятие о кварках.....	37
4.5. Космические лучи.....	40
<b>5. ЗАДАЧИ И ИХ РЕШЕНИЯ</b> .....	43
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	54
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	55

FOR AUTHOR USE ONLY

## ***ВВЕДЕНИЕ***

Во все времена главным стремлением науки было построение целостной картины окружающего мира. Понимание сущности бесконечно малого – «микромира» позволило объяснить многие физические явления. Законы микромира представлены в «квантовой механике» и «физике ядра» [1,2]. Квантовая механика описывает закономерности движения микрочастиц, таких как элементарные частицы, атомы, молекулы, атомные ядра, во внешних полях и системах. Благодаря этому, были установлены строение атома и природа химических связей, объяснены периодическая система элементов и свойства элементарных частиц. Квантовая механика позволила понять многие свойства твердых тел (металлов, полупроводников, диэлектриков). Объяснила температурную зависимость теплоемкостей газов и твердых тел, явления ферромагнетизма, сверхтекучесть, сверхпроводимость и многое другое.

Специфические законы квантовой механики лежат в основе работы крупнейших технических объектов XX – XXI вв. Работа ядерного реактора обусловлена возможностью осуществления термоядерных реакций, использование квантово-механического излучения составляет фундамент квантовой электроники. Полупроводниковая техника, компьютеры, квантовые компьютеры, сверхъёмкие аккумуляторы. Получен второй по прочности материал графен, доказано существование кварк-глюонной плазмы с температурой 4 триллиона °С (в 250 тысяч раз горячее, чем в центре Солнца), во время экспериментов на Большом адронном коллайдере (БАК) найдена элементарная частица – бозон Хиггса, отвечающая за массу всех прочих частиц.

Кроме того физика микромира все теснее сливается с космологией – теорией происхождения Вселенной. Законы микромира помогают понять природу астрофизических объектов – белых карликов, нейтронных звезд; выяснить механизм протекания термоядерных реакций на Солнце и звездах.

Первые исследования атомов как структурных единиц были выполнены в XVIII и XIX вв. Химик Дальтон принял атомный вес водорода за единицу и сопоставил с ним атомные веса других газов. Д. И. Менделеевым построил

систему химических элементов, основанную на их атомном весе. В 1897 г. Дж. Томсон открыл частицу катодных лучей – электрон, который отрицательно заряжен и входит в состав всех атомов. Исследования атома начинаются с открытия явления радиоактивности (самопроизвольного превращения атомов одних элементов в атомы других) французскими физиками А. Беккерелем, Пьером и Марией Кюри. В 1911 г. Э. Резерфорд сделал вывод, что атом имеет структуру, напоминающую солнечную систему: в центре находится атомное ядро, а вокруг него по своим орбитам движутся электроны. В 1913 г. датский физик Нильс Бор, предложил следующую гипотезу строения атома: «В каждом атоме существует несколько стационарных состояний или орбит электронов, двигаясь по которым электрон существует, не излучая. При переходе электрона из одного стационарного состояния в другое атом излучает или поглощает порцию энергии». Концепция Бора позволяла объяснить устойчивость атомов и излучение ими энергии.

Дальнейшие исследования было связаны с элементарными частицами, то есть частицами, входящих в состав атома. На данный момент их известно более 400 (вместе с античастицами).

# 1. ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА

## 1.1. Открытие ядра у атома

Гипотеза о том, что все вещества в природе состоят из огромного числа мельчайших частиц (атомов) зародилась свыше 2000 лет назад в Древней Греции (Демокрит). Но только в XX веке удалось построить удовлетворительные физические модели атомов и составляющих их частей.

Ядерная модель атома была предложена Э. Резерфордом в 1911 году. Эту модель он получил в результате опытов по рассеянию  $\alpha$  – частиц тонкой металлической фольгой. Опыт осуществлялся по схеме, изображенной на рисунке 1.

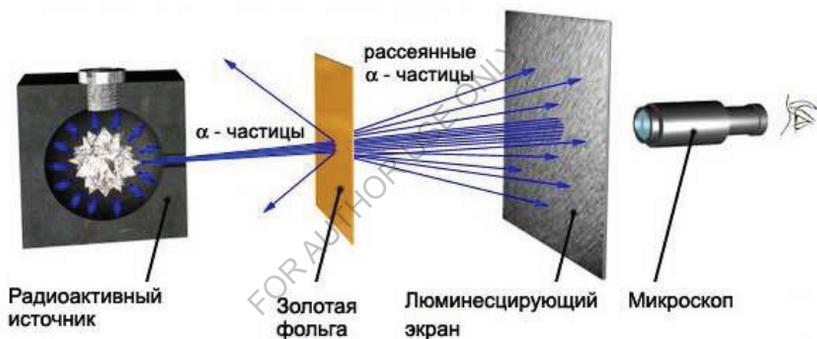


Рисунок 1 – Схема опыта Э. Резерфорда

Узкий пучок  $\alpha$ -частиц с энергией 4,05 МэВ, испускался от радиоактивного источника (уран или радий) и попадал на золотую фольгу. Проходя через фольгу  $\alpha$  – частицы отклонялись на различные углы. Рассеянные частицы ударялись об экран, покрытый люминесцирующим веществом (сульфатом цинка  $ZnS$ ), и вызываемые им вспышки света, сцинтилляции (от латинского *scintillation* – сверкание) наблюдались в микроскопе. Микроскоп и связанный с ним экран можно было вращать вокруг оси, проходящей через центр фольги. Т.е. можно было всегда измерить угол отклонения. Весь прибор помещался в вакуум, чтобы  $\alpha$ -частицы не рассеивались при столкновении с молекулами

воздуха. опыте обнаружилось, что некоторые  $\alpha$ -частицы отклонялись на большие углы, до  $180^\circ$ . Тот факт, что многие  $\alpha$ -частицы проходили сквозь фольгу, не отклоняясь от своего направления движения, говорит о том, что атом не является сплошным образованием. Так как масса  $\alpha$ -частицы почти в 8000 раз превосходит массу электрона, то электроны, входящие в состав атомов фольги, не могут заметно изменить траекторию  $\alpha$ -частицы. Рассеяние  $\alpha$ -частицы может вызывать положительно заряженная частица атома – атомное ядро, в котором сконцентрированы почти вся масса и почти весь положительный заряд атома.

## 1.2. Состав ядра и основные его характеристики

Согласно ядерной модели Резерфорда атом состоит из положительно заряженного ядра размером порядка  $10^{-15} - 10^{-14}$  м, вокруг которого по замкнутым орбитам радиуса примерно  $10^{-10}$  м движутся отрицательно заряженные электроны, создающие электронную оболочку атома (рис. 2). Заряд ядра равен заряду всех окружающих его электронов. Поэтому в целом атом электрически нейтрален. В ядре сосредоточена почти вся масса атома. Эта модель напоминает строение солнечной системы и поэтому она иногда называется планетарной моделью.

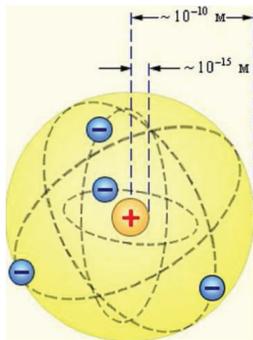


Рисунок 2 – Строение атома

В свою очередь атомное ядро не является точечной массой с положительным зарядом, а обладает сложным строением и огромной плотностью около  $10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>.

Согласно общепризнанной гипотезе Иваненко-Гейзенберга (1932 г.) в состав всех атомных ядер входят два вида частиц – протоны и нейтроны, которые вместе называются нуклонами.

Важнейшими характеристиками ядра являются его заряд, масса, а также спин и магнитный момент.

Протон имеет положительный заряд, равный заряду электрона ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл), и массу покоя  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг  $\approx 1836 m_e$ , где  $m_e$  – масса электрона.

Нейтрон – нейтральная частица с массой покоя  $m_n \approx m_p$ .

В атомной и ядерной физике массы атомов принято измерять не в кг, а в атомных единицах массы (а.е.м.). За а.е.м. принята 1/16 массы атома кислорода.  $1 \text{ а.е.м.} = 1,65976 \cdot 10^{-27}$  кг.

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

Число протонов в атомном ядре равно атомному номеру элемента в таблице химических элементов Менделеева  $N_p = Z$  и определяет заряд ядра. Тогда общее число нейтронов  $N_n = A - Z$ .

Размер ядра характеризуется радиусом ядра, имеющим условный смысл ввиду размытости границы ядра. Размер ядра примерно  $10^{-14} - 10^{-15}$  м.

Его рассчитывают по эмпирической формуле

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

где  $R_0 (1,3 - 1,7) \cdot 10^{-15}$  м

Общепринято атомное ядро обозначать символом  ${}_Z X^A$ , где  $X$  – символ химического элемента,  $Z$  – атомный номер (заряд ядра),  $A$  – массовое число.

Ядра с одинаковым  $Z$ , но разными  $A$  (т.е. с разными числами нейтронов) называются *изотопами*, а ядра с одинаковыми  $A$ , но разными  $Z$  (т.е. с разными числами протонов) называются *изобарами*.

Например:

–  ${}^1_1\text{H}^1$  (протий),  ${}^2_1\text{H}^2$  (дейтерий),  ${}^3_1\text{H}^3$  (тритий),  ${}^{235}_{92}\text{U}$  (уран),  ${}^{238}_{92}\text{U}$  (уран) – изотопы;  
 –  ${}^{36}_{16}\text{S}$  (сера),  ${}^{36}_{18}\text{Ar}$  (аргон) и  ${}^{104}_{44}\text{Ru}$  (рутений),  ${}^{104}_{46}\text{Pd}$  (палладий) – изобарные пары.

Существует около 300 устойчивых, 2000 неустойчивых изотопов и около 150 устойчивых изобар в виде пар или триад.

Атомное ядро помимо заряда и массы обладает спином и магнитным моментом.

*Спин  $I$*  (англ. *to spin*- вращаться, вертеться) – представляет собой собственный механический момент импульса (количества движения) ядра, имеющий квантовую природу и представляющий особое свойство ядра.

В состав ядра входят протоны и нейтроны, каждый из которых обладает спином  $\hbar/2$  ( $\hbar$  – постоянная Планка «аш с чертой») =  $1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с). Таким образом, спин ядра, состоящего из четного числа частиц, является целым числом (в единицах  $\hbar$ ). Спин же ядра, состоящего из нечетного числа частиц, является полуцелым числом (в единицах  $\hbar$ ).

*Магнитный момент* ядра состоит из собственных магнитных моментов ядерных частиц. Для его измерения вводится по аналогии с магнетомом Бора так называемый *ядерный магнетон*  $\mu_{\text{я}} = \frac{e\hbar}{2m_p} \approx 5,05 \cdot 10^{-27}$  Дж/Тл, где  $e$  – заряд электрона,  $\hbar$  – постоянная Планка,  $m_p$  – масса протона.

Между спином  $I$  ядра, измеренным в единицах  $\hbar$ , и магнитным моментом  $D_i$ , измеренным в ядерных магнетонах, существует соотношение  $D_i = g_i I$ , где  $g_i$  – ядерное гиромагнитное отношение.

