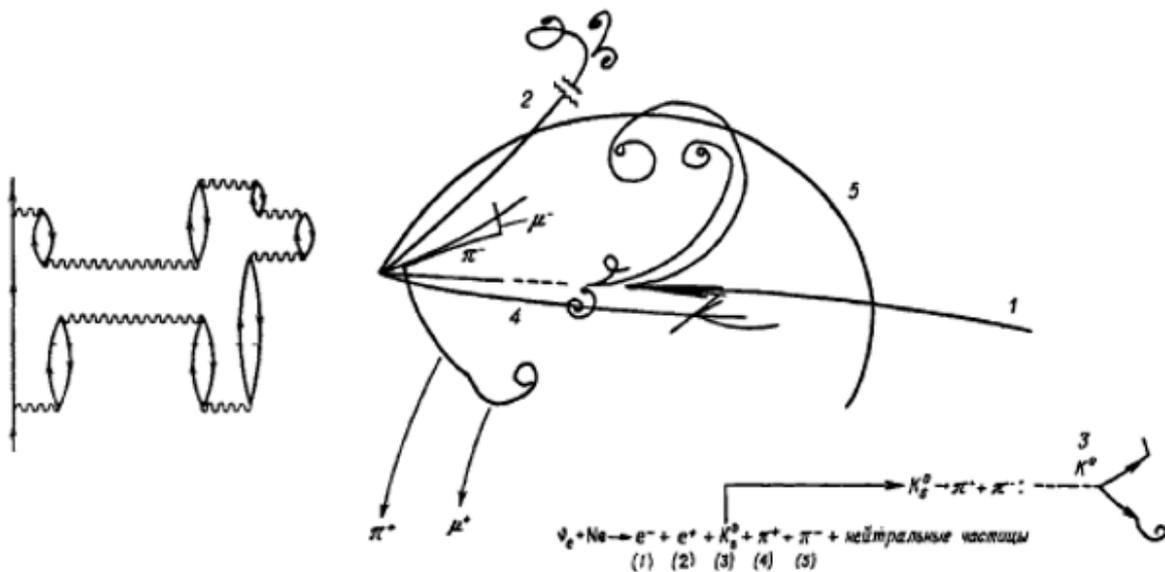


# ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

## Методические рекомендации



Челябинск

2021

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет»

**ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ**

Методические рекомендации

Челябинск

2021

УДК 539.12 (021)

ББК 22.382 Я 73

И 39

**Изучение физики элементарных частиц: методические рекомендации /** сост. Л.М. Свирская. – Челябинск: Изд-во Южно-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2021. – 95 с. – Текст: непосредственный.

В методических рекомендациях изложена методика изучения физики элементарных частиц, являющейся завершающей частью курса «Основы теоретической физики» (раздел «Физика атомного ядра и элементарных частиц»), на практических и лабораторных занятиях. Путём решения задач студенты имеют возможность совершить восхождение от элементов симметрии и основных характеристик частиц до теории Великого объединения фундаментальных взаимодействий.

Пособие предназначено для бакалавров, обучающихся по направлению 44.03.05 Педагогическое образование (физика с дополнительной специальностью).

Рецензенты: И.И. Беспаль, канд. физ.-мат. наук, доцент

Н.А. Векессер, канд. физ.-мат. наук, доцент

© Л.М. Свирская, составление, 2021

© Издательство Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета, 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА .....	5
1. ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦАХ .....	6
2. ОПЕРАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНВЕРСИИ, ОБРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЗАРЯДОВОГО СОПРЯЖЕНИЯ .....	12
2.1. Задачи практического занятия 1 .....	13
2.2. Задания для самостоятельной работы .....	17
3. ФОРМАЛИЗМ ИЗОТОПИЧЕСКОГО СПИНА. БАРИОННЫЙ ЗАРЯД, СТРАННОСТЬ, ГИПЕРЗАРЯД .....	19
3.1. Задачи практического занятия 2 .....	21
3.2. Задания для самостоятельной работы .....	24
4. ИЗОТОПИЧЕСКИЕ И УНИТАРНЫЕ МУЛЬТИПЛЕТЫ .....	26
4.1. Задачи практического занятия 3 .....	27
4.2. Задания для самостоятельной работы .....	29
5. КВАРКИ $u, d, s$ .....	32
5.1. Задачи практического занятия 4 .....	33
5.2. Задания для самостоятельной работы .....	34
6. ЦВЕТ КВАРКОВ И ГЛЮОНЫ .....	36
6.1. Задачи практического занятия 5 .....	37
6.2. Задания для самостоятельной работы .....	42
7. КВАРКИ $c, b, t$ .....	44
7.1. Задачи практического занятия 6 .....	44
7.2. Задания для самостоятельной работы .....	47

8. ЭЛЕКТРОСЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ .....	50
8.1. Задачи практического занятия 7 .....	51
8.2. Задания для самостоятельной работы .....	59
9. ВЕЛИКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ. СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ .....	63
9.1. Задачи практического занятия 8 .....	64
9.2. Задания для самостоятельной работы .....	69
10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ «МАГНЕТИЗМ МИКРОЧАСТИЦ» .....	74
11. ТИПОВЫЕ ЗАДАНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ .....	86
12. МАЛЕНЬКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ПО ФИЗИКЕ АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ .....	87
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	91
Приложение 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ БАРИОНОВ, МЕЗОНОВ, РЕЗОНАНСОВ .....	92
Приложение 2. ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА .....	94

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

«Физика атомного ядра и элементарных частиц» является завершающей частью курса «Основы теоретической физики». Значимость данного раздела для профессиональной подготовки будущего учителя обусловлена тем, что физика ядра и элементарных частиц (ФЯЭЧ) во многом определяет «лицо» современной физики. Многие проблемы, относящиеся к ФЯЭЧ, являются «фронтowymi» направлениями современной науки.

В условиях небольшого количества часов, выделяемых на изучение данной дисциплины, вопросы физики ядра рассматриваются на лекциях, а физика элементарных частиц (ФЭЧ) изучается в форме задач и упражнений на практических и лабораторных занятиях. При этом студенты получают представления о фундаментальных вопросах ФЭЧ, совершая восхождение от основных характеристик частиц до теории Великого объединения фундаментальных взаимодействий. Весь изучаемый материал представлен в 10 разделах, отражающих содержание практических занятий.

Расчетные практические занятия дополняются компьютерной лабораторной работой, связанной с определением магнитных моментов микрочастиц на основе однонуклонной модели Шмидта и в рамках кварковой модели адронов.

Планом практических занятий предусматривается проведение контрольной работы по ФЭЧ. Типовые задания контрольной работы приведены в разделе 11.

Завершающая часть работы над курсом ФЯЭЧ предполагает подготовку «Маленькой энциклопедии по физике ядра и элементарных частиц», включающей терминологический минимум, основные формулы и соотношения, экспериментальную базу, сведения о ведущих мировых научных центрах в области ядерной физики и физики элементарных частиц, а также краткую справку о вкладе лауреатов Нобелевской премии в развитие ядерной физики и физики высоких энергий.

## 1. ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦАХ

В настоящее время известно около 500 элементарных частиц (включая античастицы). Часть из них открыта в космических лучах, но большинство создано искусственно с помощью мощных ускорителей заряженных частиц. Не все из них являются истинно элементарными (т.е. фундаментальными). К элементарным частицам следует отнести микрочастицы, которые на сегодняшний день считаются бесструктурными. Поэтому предпочтительно говорить просто о частицах.

До 1932 г. в физике были известны только три элементарные частицы: электрон, фотон, протон. Самая «старая» из них – это электрон. Теоретически электрон был предсказан в 1881 г. Германом Гельмгольцем. Анализируя законы электролиза, установленные Фарадеем, Гельмгольц пришёл к выводу о существовании «атома электричества», т.е. о квантовании электрического заряда. В 1891 г. Джордж Стони (Stoney) предложил термин «электрон» для обозначения единицы элементарного электрического заряда. В 1897 г. Джозеф Джон Томсон открыл электрон при исследовании катодных лучей. Окончательно право на существование эта первая элементарная частица получила после опытов Р. Милликена в 1911 г.

В современной физике электрон рассматривается как истинно элементарная частица. Электрон участвует в электромагнитном, слабом и гравитационном взаимодействиях. Он относится к классу лептонов и не участвует в сильном взаимодействии. Электрон – легчайшая из всех заряженных частиц и является абсолютно стабильным (время жизни  $\tau_e = \infty$ ). Согласно экспериментальным данным  $\tau_e > 10^{22}$  лет. Заряд электрона равен

$$e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}, \quad \text{или} \quad 4.8 \cdot 10^{-10} \text{ СГС } (q).$$

Масса электрона

$$m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 9.1 \cdot 10^{-28} \text{ г},$$

или в энергетических единицах

$$m_e = 0.511 \text{ МэВ}.$$

В 1905 г. А. Эйнштейн в рамках созданной им специальной теории относительности сформулировал гипотезу о квантах света. В отличие от планковских

квантов энергии в теории теплового излучения, это «оживлённые» кванты, обладающие не только энергией, но и импульсом. По предложению Г. Льюиса в 1926 г. кванты света были названы фотонами. Фотон ( $\gamma$ ) электрически нейтрален. Масса покоя фотона  $m_{0\gamma} = 0$ . Фотон считается истинно элементарной частицей. Он участвует в электромагнитном и гравитационном взаимодействиях. Является переносчиком электромагнитного взаимодействия.

Протон был открыт в 1919 г. в опытах Э. Резерфорда по столкновению быстрых альфа-частиц с ядрами азота. Образующееся при этом ядро водорода было возведено в ранг фундаментальной частицы. В 1920 г. Резерфорд назвал ядро атома водорода протоном (от греческого *protos* – первый).

Масса протона на три порядка превосходит массу электрона:

$$m_p \cong 1836.2 m_e \cong 1.672 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cong 938.3 \text{ МэВ}.$$

Протон имеет положительный заряд  $e$ . Согласно современным представлениям, протон является составной частицей, имеющей внутреннюю структуру и размер  $R_p \sim 10^{-15} \text{ м}$ . Структура протона получила объяснение в рамках модели кварков.

Протон участвует во всех взаимодействиях, в том числе в сильном, и относится к классу адронов. Долгое время протон считался абсолютно стабильной частицей, но согласно Стандартной модели  $\tau_p \geq 10^{33}$  лет.

В 1932 г. Дж. Чэдвик открыл нейтрон – частицу с нулевым электрическим зарядом и массой, равной примерно массе протона. Масса нейтрона составляет

$$m_n \cong 1838,7 m_e \cong 1.675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cong 939.6 \text{ МэВ},$$

$$m_n - m_p \cong 2.5 m_e \cong 1.3 \text{ МэВ}.$$

Так же, как и протон, нейтрон является составной частицей. Он участвует во всех фундаментальных взаимодействиях и относится к классу адронов. В отличие от протона свободный нейтрон нестабилен. Его время жизни составляет  $\tau_n = 925 \text{ с} \approx 15 \text{ мин}$ . Нейтрон испытывает  $\beta^-$ -распад в процессе слабого взаимодействия.

Протон и нейтрон – это те «кирпичики», из которых строится атомное ядро. В атомном ядре они способны к взаимным превращениям согласно следующим схемам:

$$n \rightarrow p + e^{-} + \tilde{\nu}_e, \quad (1.1)$$

$$p \rightarrow n + e^{+} + \nu_e. \quad (1.2)$$

По отношению к сильному взаимодействию протон и нейтрон ведут себя совершенно одинаково. Поэтому их можно рассматривать как два разных состояния одной и той же частицы – нуклона (от латинского слова *nucleus* – ядро).

В 1930 г. В. Паули высказал гипотезу о существовании нейтрино в связи с решением проблемы непрерывного энергетического спектра при бета-распаде. Экспериментально нейтрино зарегистрировано в середине 50-х годов Ф. Рейнесом и К. Коуэном. Известно три сорта нейтрино: электронное  $\nu_e$ , мюонное  $\nu_\mu$  и таонное  $\nu_\tau$ .

В 1935 г. японский физик-теоретик Х. Юкава ввёл пи-мезоны (пионы)  $\pi^{+}, \pi^{0}, \pi^{-}$  для объяснения природы ядерных сил. Заряженные пионы открыли в 1947 г. С. Пауэлл и Дж. Оккиалини, а нейтральный пион – в 1950 г. Р. Берклунд.

В 1937 г. К. Андерсон и С. Недермайер открыли мюон  $\mu^{-}$ , который первоначально был отождествлён с переносчиком ядерных сил. Позднее оказалось, что это тяжёлый двойник электрона. В 1975 г. группа под руководством М. Перла открыла ещё более тяжёлый «собрат» электрона – тяжёлый лептон, или тау-лептон (таон  $\tau^{-}$ ). Таон и мюон так же, как и электрон, относятся к классу лептонов.