### 1.3. Энергия связи атомных ядер. Дефект массы

Устойчивость атомных ядер означает, что между нуклонами в ядрах существует определенная связь, которая обусловлена действием ядерных сил.

Для разрыва этой связи, т.е. для полного разобращения нуклонов, необходимо затратить некоторое количество энергии.

Энергия, необходимая для разобращения нуклонов, составляющих ядро, называется энергией связи ядра.

Энергия связи атомного ядра  $\Delta E_{\tilde{n}\hat{a}}$  является разностью между энергией протонов и нейтронов в ядре и их энергией в свободном состоянии.

Мерой энергии связи атомного ядра является *дефект массы*. Дефектом массы  $\Delta m$  называется разность между суммарной массой всех нуклонов ядра в свободном состоянии и массой ядра  $\hat{I} \hat{y}$ :

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - \hat{I} \hat{y} \quad (2)$$

где:  $Z$  – число протонов в ядре;  $m_p$  – масса протона;  $(A - Z)$  – число нейтронов в ядре;  $m_n$  – масса нейтрона.

Используя закон пропорциональности массы и энергии Эйнштейна,  $\Delta \hat{A}_{\tilde{n}\hat{a}} = \Delta mc^2$ , где  $c$  – скорость света в вакууме, получим:

$$\Delta \hat{A}_{\tilde{n}\hat{a}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - \hat{I} \hat{y}] \tilde{\pi}^2 \quad (3)$$

В ядерной физике энергия связи обычно вычисляется в МэВ (мегаэлектрон-вольтах).  $1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$ .

Тогда формула (3) примет вид:

$$\Delta \hat{A}_{\tilde{n}\hat{a}} = 931 [Zm_p + (A - Z)m_n - \hat{I} \hat{y}] \quad (4)$$

О том, как велика энергия связи, можно судить по такому примеру: образование 4 г гелия сопровождается выделением такой же энергии, что и сгорание 1,5 – 2 вагонов каменного угля.

FOR AUTHOR USE ONLY

## 2. РАДИОАКТИВНОСТЬ

### 2.1 Естественная радиоактивность. $\alpha$ -, $\beta$ -, $\gamma$ - излучения

Естественная радиоактивность была открыта в 1896 г. французским физиком А. Беккерелем, обнаружившим, что соли урана испускают невидимые лучи, способные проникать сквозь слои непрозрачных веществ, ионизировать газы и т.д. Дальнейшие исследования, проведенные Э. Резерфордом, М. Склодовской-Кюри, П. Кюри и другими учеными различных стран, показали, что это явление свойственно не только урану, но и многим тяжелым химическим элементам (полоний, торий, радий). Все эти элементы были названы радиоактивными элементами, а испускаемые ими лучи – радиоактивными лучами.

*Естественной радиоактивностью называется самопроизвольное испускание тяжелых химических элементов, в результате которого происходит превращение одних химических элементов в другие.*

По своему составу радиоактивное излучение является сложным: в него входят в основном три различных излучения, получивших названия  $\alpha$  -,  $\beta$  -,  $\gamma$  – лучей.

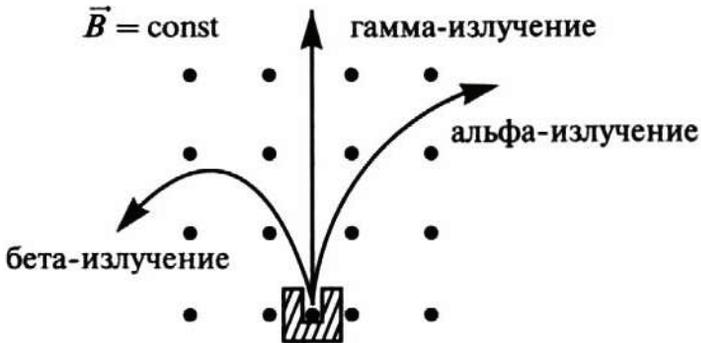


Рисунок 3 – Радиоактивное излучение

$\alpha$  (альфа) – лучи несут положительный заряд, равный по абсолютному значению удвоенному заряду электрона, и представляют собой *поток ядер гелия*. Они отклоняются в электрических и магнитных полях и полностью поглощаются слоем алюминия толщиной 0,06 мм или слоем биологической ткани в 0,12 мм. В воздухе распространяются со скоростью до 20000 км/с.

$\beta$  (бета) – лучи являются *потоком быстрых электронов* со скоростью до 200000 км/с. Они отклоняются в электрических и магнитных полях и проникают в алюминий до толщины 2 см и в биологическую ткань – до 6 см.

$\gamma$  (гамма) – лучи представляют собой *жесткое электромагнитное излучение*. Они не отклоняются в электрических и магнитных полях, распространяются со скоростью света в вакууме и обладают наибольшей из всех радиоактивных излучений проникающей способностью (до 5 см в свинце). Тело человека  $\gamma$  – лучи пронизывают насквозь.

Радиоактивные элементы, испуская излучение, превращаются в другие элементы. При этом, поскольку излучение приводит к появлению нового химического элемента, можно сделать вывод, что изменения происходят именно с ядром атома. Радиоактивное превращение ядер одних элементов в ядра других элементов называют *радиоактивным распадом*. Происходит спонтанное изменение состава ядра (его заряда  $Z$  и массового числа  $A$ ) или внутреннего строения нестабильных атомных ядер путём испускания элементарных частиц, гамма-квантов.

При  $\alpha$  – распаде элемент смещается в периодической системе Менделеева на два номера влево с уменьшением массового числа на четыре единицы.

При  $\beta$  – распаде элемент смещается в периодической системе Менделеева на один номер вправо без изменения массового числа.

Термина  $\gamma$  – распад применяется редко.

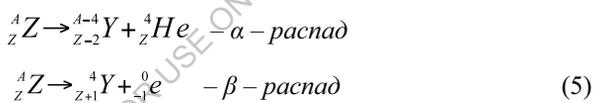
В настоящее время, кроме альфа-, бета- и гамма-распадов, обнаружены распады с испусканием нейтрона, протона (а также двух протонов), кластерная радиоактивность, спонтанное деление. Электронный захват, позитронный

распад (или  $\beta^+$  – распад), а также двойной бета-распад (и его виды) обычно считаются различными типами бета-распада.

## 2.1 Закон радиоактивного распада

В ядерной физике существуют основные правила, описывающие превращения элементов в процессе радиоактивного распада, так называемые *правила смещения при радиоактивном распаде*. Эти правила были сформулированы в 1913 г. немецким физиком и химиком К. Фаянсом и независимо от него – английским радиохимиком Ф. Содди, который в 1921 году был удостоен Нобелевской премии по химии за исследования природы изотопов.

Правила смещения могут быть записаны в виде формул:



где  $X$  – символ химического элемента распадающегося ядра;  $Y$  – то же для ядра продукта распада;  ${}^4_2He$  – ядро изотопа гелия;  ${}^0_{-1}e$  – обозначение электрона;  $A$  – массовое число;  $Z$  – заряд ядра.

Радиоактивный распад ведет к постепенному уменьшению числа атомных ядер радиоактивного элемента.

Установим этот закон – закон радиоактивного распада.

Число атомных ядер  $dN$ , распадающихся за время  $dt$ , пропорционально времени и общему числу  $N$  ядер радиоактивного элемента  $dN \sim Ndt$ .

Переходя от знака пропорции к знаку равенства, получим

$$dN = \lambda N dt, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент пропорциональности, называемый постоянной распада.

Знак минус указывает на убыль числа ядер в результате радиоактивного распада. Отсюда, постоянная распада представляет собой относительную убыль числа ядер, подвергающихся распаду за единицу времени:

$$\lambda = -\frac{dN/N}{dt} \quad (7)$$

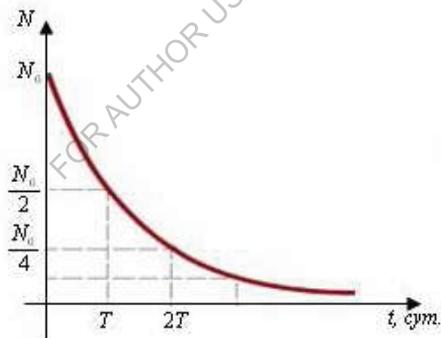
Постоянная распада имеет размерность  $s^{-1}$  и характеризует долю ядер, распадающихся за единицу времени, т.е. определяет скорость радиоактивного распада.

Интегрируя уравнение (6) в пределах от  $t = 0$  до  $t$ , получаем

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (8)$$

где  $N_0$  – число радиоактивных ядер в начальный момент времени;  $N$  – число радиоактивных ядер в момент времени  $t$ .

Соотношение (8) называется *законом радиоактивного распада*. Графически этот закон представлен на рисунке 4.



**Рисунок 3** – Закон радиоактивного распада

Для характеристики быстроты радиоактивного распада вводится понятие *периода полураспада* –  $T$ .

*Периодом полураспада* называется время, в течение которого количество атомных ядер исходного элемента уменьшается вдвое.

Из формулы (8) следует, что  $e^{-\lambda T} = 1/2$ .

Откуда

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (9)$$

Величина, обратно пропорциональная постоянной распада, представляет среднее время жизни радиоактивного ядра  $\tau = 1/\lambda$ . Следовательно,  $T = \tau \ln 2$ . Откуда

$$\tau = \frac{T}{\ln 2} 1,44T \quad \text{и}$$

То есть среднее время жизни приблизительно в полтора раза больше периода полураспада.

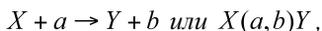
Значения  $T$ ,  $\tau$  и  $\lambda$  у различных радиоактивных элементов весьма различные. Наряду с такими «долгоживущими» элементами, как уран  ${}_{92}^{238}\text{U}$  ( $T=4,5 \cdot 10^9$  лет), встречаются и «короткоживущие» элементы, как, например, полоний  ${}_{84}^{214}\text{Po}$  ( $T=1,5 \cdot 10^{-4}$  с).

### 2.3 Искусственная радиоактивность. К – захват

Изучение естественной радиоактивности показало, что превращение одного химического элемента в другой обусловлено внутриядерными процессами. В связи с этим были предприняты попытки превращения одних химических элементов в другие путем воздействия на атомные ядра. Эффективными средствами такого воздействия оказалась бомбардировка атомных ядер частицами высокой энергии (от нескольких миллионов до десятков миллиардов эВ).

*Процесс превращения атомных ядер, обусловленный воздействием быстрых элементарных частиц (или ядер других атомов), называется ядерной реакцией.*

Вид ядерной реакции записывается следующим образом:



где  $X$  и  $Y$  – исходные и конечные ядра,  $a$  и  $b$  – бомбардирующая и испускаемая в ядерной реакции частица.

Ядерные реакции классифицируются по следующим признакам:

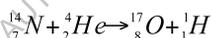
1) по роду участвующих в них частиц – реакции под действием нейтронов; реакции под действием заряженных частиц (например протонов, дейтронов,  $\alpha$ -частиц); реакции под действием  $\gamma$ -квантов.

2) по энергии вызывающих их частиц – реакции при малых энергиях ( $\sim$  эВ), происходящие в основном с участием нейтронов; реакции при средних энергиях ( $\sim$  МэВ), реакции, происходящие при высоких энергиях ( $\sim$  сотни и тысячи МэВ).