К концу 40-годов XX столетия было известно около 15 элементарных частиц. В 50-е годы были открыты ещё 15 частиц. Все они оказались нестабильными, для большинства из них  $\tau \sim 10^{-10}$  с. Среди них – ка-мезоны (каоны)  $K^{+}, K^{0}$  и их античастицы  $K^{-}, \tilde{K}^{0}$ , а также гипероны – частицы с массами, большими массы протона: лямбда-гиперон  $\Lambda^{0}$ , три сигма-гиперона  $\Sigma^{+}, \Sigma^{0}, \Sigma^{-}$  и два кси-гиперона  $\Xi^{0}$  и  $\Xi^{-}$ . Все каоны и гипероны получили название странных частиц благодаря их необычным свойствам (об этом речь пойдёт на практическом занятии 2).

В 60-е годы были открыты около сотни новых микрообъектов с чрезвычайно малым временем жизни порядка ядерного времени:  $\tau \sim 10^{-24} - 10^{-22} \text{с}$ . В настоящее время известно уже более 300 таких частиц. Они получили название резонансов. Все резонансы имеют внутреннюю структуру, объясняемую в кварковой модели, т.е. не являются истинно элементарными частицами.

В середине 70-х годов были открыты тяжёлые мезоны с массой, превышающей массу протона. Для объяснения их структуры (практическое занятие 7) были введены три дополнительных кварка.

В 1983 г. в ЦЕРНе были открыты промежуточные векторные бозоны  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  – переносчики слабого взаимодействия.

Простейшая классификация частиц представлена на рис. 1. Частицы, участвующие в сильном взаимодействии, называются адронами (в переводе с греческого hadros означает сильный). Частицы, участвующие в слабом взаимодействии, называются лептонами (в переводе с греческого – лёгкий). Всего известно 6 лептонов: электрон  $e^-$ , мюон  $\mu^-$ , тау-лептон (таон)  $\tau^-$ , электронное нейтрино  $\nu_e$ , мюонное нейтрино  $\nu_\mu$  и таонное нейтрино  $\nu_\tau$ . Лептоны характеризуются особым квантовым числом – лептонным зарядом  $L$ . По определению  $L = +1$  для лептонов (электрона  $e^-$ , отрицательного мюона  $\mu^-$ , таона  $\tau^-$  и нейтрино),  $L = -1$  для антилептонов (позитрона  $e^+$ , положительного мюона  $\mu^+$ , положительного таона  $\tau^+$  и антинейтрино),  $L = 0$  для остальных частиц (таблица 1). Лептонный заряд является аддитивным квантовым числом:

$$L = L_e + L_\mu + L_\tau, \quad (1.3)$$

где  $L_e$  – электронный заряд,  $L_\mu$  – мюонный заряд,  $L_\tau$  – таонный заряд.

Таблица 1 – Лептонный заряд для лептонов и антилептонов

Частица	L	Античастица	L
$e^-$	+1	$e^+$	-1
$\mu^-$	+1	$\mu^+$	-1
$\nu$	+1	$\bar{\nu}$	-1

Адроны делятся на стабильные частицы и резонансы (короткоживущие частицы).