3) по роду участвующих в них ядер – реакции на лёгких ядрах ( $A < 50$ ); реакции на средних ядрах ( $50 < A < 100$ ); реакции на тяжёлых ядрах ( $A > 100$ );

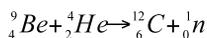
4) по характеру происходящих ядерных превращений – реакции с испусканием нейтронов; реакции с испусканием заряженных частиц; реакции захвата.

Первая искусственная ядерная реакция была осуществлена Резерфордом в 1919 г., превратившим атомные ядра азота  ${}^{14}_7N$  в ядра изотопа кислорода  ${}^{17}_8O$  бомбардировкой  $\alpha$  – частицами:



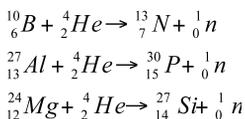
где  ${}^1_1H$  – протон.

В 1932 г. английский физик Джеймс Чедвик бомбардировкой бериллиевой пластинки  $\alpha$  – частицами впервые получил нейтрон:



Наиболее детально явление искусственной радиоактивности было исследовано французскими физиками Фредериком и Ирен Жолио-Кюри в 30-х годах XX века.

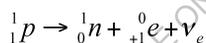
Они подвергли бомбардировке  $\alpha$  – частицами ядра алюминия, бора и магния и обнаружили радиоактивные продукты распада:



Опыты показали, что изменение активности этого собственного радиоактивного излучения удовлетворяет основному закону радиоактивного распада (7), т.е. экспоненциально зависит от времени, как в случае естественной радиоактивности.

*Явление искусственной радиоактивности заключается в том, что под действием  $\alpha$  – частиц, а также нейтронов и других частиц, могут возникать искусственно радиоактивные ядра, дающие собственные радиоактивные излучения.*

Условие устойчивости ядер (3) может быть нарушено также путем введения в ядро избыточных протонов. Это приведет к возрастанию энергии ядер по сравнению с ее минимальным значением (3) и к появлению у ядер радиоактивных свойств. Такие ядра будут претерпевать радиоактивный распад, соответствующий превращению избыточного протона в нейтрон по схеме



Возникающая при этом частица  ${}^0_{+1}e$  с положительным единичным зарядом имеет массу, равную массе электрона, и называется *позитроном*. Реакция сопровождается выбрасыванием электронного нейтрино  $\nu_e$  – незаряженной частицы с массой покоя, равной нулю.

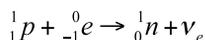
Искусственное радиоактивное превращение, приводящее к появлению позитронов, называется радиоактивным  $\beta_+$  - распадом в отличие от обычного электронного  $\beta$  – распада, который часто обозначается символом  $\beta$ .

Однако превращение протона в нейтрон в ядре может происходить, кроме процесса  $\beta_+$  - радиоактивности, с помощью так называемого *K – захвата*, обнаруженного Л. Альварецем в 1937 г. (иногда применяется термин *e – захват*).

Этот вид искусственной радиоактивности заключается в том, что превращение  ${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n$  сопровождается исчезновением одного из электронов на ближайшей к ядру К – оболочке атома. Протон, превращаясь в нейтрон, как бы

«захватывает» электрон с К – оболочки. Отсюда термин *K – захват* (или *e – электронный захват*).

К – захват может быть описан схемой



На самом деле захвата электрона ядром не происходит. Превращение протона в нейтрон в ядре сопровождается одновременным исчезновением электрона на К – оболочке. Примером К – захвата является превращение радиоактивного ядра бериллия  ${}^7_4Be$  в устойчивое ядро лития  ${}^7_3Li$ . Всего известно свыше 200 изотопов (от  ${}^7_4Be$  до  ${}^{256}_{101}Md$ ), распадающихся путем К – захвата.

Вообще в настоящее время получено свыше 1500 устойчивых и радиоактивных изотопов, которые находят широкое применение в самых разнообразных отраслях человеческой деятельности.

#### 2.4 Деление тяжелых ядер. Цепная реакция

В конце 1938 г. в Германии произошло событие, ставшее подлинной революцией в физике атома и атомного ядра и определившее ход дальнейшего развития цивилизации. В этом году немецкие физикохимики О. Хан и Ф. Штрассман открыли реакцию деления ядер урана с выделением большого количества энергии. Расчет показал, что при делении ядер, содержащихся в одном килограмме урана, должна выделиться энергия, эквивалентная энергии, выделяющейся при сгорании 2 млн. тонн бензина.

Хан и Штрассман при бомбардировке ядер урана использовали нейтроны, поскольку они, будучи электрически нейтральными, не испытывают электростатического отталкивания со стороны ядра. При этом в момент деления из ядра урана выбрасывались 2-3 нейтрона, называемые медленными. Энергетический спектр мгновенных нейтронов простирается от очень малых энергий – порядка 1 эВ и менее до 10 МэВ. Нейтроны, обладающие большей 1,5 МэВ энергией, называются быстрыми; нейтроны, обладающие меньшей

энергией - медленными; нейтроны с очень малыми энергиями называются тепловыми.

Осколки разделившегося ядра являются радиоактивными: они испускают  $\beta$ -,  $\gamma$  – лучи и нейтроны. Эти нейтроны, в отличие от мгновенных, называются запаздывающими (они выбрасываются в течение нескольких минут после акта деления).

В процессе деления ядро изменяет форму – последовательно проходит через следующие стадии (рис. 4): шар, эллипсоид, гантель, два грушевидных осколка, два сферических осколка.

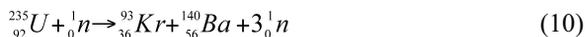


Рисунок 4 – Деление ядер

Способность делиться на две части под действием нейтронов обладают ядра всех тяжелых элементов. Наиболее важными в практическом отношении материалами являются изотопы урана и плутоний  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ . Ядра  ${}_{92}^{233}\text{U}$ ,  ${}_{92}^{235}\text{U}$  и  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$  делятся под действием как быстрых, так и медленных нейтронов, а ядра  ${}_{92}^{238}\text{U}$  – только под действием быстрых нейтронов.

В природе существует в основном два изотопа урана:  ${}_{92}^{238}\text{U}$  (99,3%) и  ${}_{92}^{235}\text{U}$  (0,7%). Таким образом, окружающие нас тепловые (медленные) нейтроны не способны расщепить ядра урана  ${}_{92}^{238}\text{U}$ , который практически один содержится в урановой руде. Поэтому прежде чем использовать урановое сырье, его нужно обогатить, т.е. специальными методами повысить процентное содержание изотопа  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , а затем подвергать нейтронной бомбардировке, что и сделали Ган и Штрассман.

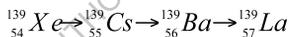
Примером реакции деления может служить распад изотопа урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  на изотопы криптона и бария с испусканием трех нейтронов:



Или реакция типа



При этом осколок деления ксенона  ${}_{54}^{139}\text{Xe}$  в результате трех актов  $\beta$ -распада превращается в стабильный изотоп лантана  ${}_{57}^{139}\text{La}$ .



Такого типа реакции называются цепными, т.к. они идут с увеличением числа нейтронов в процессе деления (рис. 5).

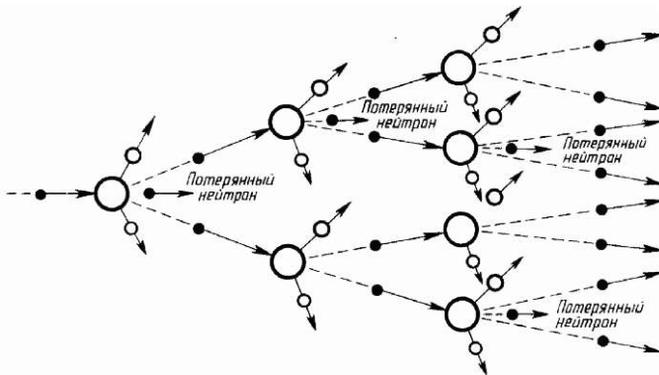


Рисунок 5 – Цепная реакция

Развитие цепной реакции характеризуется *коэффициентом размножения нейтронов*  $K$ .

*Коэффициент размножения нейтронов* измеряется отношением числа нейтронов, вызывающих деление ядра вещества на одном из этапов реакции, к числу нейтронов, вызвавших деление на предыдущем этапе реакции.

Например, для реакции (10)  $K = 3$ , а для реакции (11)  $K = 2$ .

*Масса делящегося вещества, в котором цепная реакция идет с  $K = 1$ , называется критической массой данного вещества.* Это критическое условие, при котором наступает цепная реакция, реакцию называют *самоподдерживающейся*.

Если масса ядерного горючего меньше критической, то  $K < 1$ , и реакция деления не будет развиваться. Такую цепную реакцию называют *затухающей*. Если масса горючего равна критической, то  $K = 1$ , и цепная реакция идет с постоянной интенсивностью (такая реакция применяется в ядерном реакторе). Если же масса горючего больше критической, то  $K > 1$ . В этом случае цепная реакция бурно развивается и может привести к взрыву. Такая реакция имеет место в атомной бомбе. Такую реакцию называю *ускоряющейся*.

Для промышленного получения ядерной энергии необходимо уметь управлять цепной реакцией, что осуществляется применением специальных материалов, поглощающих нейтроны (бор, кадмий).

Впервые управляемая цепная реакция была осуществлена в 1942 г. в США группой ученых под руководством итальянского физика Э. Ферми, а в СССР – в 1946 г. под руководством И. Курчатова.

В связи с уникальностью цепной реакции перед человечеством открылись пути использования ядерной энергии для теплофикации, электрификации и других целей.

## 2.5 Термоядерные реакции (синтез)

Масса покоя ядра урана больше суммы массы покоя осколков, на которые делится ядро. Для легких ядер обстоит все наоборот. При сливании ядер масса

покою уменьшается и, следовательно, должно выделяться большое количество энергии. Подобного рода реакции слияния легких ядер могут протекать только при очень высоких температурах ( $10^7 - 10^9$  К). Поэтому они называются *термоядерными*.

Выделившаяся энергия определяется по формуле

$$W = 931,4(m_1 + m_2 - m_y), \quad (12)$$

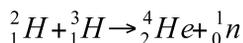
где  $m_1, m_2$  – массы сливающихся ядер в а.е.м.,  $m_y$  – масса образовавшегося ядра.

Для слияния ядер необходимо, чтобы они сблизилась на расстояние  $10^{-14} - 10^{-15}$  м, т.е. чтобы они попали в сферу действия ядерных сил. Следовательно, объединяемые ядра должны обладать достаточно большой кинетической энергией для совершения работы против этих кулоновских сил. Это является необходимым условием осуществления реакции синтеза.

Энергия, которая выделяется при термоядерных реакциях в расчете на один нуклон, превышает удельную энергию, выделяющуюся при цепных реакциях деления ядер. Так, при слиянии тяжелого водорода – дейтерия со сверхтяжелым изотопом водорода – тритием выделяется около 3,5 МэВ на один нуклон. При делении же урана выделяется примерно 1 МэВ энергии на один нуклон.

Термоядерные реакции играют решающую роль в эволюции Вселенной. Энергия излучения Солнца и звезд имеет термоядерное происхождение.

Осуществление управляемых термоядерных реакций на Земле даст человечеству новый, практически неисчерпаемый источник энергии. Наиболее перспективной в этом отношении реакцией является реакция слияния дейтерия  ${}^2_1H$  с тритием  ${}^3_1H$ :



В этой реакции выделяется энергия 17,6 МэВ.

Осуществление управляемой термоядерной реакции встречается с большими трудностями. Чтобы создать термоядерный реактор, необходимо обеспечить

регулируемое нагревание плазмы до десятков миллионов градусов. Кроме того, что особенно сложно, необходимо полностью устранить соприкосновение плазмы со стенками какого бы ни было сосуда.

Осуществление управляемой термоядерной реакции полностью разрешит энергетическую проблему, поскольку сырье (вода) для получения дейтерия имеется на Земле практически в неограниченном количестве.

Пока же удалось осуществить лишь неуправляемую реакцию синтеза взрывного типа в водородной бомбе.

В настоящее время в России и других странах ведутся интенсивные теоретические и экспериментальные исследования по созданию условий для управления термоядерной реакцией.

FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY

### 3. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПРИРОДЕ

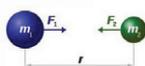
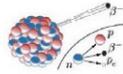
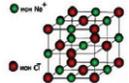
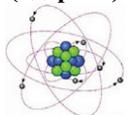
Окружающий нас мир чрезвычайно разнообразен. Но как ни удивительно, вещество звезд точно такое же, как и вещество, из которого состоит Земля. Атомы, слагающие все тела Вселенной, совершенно одинаковы. Живые организмы состоят из таких же атомов, что и неживые.

Все тела в природе *взаимодействуют* между собой. Взаимодействие универсально, как и движение. Взаимодействующие объекты обмениваются энергией и импульсом (это основные характеристики их движения). В классической физике взаимодействие определяется силой, с которой один материальный объект действует на другой. Экспериментально подтверждена концепция близкодействия, которая говорит, что взаимодействие передается при помощи физических полей с конечной скоростью, не превышающей скорости света в вакууме. *Физическое поле* – особый вид материи, обеспечивающей взаимодействие материальных объектов и их систем (следующие поля: электромагнитное, гравитационное, поле ядерных сил – слабое и сильное). Источником физического поля являются элементарные частицы (электромагнитного – заряженные частицы), в квантовой теории взаимодействие обусловлено обменом квантами поля между частицами.

Несмотря на разнообразие взаимодействий тел друг с другом, в природе по современным данным имеются лишь четыре типа сил. Общим для всех взаимодействий является то, что они осуществляются не мгновенно, а с некоторой конечной скоростью, не превышающей скорость света в вакууме. Кроме того, взаимодействие любого вида имеет частицу-переносчика этого взаимодействия. Фундаментальные взаимодействия отличаются в количественном отношении по силе воздействия, которая характеризуется термином *интенсивность*. По мере увеличения интенсивности фундаментальные взаимодействия располагаются в следующем порядке: гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное (Табл. 1). Фундаментальные взаимодействия переносятся квантами. При этом в

квантовой области фундаментальным взаимодействиям отвечают соответствующие элементарные частицы, называемые элементарными частицами – переносчиками взаимодействий.

Таблица 1 – **Фундаментальные взаимодействия в природе**

<i>Взаимодействия</i>	<i>Интенсивность</i>	<i>Радиус действия, м</i>	<i>Носители взаимодействия</i>	<i>Механизм</i>	<i>Проявление</i>
<b>Гравитационное</b> 	$10^{-38}$	$\infty$	Все массивные частицы	Обмен гравитонами	Всемирное тяготение, существование звезд, планетных систем, солнечная система
<b>Слабое</b> 	$10^{-10}$	$10^{-18}$	Кварки, лептоны	Обмен бозонами	Радиоактивность, бета-распад, образование ранней Вселенной
<b>Электромагнитное</b> 	$1/137$	$\infty$	Заряженные частицы, фотоны	Обмен фотонами	Кулоновская сила, обеспечивающая существование атома, световые волны, действие электронных приборов (компьютеры, телевизоры)
<b>Сильное (ядерное)</b> 	1	$10^{-15}$	Тяжелые частицы (кварки, нуклоны)	Обмен глюонами	Ядерные силы, обеспечивающие существование ядер, энергия Солнца

Из этих четырех взаимодействий универсальным является только *гравитационное* – всемирному тяготению подвержены все тела и частицы без исключения. Кроме того, оно является самым слабым взаимодействием. Общепринятой классической (не квантовой) теорией гравитационного взаимодействия является эйнштейновская общая теория относительности.

Гравитация определяет движение планет в звездных системах, играет важную роль в процессах, протекающих в звездах, управляет эволюцией Вселенной, в земных условиях проявляет себя как сила взаимного притяжения.

*Слабое* взаимодействие реализуется между элементарными частицами. Реакции термоядерного синтеза в звездах осуществляются при его непосредственном участии. Слабое взаимодействие наблюдается, например, при  $\beta$  – распаде. В слабом взаимодействии принимают участие все фундаментальные фермионы (лептоны и кварки). Это единственное взаимодействие, в котором участвуют нейтрино, чем объясняется колоссальная проникающая способность этих частиц. Слабое взаимодействие позволяет лептонам, кваркам и их античастицам обмениваться энергией, массой, электрическим зарядом и квантовыми числами — то есть превращаться друг в друга. Рассматриваемое взаимодействие много слабее сильного и электромагнитного, но превосходит гравитационное. О силе взаимодействия судят по скорости процессов, которое оно вызывает. В случае слабых взаимодействий процессы протекают за время  $t \approx 10^{-10}$  с, что говорит о достаточной медленности их протекания. Кроме того, слабое взаимодействие является короткодействующим, характерный радиус взаимодействия  $r \approx 2 \cdot 10^{-18}$  м. Однако, без существования слабого взаимодействия процесс превращения протона в нейтрон, позитрон и нейтрино не происходил бы и тогда Солнце бы – погасло. Процессы с испусканием нейтрино обеспечивают потери энергии очень горячими космическими объектами (звездами).

К *электромагнитным* взаимодействиям сводится большинство сил, наблюдаемых в макро- и микроявлениях. В данном взаимодействии участвуют все заряженные тела, все заряженные элементарные частицы, поэтому в каком то смысле его тоже можно считать универсальным. Электромагнитные процессы, обусловленные слабыми, медленно меняющимися электромагнитными полями, описываются законами классической электродинамики – уравнениями Максвелла [3]. В остальных случаях (сильные поля) определяющую роль играют квантовые явления. Константой

электромагнитного взаимодействия служит элементарный электрический заряд  $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл. В случае электромагнитных взаимодействий процессы протекают за время  $t \approx 10^{-21}$  с.

*Сильное* взаимодействие названо так, потому что три предыдущих взаимодействия много слабее его. В отличие от гравитационного и электромагнитного оно является короткодействующим  $r \approx 10^{-15}$  м. В сильном взаимодействии участвуют кварки и глюоны и составленные из них частицы, называемые адронами (барионы и мезоны). Оно действует в масштабах порядка размера атомного ядра и менее, отвечая за связь между кварками в адронах и за притяжение между нуклонами (разновидность барионов — протоны и нейтроны) в ядрах. В обычном стабильном веществе сильное взаимодействие не вызывает никаких процессов. Оно существенно в мире *элементарных частиц*.

Все атомы имеют одинаковую структуру и построены из частиц трех сортов. У них есть ядра из протонов и нейтронов, окруженные электронами.

При современном состоянии науки неизвестно, являются ли электроны, протоны и нейтроны простейшими, не разлагаемыми частицами, или же они, подобно атомам, построены из других (неизвестных еще) более фундаментальных частиц. Такие частицы, относительно которых нет доказательств, что они являются составными, принято называть *элементарными частицами*. Помимо электронов, протонов и нейтронов известны и другие элементарные частицы: фотоны, нейтрино, мезоны, гипероны, странные частицы и античастицы некоторых из перечисленных частиц.

Все элементарные частицы способны превращаться друг в друга. В 70-е гг. XX века было установлено, что все сильно взаимодействующие частицы состоят из субэлементарных частиц – кварков шести видов.

## 4. ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

### 4.1 Основные характеристики элементарных частиц и их классификация

К основным характеристикам элементарных частиц относятся: масса, заряд, спин, изотопический спин, магнитный момент, время жизни, странность.

По массе частицы делятся на три группы: лептоны (легкие), мезоны (средние) и бозоны (тяжелые).

По величине спина частицы делятся на два типа (в единицах  $\hbar$ ) – с целым спином (0 и 1) и полуцелым (1/2).

Каждой элементарной частице соответствует своя античастица. Любая пара таких частиц характеризуется тремя основными свойствами.

1. Частица и соответствующая ей античастица имеют одинаковые массы, спин и время жизни.

2. Частица и ее античастица имеют равные по величине, но противоположные по знаку электрические заряды, барионные (лептонные) числа и странности.

3. Продукты распада частицы и соответствующей античастицы по отношению друг к другу также являются частицами и античастицами.

Предположение об античастице впервые появилась в 1928 году, когда П. Дирак на основе релятивистского волнового уравнения предсказал существование позитрона, обнаруженного немного позднее К. Андерсоном в составе космического излучения.

*Позитрон* называют античастицей электрона. Частица (электрон) и античастица (позитрон) различаются только знаком электрического заряда. Остальные их свойства — масса покоя, абсолютная величина заряда, спин в точности совпадают. В некоторых случаях (например, фотон или  $\pi^0$ -мезон и др.) частица и античастица полностью совпадают. Это связано с тем, что фотон и  $\pi^0$ -мезон не имеет электрического заряда и других внутренних характеристик со знаком.

*Барионное число* – квантовое число, равное +1 для нуклонов и гиперонов, -1 – для их античастиц, 0 – для мезонов и лептонов.

Подобным образом вводится и *лептонное число*: для лептонов +1, для их античастиц -1.

Среди разнообразных элементарных частиц можно выделить определенные группы, имеющие близкие характеристики (спин, массу), но отличающиеся зарядом. Такие группы называются *зарядовыми мультиплетами*. Например, протон, нейтрон, пионы ( $\pi$ -мезоны). Частицы, входящие в такие группы, рассматриваются как различные состояния одной частицы. Для их характеристики вводится понятие таких квантовых чисел как *изотопический спин* и *странность*. Изотопический спин определяет число членов в зарядовом мультиплете и индивидуально характеризует каждый этот член. Странность определяется как удвоенная величина смещения центра зарядового мультиплета по сравнению к центру нуклонов. Например, нуклон имеет средний заряд  $1/2$  (в единицах  $e$ ). Тогда странность нуклонов и пионов ( $\pi$ -мезонов) равна нулю.

В таблице 2 приведены классификация и некоторые свойства элементарных частиц.

*Фотон* является элементарным носителем электромагнитного взаимодействия между заряженными частицами. Он существует только в движении со скоростью света в вакууме ( $3 \cdot 10^8$  м/с).

*Нейтрино* – нейтральная частица, излучаемая одновременно с электронами или позитронами при  $\beta$  – распаде атомных ядер. Существует четыре разновидности нейтрино: электронное нейтрино и антинейтрино и мюонное нейтрино и антинейтрино.