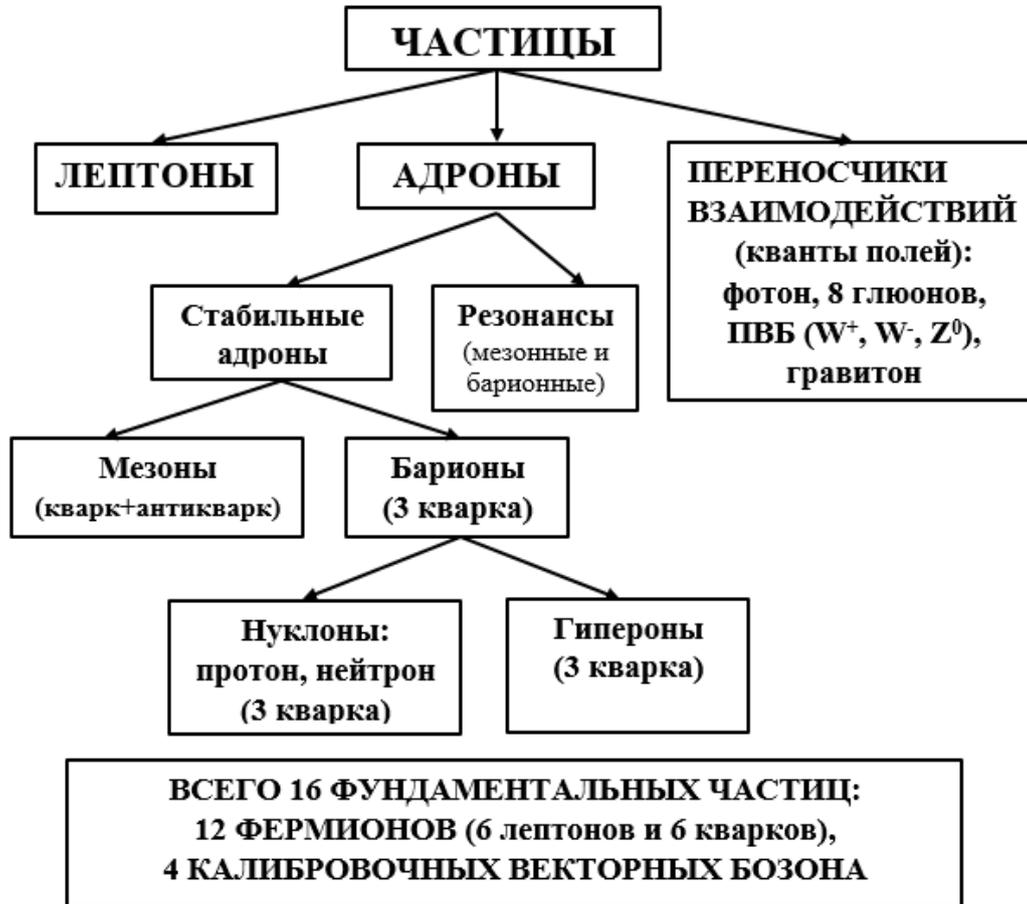


Рис. 1. Классификация частиц

Для дальнейшей классификации частиц необходимо учесть два типа квантовой статистики. Частицы с целым спином подчиняются статистике Бозе–Эйнштейна и являются бозонами. Частицы с полуцелым спином подчиняются статистике Ферми–Дирака и относятся к классу фермионов. Соответственно, стабильные адроны делятся на мезоны (частицы с целым спином, являющиеся бозо-

нами) и барионы (частицы с полуцелым спином, т.е. фермионы). Резонансы подразделяются на мезонные (бозоны) и барионные (фермионы).

Барионы характеризуются квантовым числом – барионным зарядом  $B$ . Согласно определению,  $B = +1$  для барионов,  $B = -1$  для антибарионов,  $B = 0$  для остальных частиц. Таким образом, для мезонов  $B = 0$ . Каждый мезон состоит из кварка и антикварка. Каждый барион – из трёх кварков.

Барионы подразделяются на нуклоны и гипероны. Оба типа частиц можно построить из трёх кварков.

К истинно элементарным частицам относятся 12 фермионов (6 лептонов и 6 кварков) и 4 калибровочных векторных бозона – квантов полей, соответствующих 4 типам фундаментальных взаимодействий (электромагнитное, сильное, слабое и гравитационное) – фотон, 8 глюонов, 3 промежуточных векторных бозона и гипотетический гравитон.

#### *Рекомендуемая литература*

1. Бояркин, О.М. Введение в физику элементарных частиц / О.М. Бояркин. – Москва: КомКнига, 2010. – 264 с. – ISBN 978-5-484-01085-1.
2. Капитонов, И.М. Введение в физику ядра и частиц / И.М. Капитонов. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 512 с. – ISBN 978-5-9221-1250-5. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/2189> .
3. Михайлов, М.А. Ядерная физика и физика элементарных частиц. Часть 2. Элементарные частицы: учебное пособие / М.А. Михайлов. – Москва: Прометей, 2013. – 28 с. – ISBN: 978-5-7042-2471-6. – Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/58212.html> .
4. Наумов, А.И. Физика атомного ядра и элементарных частиц / А.И. Наумов. – Москва: Просвещение, 1984. – 384 с.
5. Рудницкая, Т.Г. Элементарные частицы и фундаментальные взаимодействия / Т.Г. Рудницкая, Ю.А. Изюмов. – Екатеринбург: УРО РАН, 2010. – 348 с. – ISBN 978-5-7691-9.
6. Сафаров, Р.Х. Физика атомного ядра и элементарных частиц / Р.Х. Сафаров. – Казань: РИЦ «Школа», 2008. – 280 с. – ISBN 5-94712-015-1.