Таблица 2 – Классификация и свойства элементарных частиц

Класс	Название	Обозначение	Масса покоя в ед. $m_e$	Заряд в ед.е	Спин в ед. $\hbar$	Барионный заряд	Лептонный заряд	Время жизни, с	Странность		
	Фотон	$\gamma$	0	0	1	0	0	$\infty$			
Лептоны	Нейтрино электр.	$\nu_e$	0	0	1/2	0	+1	$\infty$			
	Антинейтрино электр.	$\bar{\nu}_e$	0	0	1/2	0	-1	$\infty$			
	Нейтрино мюонное	$\nu_\mu$	0	0	1/2	0	+1	$\infty$			
	Антинейтрино мюон.	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	1/2	0	-1	$\infty$			
	Электрон	$e^-$	1	-1	1/2	0	+1	$\infty$			
	Позитрон	$e^+$	1	+1	1/2	0	-1	$\infty$			
	Отрицат.мюон	$\mu^-$	207	-1	1/2	0	+1	$2,21 \cdot 10^{-6}$			
Положит.мюон	$\mu^+$	207	+1	1/2	0	-1	$2,21 \cdot 10^{-6}$				
Адроны	Мезоны	Пи-плюс	$\pi^+$	273	+1	0	0	$2,55 \cdot 10^{-8}$	0		
		Пи-минус	$\pi^-$	273	-1	0	0	$2,55 \cdot 10^{-8}$	0		
		Пи-нуль	$\pi^0$	264	0	0	0	$2,3 \cdot 10^{-16}$	0		
		Ка-плюс	$K^+$	967	+1	0	0	$1,22 \cdot 10^{-8}$	+1		
		Ка-минус	$K^-$	967	-1	0	0	$1,22 \cdot 10^{-8}$	-1		
		Ка-нуль	$K^0$	974	0	0	0	$10^{-8} - 10^{-10}$	+1		
		Анти-ка-нуль	$\bar{K}^0$	974	0	0	0	$10^{-8} - 10^{-10}$	-1		
	Барионы	Нуклоны	Протон	p	1836	+1	1/2	+1	$\infty$	0	
			Антипротон	$\bar{p}$	1836	-1	1/2	-1	$\infty$	0	
			Нейтрон	n	1836	0	1/2	+1	$10^3$	0	
			Антинейтрон	$\bar{n}$	1836	0	1/2	-1	$10^3$	0	
		Гипероны	Лямбда-нуль	$\Lambda^0$	2183	0	1/2	+1	0	$2,51 \cdot 10^{-10}$	-1
			Анти-лямбда-нуль	$\bar{\Lambda}^0$	2183	0	1/2	-1	0	$2,51 \cdot 10^{-10}$	+1
			Сигма-плюс	$\Sigma^+$	2328	+1	1/2	+1	0	$0,81 \cdot 10^{-10}$	-1
Анти-сигма-плюс			$\bar{\Sigma}^+$	2328	-1	1/2	-1	0	$0,81 \cdot 10^{-10}$	+1	
Сигма-минус			$\Sigma^-$	2341	-1	1/2	+1	0	$1,6 \cdot 10^{-10}$	-1	
Анти-сигма-минус			$\bar{\Sigma}^-$	2341	+1	1/2	-1	0	$1,6 \cdot 10^{-10}$	+1	
Сигма-нуль			$\Sigma^0$	2332	0	1/2	+1	0	$10^{-11}$	-1	
Анти-сигма-нуль			$\bar{\Sigma}^0$	2332	0	1/2	-1	0	$10^{-11}$	+1	
Кси-минус			$\Xi^-$	2580	-1	1/2	+1	0	$1,3 \cdot 10^{-10}$	-2	
Анти-кси-минус			$\bar{\Xi}^-$	2580	+1	1/2	-1	0	$1,3 \cdot 10^{-10}$	+2	
Кси-нуль	$\Xi^0$	2566	0	1/2	+1	0	$1,5 \cdot 10^{-10}$	-2			
Анти-кси-нуль и т.д.	$\bar{\Xi}^0$	2566	0	1/2	-1	0	$1,5 \cdot 10^{-10}$	+2			

*Электрон* является элементарным устойчивым носителем отрицательного заряда ( $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл). Масса покоя  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг – основная мера массы элементарных частиц.

*Позитрон* – античастица электрона.

*Мюон* ( $\mu$  – мезон) – продукт распада  $\pi$  – мезонов, входящий в группу лептонов.

*Пион* ( $\pi$  – мезон) наблюдается в космических лучах и в реакциях в ускорителях. Является носителем поля ядерных сил и участвует в ядерном взаимодействии частиц.

*Каон* ( $K$  – мезон) – частица, вызывающая ядерные превращения, при котором возникают вторичные частицы в виде  $\pi$ - и  $\mu$ - мезонов, а также электронов и позитронов.

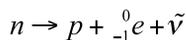
*Протон* – ядро изотопа водорода, является элементарным носителем единичного положительного заряда.

*Нейтрон* – частица, имеющая нулевой заряд, но имеет магнитный момент.

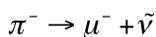
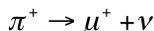
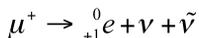
*Гиперон* – сверхтяжелая частица с массой, превышающей массу нуклона. Число таких частиц непрерывно увеличивается.

### 3.2 Превращения частиц

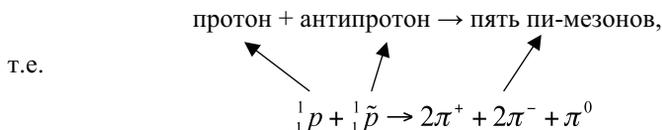
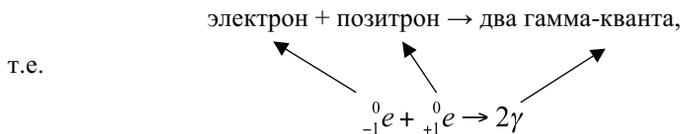
Вследствие различного типа взаимодействий одни элементарные частицы превращаются в другие. Например, при слабом взаимодействии нейтрон превращается в протон, электрон и антинейтрино:



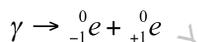
мезоны распадаются по схемам:



При столкновениях частиц и античастиц происходят превращения по следующим схемам:



При торможении  $\gamma$  – квантов большой энергии образуются пары электрон – позитрон:



Процесс взаимодействия частиц и античастиц и превращения их в другие частицы называется *аннигиляцией*. Наиболее изученной является аннигиляция электрон–позитронной пары. При низких энергиях сталкивающихся электрона и позитрона, а также при аннигиляции их связанного состояния — позитрония — эта реакция аннигиляции даёт в конечном состоянии два или три фотона, в зависимости от ориентации спинов электрона и позитрона. При энергиях порядка нескольких МэВ становится возможной и многофотонная аннигиляция электрон-позитронной пары. При энергиях порядка сотен МэВ в процессе аннигиляции электрон-позитронной пары рождаются в основном адроны.

### 3.3 Законы сохранения в физике элементарных частиц

Элементарные частицы, как и все тела в природе, подчиняются фундаментальным законам сохранения, связанными с общими свойствами пространства и времени, а именно: законам сохранения энергии, электрического заряда, импульса, момента импульса и др. Но дополнительно к ним в физике элементарных частиц применяются и ряд других законов сохранения.

*Закон сохранения барионного заряда:* при всех ядерных превращениях в изолированной системе барионный заряд сохраняется неизменным.

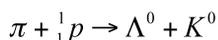
Из таблицы 2 видно, что для барионов этот заряд равен +1, для антибарионов равен -1, а для частиц, не принадлежащих к классу барионов, он равен нулю. Например, если до превращения имелся один барион – нейтрон с барионным зарядом +1, то после превращения должен существовать один барион - нейтрон, протон или один из гиперонов, для которого барионный заряд также равен +1.

*Закон сохранения лептонного заряда:* при всех ядерных превращениях в изолированной системе лептонный заряд сохраняется неизменным.

Для этого закона применимы аналогичные рассуждения, что и для барионных зарядов. При этом при решении практических задач отдельно рассматривается закон сохранения как для лептонного электронного, так и для лептонного мюонного чисел.

*Закон сохранения странности:* суммарная странность изолированной системы при сильных и электромагнитных взаимодействиях не изменяется.

Существует ряд частиц с зарядовой независимостью взаимодействий ( $K$  – мезоны и гипероны), которые из-за этого свойства были названы странными. Для их описания и применяется понятие странности и закона сохранения странности. Этот закон запрещает одиночное рождение странных частиц. При реакции с «обычными» частицами, не обладающими странностью, не может рождаться одна странная частица, а должны возникать две странные частицы с противоположными знаками странности. Например, в реакции



странность ( $S$ ) в левой части равна нулю и в правой части равна нулю, т.к.

$$S_{\Lambda^0} = -1 \text{ и } S_{K^0} = +1$$

*Закон сохранения изотопического спина:* полный изотопический спин всех частиц изолированной системы не изменяется при всех превращениях, вызванных сильными взаимодействиями.

Ядерные силы (сильное взаимодействие) обладают свойством зарядовой независимости – взаимодействие  $p - p$ ,  $n - n$ ,  $p - n$  одинаково, и, если отвлечься от электрических полей, то протон и нейтрон становятся как бы неразличимы – они ведут себя одинаковым образом. Поэтому нуклон можно считать частицей, которая может находиться в двух зарядовых состояниях:  $+1$  (протон) и  $0$  (нейтрон), он образует зарядовый дублет со средним зарядом  $1/2$ . Математическую величину, учитывающую зарядовое состояние, и называют *изотопическим спином* (по аналогии со спином для электрона в атомной физике). Изотопический спин нуклона равен  $1/2$ . Его «проекция» на заданную ось, равная  $+1/2$ , соответствует протону и  $-1/2$  – нейтрону. Факт зарядовой независимости и формулируется в виде закона сохранения изотопического спина.

В настоящее время сильно взаимодействующие частицы называют *адронами* (от англ. «*hadron*» - крупный, массивный).

*Закон сохранения четности*: процессы в природе не зависят от выбора правовинтовой или левовинтовой систем координат, в которых эти процессы рассматриваются.

Этот закон связан со свойством зеркальной симметрии пространства.

### 3.4 Понятие о кварках

*Кварки* – гипотетические фундаментальные частицы, из которых, по современным понятиям, состоят *адроны*.

Гипотеза о кварках была высказана в 1964 г. американскими учеными М. Гелл-Маном и Г. Цвейгом. До сих пор в свободном состоянии кварки не обнаружены, что позволяет считать, что физика встретилась с принципиально новым явлением природы.

К настоящему времени открыто шесть разных сортов кварков, которые называются «ароматами» (Табл.3).