## 2. ОПЕРАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНВЕРСИИ, ОБРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЗАРЯДОВОГО СОПРЯЖЕНИЯ

### I. Операция пространственной инверсии (пространственного отражения)

**Определение 1:** операция пространственного отражения состоит в изменении знака всех трёх пространственных координат (рис. 2):

$$\boxed{\hat{\mathcal{P}}\vec{r} \rightarrow -\vec{r}; \quad \hat{\mathcal{P}}x \rightarrow -x, \quad \hat{\mathcal{P}}y \rightarrow -y, \quad \hat{\mathcal{P}}z \rightarrow -z.} \quad (2.1)$$

При этом длина вектора  $\vec{r}$  не меняется.

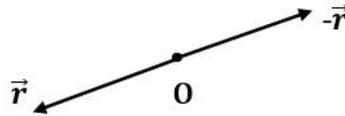


Рис. 2. Операция пространственной инверсии

Собственное значение оператора пространственного отражения  $\hat{\mathcal{P}}$  называется чётностью (от английского слова *parity* – чётность).

**Определение 2:** если вектор меняет своё направление на противоположное при действии оператора  $\hat{\mathcal{P}}$ , то такой вектор называется **полярным**.

**Определение 3:** если вектор не изменяет своего знака при операции  $\hat{\mathcal{P}}$ , то такой вектор называется **аксиальным или осевым (псевдовектором)**.

**Определение 4:** число, которое изменяет свой знак при операции  $\hat{\mathcal{P}}$ , называется **псевдоскаляром** (в отличие от истинно скалярных величин, которые не меняют своего знака).

### II. Операция обращения времени

**Определение 5:** операция обращения времени  $\hat{T}$  состоит в изменении знака времени (ось времени меняет своё направление на противоположное):

$$\boxed{\hat{T}t \rightarrow -t} \quad (2.2)$$

### III. Операция зарядового сопряжения

**Определение 6:** операция зарядового сопряжения  $\hat{C}$  меняет знак электрического заряда частицы, т.е. превращает частицу в античастицу:

$$\boxed{\hat{C}|частица\rangle \rightarrow |античастица\rangle} \quad (2.3)$$

Название этой операции происходит от первой буквы английского слова *charge* – заряд.

#### 2.1. Задачи практического занятия 1

1. Определить результат действия оператора  $\hat{P}$  на следующие механические величины:

- а) скорость  $\vec{v}$ ,
- б) импульс  $\vec{p} = m\vec{v}$ ,
- в) момент импульса  $\vec{K} = [\vec{r}\vec{p}]$ ,
- г) вектор спина  $\vec{S}$ .

2. Определить результат действия оператора  $\hat{P}$  на скалярное произведение  $(\vec{S}\vec{p})$ .

3. Показать, что в результате операции  $\hat{P}$  правая декартовая система координат переходит в левую.

4. Определить результат действия оператора  $\hat{P}$  на векторы напряжённости электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  поля. В качестве вектора  $\vec{E}$  выбрать напряжённость электрического поля точечного заряда

$$\vec{E} = \frac{q}{r^3}\vec{r}, \quad (2.4)$$

в качестве вектора  $\vec{H}$  выбрать

$$\vec{H} = \frac{1}{c}[\vec{v}\vec{E}]. \quad (2.5)$$

5. Определить результат действия оператора  $\hat{P}$  на скалярный и векторный потенциалы. Использовать потенциал поля точечного заряда

$$\varphi = \frac{q}{r} \quad (2.6)$$

и выражение для векторного потенциала

$$\vec{A} = \frac{1}{c} \int_V \frac{\vec{j}}{r} dV, \quad (2.7)$$

где  $\vec{j} = en\vec{v}$  – плотность электрического тока.

6. Определить собственные значения  $\lambda_P$  оператора  $\hat{P}$  и установить возможность существования двух классов состояний: чётные и нечётные.

7. Показать, что электрические дипольные переходы в атоме водорода происходят между состояниями с противоположной чётностью, т.е. путём изменения чётности (правило Лапорта).

Из квантовой механики известно, что чётность

$$\lambda_P = (-1)^\ell, \quad (2.8)$$

где  $\ell$  – орбитальное квантовое число, для которого выполняется правило отбора

$$\ell' = \ell \pm 1, \text{ или } \Delta\ell = \pm 1. \quad (2.9)$$

Надо показать, что

$$\lambda'_P = (-1)^{\ell'} = -\lambda_P. \quad (2.10)$$

По результатам вычислений заполнить таблицу 2.