Таблица 3 – Кварки и их свойства

Кварк	Название («аромат»)		Заряд в единицах $e$	Масса
	рус.	англ.		
$u$	верхний	up	+2/3	от 1,5 до 5 МэВ/ $c^2$
$d$	нижний	down	-1/3	от 3 до 9 МэВ/ $c^2$
$s$	странный	strange	-1/3	от 60 до 170 МэВ/ $c^2$
$c$	очарованный	charm	+2/3	от 1,1 до 1,4 ГэВ/ $c^2$
$b$	самый нижний	bottom	-1/3	от 4,1 до 4,4 ГэВ/ $c^2$
$t$	самый верхний	top	+2/3	от 168 до 178 ГэВ/ $c^2$

Согласно кварковой гипотезе, барионы состоят из трех кварков, антибарионы – из трех антикварков, мезоны – из кварка и антикварка. Например, протон состоит из кварков ( $2u+d$ ) и нейтроны ( $2d+u$ ).

В таблицу 4 приведены данные о кварковом составе адронов.

Таблица 4 – Строение некоторых адронов

Частица			Кварковый состав
	Название	Обозначение	
Барионы	Протон	$p$	$u + u + d$
	Нейтрон	$n$	$u + d + d$
	Лямбда-нуль	$\Lambda^0$	$u + d + s$
	Сигма-плюс	$\Sigma^+$	$u + u + s$
	Сигма-минус	$\Sigma^-$	$d + d + s$
	Сигма-нуль	$\Sigma^0$	$u + d + s$
	Кси-минус	$\Xi^-$	$d + s + s$
	Кси-нуль	$\Xi^0$	$u + s + s$
Мезоны	Пи-плюс	$\pi^+$	$u + \bar{d}$
	Пи-минус	$\pi^-$	$d + \bar{u}$
	Ка-плюс	$K^+$	$u + \bar{s}$
	Ка-минус	$K^-$	$s + \bar{u}$
	Ка-нуль	$K^0$	$d + \bar{s}$

Некоторые частицы оказываются состоящими из трех одинаковых кварков в одном и том же состоянии, что запрещено принципом Паули. Например,

частицы  $L^0$  и  $\Sigma^0$  (Табл. 4). Поэтому согласно теории *квантовой хромодинамики* каждому типу кваркового «аромата» добавляется новая внутренняя характеристика – квантовое число «цвет», которое может принимать три значения: красный, синий и зеленый. Существуют и противоположные цвета: антикрасный, антисиний и антизеленый. Кварк любого аромата может иметь один из трех цветов, а антикварк – любой из трех антицветов. Конечно, этот термин не имеет ничего общего с обычным смыслом этого слова, но он тем не менее позволяет провести интересную аналогию. Так же как три цвета, например, в цветном телевизоре, смешиваясь, могут дать белый свет, так и кварковые цвета должны быть перемешены таким образом, чтобы составленная из них частица не имела определенного цвета – была бесцветной. Грубо говоря, это похоже на быстро вращающийся трехцветный диск, который кажется просто серым. Таким образом, хотя цветные кварки и могут существовать, цветную частицу увидеть не удастся. Каждый барион состоит из трех кварков различного цвета, а мезон – из кварка и антикварка одного цвета. Но они постоянно меняют свой цвет, так что ни один мезон не является цветной частицей.

Цена гипотезы цвета заключается в утроении числа кварков без появления дополнительных частиц. Вид частицы определяется только ароматом составляющих ее кварков, а распределение цветов между ними может быть произвольным, т.к. в конечном счете частица всегда бесцветна.

В квантовой хромодинамике носителями сильного взаимодействия между кварками являются *глюоны* – гипотетические электрически нейтральные частицы со спином 1 и нулевой массой покоя. Обмен глюонами между кварками меняет «цвет» кварков, но оставляет неизменными все остальные квантовые числа, т.е. сохраняет тип кварков (их «аромат»).

Предполагается существование восьми глюонов. Вследствие удержания «цвета» глюоны не существуют в свободном состоянии. Экспериментально они проявляются в глубоко неупругих процессах. На долю глюонов должно приходиться, например, около 50% всей энергии покоя протона.

Ближайшая задача, в решении которой представление о кварках, возможно, сыграет ключевую роль, - это описание динамики процессов, происходящих в микромире. А это, в свою очередь, должно привести к созданию единой теории, объясняющей поведение всех элементарных частиц.

### 3.5 Космические лучи

*Космические лучи* представляют собой частицы, которые заполняют межзвездное пространство и постоянно бомбардируют Землю. Они были открыты в 1912 г. австрийским физиком В. Гессом с помощью ионизационной камеры на воздушном шаре. Энергия космических лучей ( $\sim 10^{20}$  эВ) на несколько порядков превосходит энергии, доступные современным ускорителям на встречных пучках.

Различают следующие типы космических лучей:

*Галактические космические лучи* – космические частицы, приходящие на Землю из нашей галактики. В их состав не входят частицы, генерируемые Солнцем. Космические лучи, не искаженные взаимодействием с атмосферой Земли, называют первичными. Первичное излучение состоит из потока элементарных частиц высокой энергии, причем более 90% из них составляют протоны с энергией примерно  $10^9$ — $10^{13}$  эВ, около 7% –  $\alpha$ -частицы и лишь небольшая доля (около 1%) приходится на ядра более тяжелых элементов ( $Z > 20$ ). Поток галактических космических лучей, бомбардирующих Землю, изотропен, постоянен во времени и составляет  $\approx 1$  частица/см<sup>2</sup> с (до входа в земную атмосферу). Плотность энергии галактических космических лучей  $\approx 1$  эВ/см<sup>3</sup>.

*Солнечные космические лучи* – космические частицы, генерируемые Солнцем. Данные частицы ускоряются до высоких энергий в верхней части атмосферы Солнца во время солнечных вспышек. Солнечные вспышки подвержены определенным временным циклам. Самые мощные из них повторяются в среднем через 11 лет, менее мощные – через 27 дней. Во время мощных солнечных вспышек поток солнечных космических лучей может

увеличиться в  $10^6$  раз по сравнению с потоком галактических космических лучей.

*Метагалактические космические лучи* – космические частицы, возникшие вне нашей галактики.

В результате взаимодействия высокоэнергичных частиц первичного космического излучения с ядрами атмосферы образуется большое число вторичных частиц: адронов (пионов, протонов, нейтронов, антинуклонов и т.д.), лептонов (мюонов, электронов, позитронов, нейтрино) и фотонов. Лептоны и фотоны образуются в результате слабых электромагнитных распадов вторичных адронов (главным образом пионов) и рождения  $\gamma$ -квантами  $e^-e^+$  – пар в кулоновском поле ядер:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \tilde{\nu}_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow \tilde{a}^+ + \nu_{\tilde{a}} + \tilde{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow \tilde{a}^- + \tilde{\nu}_{\tilde{a}} + \nu_\mu$$

$$y\ddot{a}\delta\dot{I} + \gamma \rightarrow y\ddot{a}\delta\dot{I} + \tilde{a} + \tilde{a}$$

Таким образом, вместо одной первичной частицы возникает большое число вторичных, которые делятся на адронную, мюонную и электронно-фотонную компоненты. В результате лавинообразного нарастания числа частиц в максимуме каскада их число может достигать  $10^6 - 10^9$  при энергии первичного протона, превышающей  $10^{14}$  эВ.

FOR AUTHOR USE ONLY

## 5. ЗАДАЧИ И ИХ РЕШЕНИЯ

**Задача 1.** Оценить плотность ядерной материи.

**Решение:** Масса одного нуклона в ядре  $m_N \approx 1$  а.е.м. =  $1,66 \cdot 10^{-24}$  г.

Плотность ядерной материи есть масса ядра, деленная на его объем

$$\rho = \frac{m_N A}{4/3\pi R^3} = \frac{3m_N A}{4\pi r_0^3 A} = \frac{3m_N}{4\pi r_0^3} = \frac{3 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ а}}{4 \cdot 3,14 \cdot (1,3 \cdot 10^{-13} \text{ нм})^3} = 1,8 \cdot 10^{14} \text{ а/нм}^3 = 180 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

Плотность ядерной материи не зависит от  $A$ .

**Ответ:**  $\rho = 180 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$

**Задача 2.** Какую наименьшую энергию  $E$  нужно затратить, чтобы оторвать один нейтрон от ядра азота  ${}^{14}_7N$ ?

**Решение:** После отрыва нейтрона общее число нуклонов в ядре уменьшится на единицу, а число протонов останется неизменным, следовательно, получится ядро  ${}^{13}_7N$ . Очевидно, энергия отрыва нейтрона от ядра  ${}^{14}_7N$  равна энергии связи нейтрона в ядре  ${}^{13}_7N$ . Поэтому

$$E = E_{\text{св}} = c^2 \Delta m = c^2 (m_{{}^{13}_7N} + m_n - m_{{}^{14}_7N}), \text{ где } \Delta m - \text{дефект массы.}$$

$$m_{{}^{13}_7N} = 13,00574 \text{ а.е.м.}$$

$$m_n = 1,00867 \text{ а.е.м.}$$

$$m_{{}^{14}_7N} = 14,00307 \text{ а.е.м.}$$

Так как массы выражены в а.е.м., то  $\tilde{m}^2 = 931,4 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м}}$ .

$$E = 931,4 \cdot (13,00574 + 1,00867 - 14,00307) = 10,6 \text{ МэВ}$$

**Ответ:**  $E \approx 10,6$

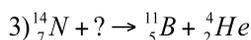
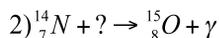
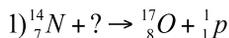
**Задача 3.** Определить число протонов и нейтронов в ядрах атомов фтора  ${}^{19}_9F$  и золота  ${}^{197}_{79}Au$ .

**Решение:** Число электронов в атоме равно числу протонов, тогда атом фтора имеет 9 протонов ( $N_p = Z = 9$ ). Число нейтронов определим по формуле

$N_n = A - Z = 19 - 9 = 10$ ; Атом золота имеет 79 протонов ( $N_p = Z = 79$ ),  $N_n = A - Z = 197 - 79 = 118$  – нейтронов.

**Ответ:** 9 протонов и 10 нейтронов у фтора,  
79 протонов и 118 нейтронов у золота.

**Задача 4.** Какие частицы применялись в следующих реакциях?

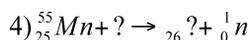
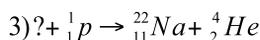
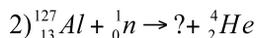
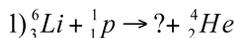


**Решение:** Применяя законы сохранения числа нуклонов и электрического заряда, находим:

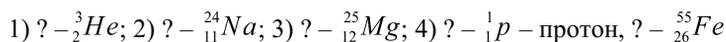


**Ответ:** 1)  $\alpha$ -частица; 2) протон; 3) нейтрон.

**Задача 5.** Допишите ядерные реакции:



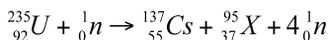
**Решение:** Применяя законы сохранения числа нуклонов и электрического заряда и используя периодическую таблицу химических элементов Менделеева, находим:



**Ответ:** 1) изотоп ядра гелия; 2) изотоп ядра натрия;  
3) изотоп ядра магния; 4) изотоп ядра железа.

**Задача 6.** Ядро урана  ${}_{92}^{235}U$ , поглотив один нейтрон, разделилось на два осколка и четыре нейтрона. Одним из осколков оказался ядром изотопа цезия  ${}_{55}^{137}Cs$ . Ядром, какого изотопа является второй осколок?