Таблица 2 – Чётность различных орбитальных состояний

Орбитальные состояния	s	p	d	f	g
$\ell$	0	1	2	3	4
$\lambda_P$					
Чётность					

8. Показать, что чётность является величиной мультипликативной, т.е. чётность системы

$$\lambda_{ab} = \lambda_a \cdot \lambda_b, \quad (2.11)$$

где  $\lambda_a$  и  $\lambda_b$  – чётности подсистем  $a$  и  $b$ .

9. Показать, что в электромагнитном взаимодействии пространственная чётность сохраняется.

*Указание:* рассмотреть по отдельности действие операции пространственной инверсии на энергию электрического дипольного взаимодействия

$$W_{эл} = -(\vec{p}\vec{E}), \quad (2.12)$$

где  $\vec{p}$  – электрический дипольный момент, и энергию магнитного дипольного взаимодействия,

$$W_{маг} = -(\vec{\mu}\vec{H}), \quad (2.13)$$

где  $\vec{\mu}$  – магнитный момент, связанный с моментом импульса по теореме Ампера

$$\vec{\mu} = \frac{e}{2mc} \vec{K}. \quad (2.14)$$

10. Наряду с рассмотренным ранее понятием внешней (или орбитальной) чётности  $\lambda_{орб}$ . можно ввести понятие внутренней чётности  $\lambda_0$ , характеризующей свойство самой частицы. Это понятие играет важную роль в микромире, где частицы могут рождаться и исчезать. В общем случае

$$\lambda_p = \lambda_0 \cdot \lambda_{орб}. \quad (2.15)$$

Формально внутреннюю чётность можно вести следующим образом:

$$\hat{P}\psi(0) = \pm\psi(0). \quad (2.16)$$

При этом

$$\hat{P}\psi(0) = \psi(0), \quad \lambda_0 = +1, \quad (2.17)$$

$$\hat{P}\psi(0) = -\psi(0), \quad \lambda_0 = -1. \quad (2.18)$$

Показать, что внутренняя чётность фотона, излучаемого атомом при электрическом дипольном переходе, является величиной отрицательной:

$$\lambda_\gamma = -1. \quad (2.19)$$

Для доказательства (2.19) учесть, что

$$1) \lambda_{до} = \lambda_{после}, \text{ т.е. } \lambda_{атома} = \lambda'_{атома} \cdot \lambda_\gamma;$$

$$2) \lambda_{атома, до} = -\lambda_{атома, после}.$$

11. Определить результат действия операции  $\hat{T}$  на вектор скорости  $\vec{v}$ .

12. Определить результат действия операции  $\hat{T}$  на векторы напряжённости электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  поля.

13. Установить, ковариантны ли относительно операции  $\hat{T}$ :

а) второй закон Ньютона;

б) уравнение Шрёдингера.

Показать, что уравнение Шрёдингера ковариантно относительно операции комбинированного обращения времени

$$\hat{\Theta} = \hat{K} \cdot \hat{T}, \quad (2.20)$$

где  $\hat{K}$  – операция комплексного сопряжения.

14. Определить результат действия операции  $\hat{C}$  на векторы напряжённости электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  поля.

15. Определить собственные значения оператора  $\hat{C}$ .

16. Определить зарядовую чётность фотона.

17. Показать, что в электромагнитном взаимодействии зарядовая чётность сохраняется.

18. Показать, что в электромагнитном взаимодействии сохраняется комбинированная чётность, т.е. выполняется теорема Людерса–Паули (1954–55 гг.): «Любое локальное взаимодействие, инвариантное относительно преобразований Лоренца, инвариантно также относительно комбинированного преобразования  $\hat{C}\hat{P}\hat{T}$ »

$$\boxed{\hat{C}\hat{P}\hat{T} = \text{invar.}} \quad (2.21)$$

Это фундаментальная теорема квантовой теории поля (КТП): уравнения должны быть инвариантными относительно произведения трёх преобразований:  $\hat{C}, \hat{P}, \hat{T}$ . Экспериментально ни одного нарушения этой теоремы не обнаружено.

По результатам вычислений заполнить таблицу 3.