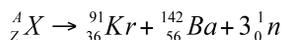
**Решение:** Запишем реакцию, применяя законы сохранения числа нуклонов и электрического заряда



По таблице Менделеева определяем, что  $X = \text{Rb}$  – рубидий.

**Ответ:** второй осколок – изотоп ядра рубидия.

**Задача 7.** Неизвестный радиоактивный химический элемент самопроизвольно распадается по схеме



Сколько протонов и нейтронов содержит ядро этого элемента?

**Решение:** Массовое число  $A = 91 + 142 + 3 = 236$ . Заряд ядра  $Z = 36 + 56 = 92$ . Значит,  $N_p = Z = 92$ ,  $N_n = A - Z = 236 - 92 = 144$ .

**Ответ:** 92 протона и 144 нейтрона.

**Задача 8.** При бомбардировке лития  ${}_3^6\text{Li}$  нейтронами образуется ядро гелия  ${}_2^4\text{He}$  и изотоп некоторого элемента. Определите число нейтронов в ядре этого изотопа.

**Решение:** запишем реакцию  ${}_3^6\text{Li} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_Z^AX$ . Применяя законы сохранения числа нуклонов и электрического заряда, находим  $Z = 1$ ,  $A = 3$ . Тогда число нейтронов равно  $N_n = A - Z = 2$ . Данный изотоп является тритием.

**Ответ:**  $N_n = 2$ .

**Задача 9.** Когда ядро атома алюминия захватывает альфа-частицу, то образуется нейтрон и радиоактивный изотоп некоторого элемента. При его распаде испускается позитрон. Каков порядковый номер элемента, образующегося при этом распаде? Порядковый номер алюминия 13.

**Решение:** запишем реакцию  ${}_{13}\text{Al} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_0^1\text{n} + {}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AY + {}_{+1}^0e$ . Применяя законы сохранения числа нуклонов и электрического заряда, находим  $Z = 15$ , а  $Z - 1 = 14$ .

**Ответ:** образуется элемент с порядковым номером 14, т.е. кремний.

**Задача 10.** Период полураспада радия  $T = 1600$  лет. Через какое время число атомов уменьшится в 4 раза?

**Решение:** 4 – это два периода полураспада. Следовательно, необходимо  $T$  умножить на два, т.е.  $T = 1600 \cdot 2 = 3200$  лет.

**Ответ:** через 3200 лет.

**Задача 11.** Активность радиоактивного элемента уменьшилась в 4 раза за 8 дней. Найти период полураспада.

**Решение:** 8 дней – это два периода полураспада. Следовательно, необходимо количество дней разделить на два.

**Ответ:** период полураспада 4 дня.

**Задача 12.** Какая доля радиоактивных атомов распадется через интервал времени, равный двум периодам полураспада?

**Решение:** Если при одном периоде полураспада распадается 50% радиоактивных атомов, то во время второго периода полураспада дополнительно распадется еще половина из оставшихся атомов, т.е. 25%.

**Ответ:** 75%.

**Задача 13.** Во сколько раз уменьшится число атомов одного из изотопов радона за 1,91 сут? Период полураспада этого изотопа  $T = 3,82$  сут.

**Решение:** по закону радиоактивного распада  $N = N_0 2^{-t/T}$ .

$$N / N_0 = 2^{-t/T} = 2^{-1,91/3,82} = 1/\sqrt{2} = 1/1,41.$$

$$N = N_0 / 1,41$$

**Ответ:** количество атомов уменьшится в 1,41 раза.

**Задача 14.** За время 150 с распалось  $7/8$  первоначального числа радиоактивных ядер. Чему равен период полураспада этого элемента?

**Решение:** по закону радиоактивного распада  $N = N_0 2^{-t/T}$ ,

$$N / N_0 = 2^{-t/T}$$

$$(1 - 7/8)N_0 = N_0 2^{-150/T} \Rightarrow 1/8 = 2^{-150/T} \Rightarrow 2^{-3} = 2^{-150/T}$$

$$-3 = -150/T \Rightarrow T = 50 \text{ с}$$

**Ответ:** 50 с.

**Задача 15.** Изотоп азота  ${}^{13}_7\text{N}$  является радиоактивным, дающим позитронный распад. Напишите реакцию.

**Решение:**  ${}^0_{+1}e$  – позитрон.  ${}^{13}_7\text{N} \rightarrow {}^{13}_6\text{X} + {}^0_{+1}e$ . Шестой элемент в таблице Менделеева – углерод С.

$$\text{Ответ: } {}^{13}_7\text{N} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + {}^0_{+1}e$$

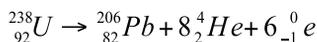
**Задача 16.** Произошло столкновение  $\alpha$  – частицы с ядром бериллия  ${}^9_4\text{Be}$ . В результате образования нейтрон и изотоп неизвестного ядра. Какой изотоп образовался?

**Решение:**  ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{X} + {}^1_0n$ . Шестой элемент в таблице Менделеева – углерод С.

Ответ: изотоп углерода  ${}^{12}_6\text{C}$

**Задача 17.** В результате последовательной серии радиоактивных распадов уран  ${}^{238}_{92}\text{U}$  превращается в свинец  ${}^{206}_{82}\text{Pb}$ . Сколько  $\alpha$ - и  $\beta$ -превращений он при этом испытал?

**Решение:**  $\alpha$ -излучение – поток ядер гелия  ${}^4_2\text{He}$ .  $\beta$ -излучение – поток электронов  ${}^0_{+1}e$ . Массовое число атома меняется с 238 до 206, т.е. на 32 единицы. Значит, атом покинули  $32/4=8$   $\alpha$ -частиц. Эти частицы унесли заряд  $8 \cdot 2=16$  единиц. Тогда на основании законов сохранения числа нуклонов и электрического заряда реакция примет вид



**Ответ:** восемь  $\alpha$ -распадов и шесть  $\beta$ -распадов.

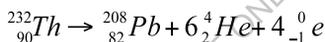
**Задача 18.** Во что превратится  ${}^{238}_{92}\text{U}$  после  $\alpha$ -распада и двух  $\beta$ -распадов?

**Решение:**  $\alpha$ -распад – поток ядер гелия  ${}^4_2\text{He}$ .  $\beta$ -излучение – поток электронов  ${}^0_{-1}e$ . Запишем реакцию:  ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^A_Z\text{X} + {}^4_2\text{He} + 2\cdot{}^0_{-1}e$ . Тогда на основании законов сохранения числа нуклонов и электрического заряда  $Z=92$ ,  $A=234$ .

**Ответ:** в изотоп ядра  ${}^{234}_{92}\text{U}$

**Задача 19.** Сколько  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов должно произойти, чтобы торий  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  превратился в стабильный изотоп свинца  ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ ?

**Решение:** массовое число атома меняется с 232 до 208, т.е. на 24 единицы. Значит, атом покинули  $24/4=6$   $\alpha$ -частиц. Эти частицы унесли заряд  $6\cdot 2=12$  единиц. Тогда на основании законов сохранения числа нуклонов и электрического заряда реакция примет вид



**Ответ:** шесть  $\alpha$ -распадов и четыре  $\beta$ -распада.

**Задача 20.** Установить соответствие процессов взаимного превращения частиц:

- |                       |   |
|-----------------------|---|
| 1. $\beta^-$ - распад | А. ${}_{-1}e^0 + {}_{+1}e^0 \rightarrow 2\gamma$      |
| 2. $K$ - захват       | Б. ${}_1p^1 \rightarrow {}_0n^1 + {}_{+1}e^0 + \nu_e$ |
| 3. $\beta^+$ - распад | В. ${}_1p^1 + {}_{-1}e^0 \rightarrow {}_0n^1 + \nu_e$ |
| 4. аннигиляция        | Г. ${}_0n^1 \rightarrow {}_1p^1 + {}_{-1}e^0 + \nu_e$ |

**Ответ:** 1Г, 2В, 3Б, 4А.

**Задача 21.** Как изменится массовое число и заряд ядра элемента при  $K$  - захвате?

**Решение:**  $K$ -захват – поглощение ядром атома электрона из ближайшего к ядру электронного слоя  $K$ . Электрон -  ${}^0_{-1}e$ .

**Ответ:** порядковый номер элемента (заряд) уменьшится на единицу, массовое число не изменится.

**Задача 22.** В результате одинакового числа ядерных расщеплений получены два радиоактивных препарата с периодами полураспада, равными 1 мин и 1 ч. Какой из препаратов дает более интенсивное излучение?

**Ответ:** первый.

**Задача 23.** Установить соответствие групп элементарных частиц характерным типам фундаментальных взаимодействий.

- |            |                     |
|------------|---------------------|
| 1. фотоны  | А. сильное          |
| 2. лептоны | Б. электромагнитное |
| 3. адроны  | В. слабое           |

**Ответ:** 1Б, 2В, 3А.

**Задача 24.** Реакция  $\mu^- \rightarrow {}_0^0\bar{\nu}_\mu + \nu_e + \nu_\mu$  не может идти из-за нарушения закона сохранения. Какой из законов сохранения не соблюдается в данной реакции? Рассмотреть законы сохранения электрического, лептонного, барионного зарядов и спинового момента импульса.

**Решение:** используя данные таблицы 2, запишем: для электрического заряда  $-1 = -1$  (соблюдается); для лептонного заряда  $+1 \neq +1 + 1 + 1$  (не соблюдается); для барионного заряда  $0 = 0 + 0 + 0$  (соблюдается); для спинового момента импульса  $1/2 = 1/2 \pm 1/2 \pm 1/2$  (соблюдается) – у нейтрино проекции спина на заданные оси имеют значения  $\pm$ .

**Ответ:** Для данной реакции не соблюдается закон сохранения лептонного заряда.

**Задача 25.** Какие из приведенных ниже реакций под действием антинейтрино возможны, какие запрещены и почему?

- 1)  $\bar{\nu}_\mu + {}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + \mu^+$
- 2)  $\bar{\nu}_e + {}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + \mu^-$
- 3)  $\bar{\nu}_\mu + {}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + \mu^-$

**Решение:** проанализируем законы сохранения электрического ( $Q$ ), барионного ( $B$ ) и лептонного заряда ( $L$ ).

1-ая реакция –  $Q: 0 + 1 = 0 + 1; B: 0 + 1 = 1 + 0; L: -1 + 0 = 0 - 1$  – реакция возможна (соблюдаются все законы сохранения).

2-ая реакция –  $Q: 0 + 0 = 1 - 1; B: 0 + 1 = 1 + 0; L: -1 + 0 \neq 0 + 1$ ; – реакция невозможна (не соблюдается закон сохранения лептонного заряда).

3-ая реакция –  $Q: 0 + 0 = 1 - 1; B: 0 + 1 = 1 + 0; L: -1 + 0 \neq 0 + 1$  – реакция невозможна (не соблюдается закон сохранения лептонного заряда).

**Ответ:** возможна только 1-ая реакция.

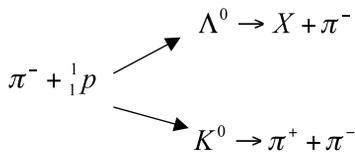
**Задача 26.** Возможна ли реакция  ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{+1}^0e + \nu_e$ ?

**Решение:** проанализируем законы сохранения электрического ( $Q$ ), барионного ( $B$ ) и лептонного заряда ( $L$ ).

$Q: 0 \neq +1 + 1 + 0; B: +1 = +1 + 0 + 0; L: 0 = 0 - 1 + 1$ . Не выполняется закон сохранения электрического заряда.

**Ответ:** реакция не возможна из-за несоблюдения закона сохранения электрического заряда.

**Задача 27.** Взаимодействие пи-минус-мезона с протоном в водородной пузырьковой камере с образованием неизвестной частицы  $X$  идет по схеме



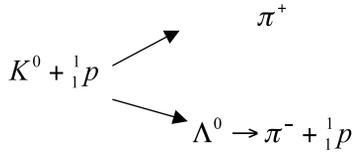
Если спин пи-минус-мезона равен нулю, то чему будут равны знак заряда  $q$  и значение спина  $S$  частицы  $X$ ?

**Решение:** по закону сохранения электрического заряда частица  $X$  должна быть положительно заряжена, т.к. нейтральный заряд у лямбда-нуль-гиперона и отрицательный заряд у пи-минус-мезона в левой части верхней реакции требует положительного заряда у неизвестной частицы. По закону сохранения

спиновое квантовое число должно выполняться соотношение  $1/2 = X+0$ , где спин у неизвестной частицы равен  $1/2$ .

**Ответ:**  $q > 0, S = 1/2$ .

**Задача 28.** Взаимодействие пи-минус-мезона с протоном в водородной пузырьковой камере с образованием неизвестной частицы X идет по схеме

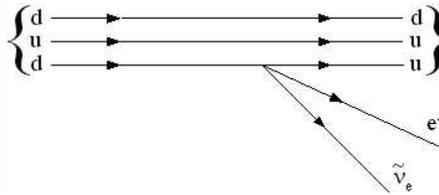


Если спин пи-минус-мезона равен нулю, то чему будут равны знак заряда  $q$  и значение спина  $S$  ка-нуль-мезона?

**Решение:** по закону сохранения электрического заряда ка-нуль-мезон должен быть нейтральным. По закону сохранения спинового квантового числа должно выполняться соотношение  $K^0 + 1/2 = 1/2$ , где спин у  $K^0$  равен нулю.

**Ответ:**  $q = 0, S = 0$ .

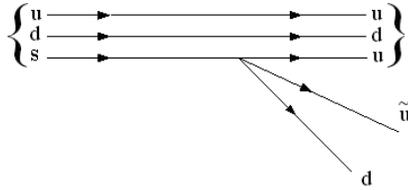
**Задача 29.** На рисунке показана кварковая диаграмма  $\beta^-$ -распада нуклона. Напишите реакцию, соответствующую этой диаграмме.



**Решение:**  $(2d+u)$  – формула нейтрона,  $(2u+d)$  – формула протона.  $e^-$  – электрон,  $\tilde{\nu}_e$  – антинейтрино электронное.

**Ответ:**  ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + \tilde{\nu}_e$

**Задача 30.** На рисунке показана кварковая диаграмма распада  $\Lambda$ -гиперона. Выберите из приведенных ниже реакций соответствующую этой диаграмме.

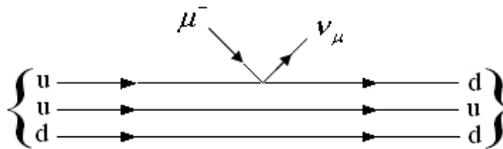


- 1)  $\Lambda^0 \rightarrow n + \pi^-$       2)  $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$   
 3)  $\Lambda^0 \rightarrow n + \pi^+$       4)  $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^0$

**Решение:**  $(u+d+s)$  – формула гиперона,  $(2u+d)$  – формула протона,  $u$  – верхний ( $up$ ) кварк,  $s$ -странный (strange) кварк,  $d$ -нижний (down) кварк,  $\tilde{u}$  – верхний ( $ur$ ) антикварк. Продуктом распада является протон  $(2u+d)$ . Следовательно, верной может быть либо вторая, либо четвертая реакция. Применяя к ним закон сохранения электрического заряда ( $Q$ ), находим для второй реакции –  $Q: 0 = +1 - 1$ ; для четвертой реакции –  $Q: 0 \neq +1 + 0$ . Значит, верной является вторая реакция.

**Ответ:** диаграмме соответствует реакция  $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$

**Задача 31.** На рисунке показана кварковая диаграмма захвата нуклоном  $\mu^-$  – мезона. Напишите реакцию, соответствующую этой диаграмме.

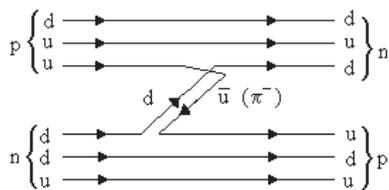
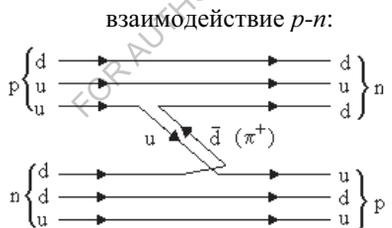
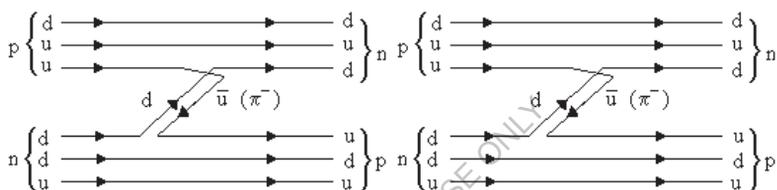
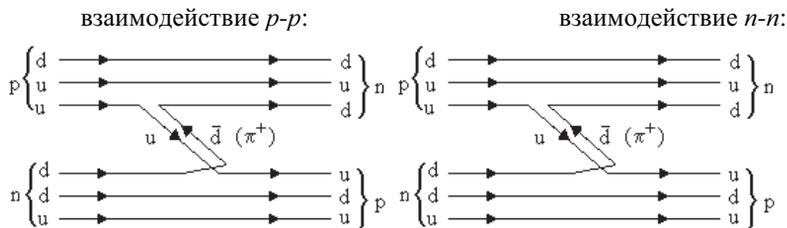


**Решение:**  $(2u+d)$  – формула протона,  $(2d+u)$  – формула нейтрона (таблица 4),  $\mu^-$  – отрицательный мюон,  $\nu_\mu$  – нейтрино мюонное.

**Ответ:**  $\mu^- + {}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + \nu_\mu$

**Задача 32.** Построить кварковые диаграммы взаимодействий  $p - p$ ,  $n - n$ ,  $p - n$ .

**Решение:**



## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Природа устроена так, что понимание глобального возможно лишь через осознание сущности бесконечно малого – микромира. Открытие сложного строения атома, его последовательное изучение приводило к открытию новых законов, которые меняли мировоззрение. Современная наука и техника развиваются необыкновенно быстрыми темпами, что приводит к резкому повышению требований, предъявляемых к современному изучению законов физики в вузе. Необходимо повышать научно-технический уровень курса, внедрять инновационные технологии, направленные на активизацию познавательной деятельности студентов, развитие их творческих способностей, научного мышления. Тем более это необходимо сейчас, когда практические достижения ядерной физики определяют уровень цивилизации: ядерная энергетика, лазерная и полупроводниковая техника, квантовые компьютеры и т.д.

В данном пособии представлен курс физики, посвященный атомному ядру и элементарным частицам. В нём коротко и доступно освещены основные понятия микромира. Рассмотрены основные законы атомной и ядерной физики, физики элементарных частиц.

Изучение фундаментальных законов физики имеет большое значение для будущего инженера.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клибанова Ю.Ю., Вржаш Е. Э., Физика: волновая и квантовая оптика, физика атомного ядра и элементарных частиц. Изд-во: Иркутск: ИрГАУ им. А. А. Ежовского, 2019. – 127 с
2. Вржаш Е. Э., Клибанова Ю. Ю. Курс физики: оптика, атом, атомное ядро элементарные частицы. Изд-во: LAP LAMBERT (Дюссельдорф, Германия), 2019. – 182 с.
3. Вржаш Е. Э., Клибанова Ю. Ю. Физика: электричество и магнетизм. Изд-во: LAP LAMBERT (Дюссельдорф, Германия), 2017. – 140 с.
4. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.3. - СПб.; М.; Краснодар, 2007. – 320с.
5. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. Т.3. - М.: Высш.шк., 1989, 2002.
6. Трофимова Т.И. Курс физики. - М.: Академия, 2007. – 560с.
7. Ивлиев А.Д. Физика. - СПб.: Лань, 2008. - 672с.
8. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики.Т.3. - СПб., 2007. - 512с.
9. Геворкян Р.Г., Шепель И.И. Курс общей физики. - М.: Высш.шк., 1972.- 600с.
10. Мухин К.Н. Введение в ядерную физику. - М.: Атомиздат, 1965. - 720с.
11. Кристи Р., Питти А. Строение вещества: введение в современную физику. - М.: Наука, 1969. - 596с.
12. Любимов А., Киш Д. Введение в экспериментальную физику частиц. - М.: Физматлит, 2002. - 272с.
13. Физический энциклопедический словарь. Гл. ред. А.М. Прохоров. - М.: Сов. энциклопедия, 1984. - 944с.
14. Фирганг Е.В. Руководство к решению задач по курсу общей физики. – СПб.: Лань, 2008. – 352с.
15. Иродов И.Е. Задачи по общей физике. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2005. – 416с.
16. Иродов И.Е. Атомная и ядерная физика: сборник задач. – СПб.; М.: Лань, 2002. – 288с.
17. Чертов А.Г. Физические величины: справочник. – М.: Аквариум, 1997. – 335с.
18. Дубровский И.М., Егоров Б.В., Рябошапка К.П. Справочник по физике. – Киев: Наукова Думка, 1986. – 560с.
19. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. – М.: Наука, 1979. – 942с.
20. Трофимова Т.И. Курс физики. Задачи и решения. – М.: Академия, 2004. - 592с.
21. Черноуцан А.И. Физика. Задачи с ответами и решениями. – М.: Книжный дом «Университет», 2001. – 336с.
22. Belitsky A.V., Radyushkin A.V. Unraveling hadron structure with generalized parton distribution//Phys. Rept.. – 2005. - № 418. – P. 1-387.

FOR AUTHOR USE ONLY

**More  
Books!**



yes  
**I want morebooks!**

Buy your books fast and straightforward online - at one of world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at  
**[www.morebooks.shop](http://www.morebooks.shop)**

Покупайте Ваши книги быстро и без посредников он-лайн – в одном из самых быстрорастущих книжных он-лайн магазинов! окружающей среде благодаря технологии Печати-на-Заказ.

Покупайте Ваши книги на  
**[www.morebooks.shop](http://www.morebooks.shop)**

KS OmniScriptum Publishing  
Brivibas gatve 197  
LV-1039 Riga, Latvia  
Telefax: +371 686 20455

[info@omniscryptum.com](mailto:info@omniscryptum.com)  
[www.omniscryptum.com](http://www.omniscryptum.com)

OMNIScriptum



FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY

FOR AUTHOR USE ONLY