Таблица 3 – Действие операций  $\hat{C}, \hat{P}, \hat{T}$  на электрические и магнитные величины

Физическая величина	$\hat{P}$	$\hat{T}$	$\hat{C}$	$\hat{C}\hat{P}\hat{T}$
$\vec{p}$				
$\vec{E}$				
$\vec{\mu}$				
$\vec{H}$				

## 2.2. Задания для самостоятельной работы

1. Доказать, что в результате операции пространственной инверсии левая система координат переходит в правую.
2. Определить результат действия оператора  $\hat{P}$  на вектор ускорения  $\vec{a}$ .
3. Определить результат действия оператора  $\hat{P}$  на вектор плотности электрического тока  $\vec{j}$ .
4. Установить, является ли закон Ома в дифференциальной форме

$$\vec{j} = \lambda \vec{E} \quad (2.22)$$

ковариантным относительно операции обращения времени  $\hat{T}$ .

5. Показать, что ускорительное уравнение для сверхпроводника (первое уравнение Ф. и Г. Лондонов)

$$\frac{d\vec{j}}{dt} = \frac{ne^2}{m} \vec{E} \quad (2.23)$$

является ковариантным относительно операции обращения времени  $\hat{T}$ . С этим связан обратимый характер данного уравнения, оно описывает бездиссипативный процесс (электроны в сверхпроводнике движутся без сопротивления, т.е. закон Джоуля–Ленца в этом случае не имеет места, никаких тепловых потерь нет, электроны не передают свою энергию кристаллической решётке).

6. Определить зарядовую чётность  $\pi^0$ -мезона, учитывая, что он распадается на 2  $\gamma$ -кванта:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma. \quad (2.24)$$

7. Показать, что распад  $\pi^0$ -мезона на три  $\gamma$ -кванта запрещён законом сохранения зарядовой чётности.

8. Найти результат действия оператора  $\hat{C}$  на электрон.

9. Показать, что система уравнений Максвелла ковариантна относительно комбинированного преобразования  $\hat{C}\hat{P}\hat{T}$ .

10. Составить таблицу действия трёх операторов  $\hat{C}, \hat{P}, \hat{T}$ , а также комбинированного преобразования  $\hat{C}\hat{P}\hat{T}$  на следующие физические величины:

Таблица 4 – Действие операций  $\hat{C}, \hat{P}, \hat{T}$  на физические величины

Величина	$\hat{P}$	$\hat{T}$	$\hat{C}$	$\hat{C}\hat{P}\hat{T}$
1. $\vec{r}$				
2. $t$				
3. $\vec{v}$				
4. $\vec{a}$				
5. $\vec{K}$				
6. $q$ (заряд)				
7. $\vec{j}$				
8. $\vec{E}$				
9. $\vec{H}$				
10. $\vec{p}$ (дипольный момент)				
11. $\vec{\mu}$				
12. $\varphi$				
13. $\rho$ (плотность заряда)				
14. $m$ (масса)				

### Рекомендуемая литература

1. Капитонов, И.М. Введение в физику ядра и частиц / И.М. Капитонов. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 512 с. – ISBN 978-5-9221-1250-5. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/2189> .
2. Наумов, А.И. Физика атомного ядра и элементарных частиц / А.И. Наумов. – Москва: Просвещение, 1984 – 384 с.
3. Райдер, Л. Элементарные частицы и симметрии / Л. Райдер; пер. с англ.; под ред. Б.М. Барбашова. – Москва: Наука, 1983. – 317 с.
4. Сафаров, Р.Х. Физика атомного ядра и элементарных частиц / Р.Х. Сафаров. – Казань: РИЦ «Школа», 2008. – 280 с. – ISBN 5-94712-015-1.

## 3. ФОРМАЛИЗМ ИЗОТОПИЧЕСКОГО СПИНА. БАРИОННЫЙ ЗАРЯД, СТРАННОСТЬ, ГИПЕРЗАРЯД

### 1. *Изотопический спин*

Изотопический спин (изоспин) – это важнейшая внутренняя характеристика (квантовое число), определяющее число зарядовых состояний адронов. Понятие изотопического спина было введено В. Гейзенбергом в 1932 г. Термин «изотопический спин» был введён по аналогии со спином электрона в квантовой механике (В. Паули, С. Гаудсмит, Д. Уленбек, 1925 г.). Аналогию между спином и изоспином можно увидеть из таблицы 5.

По отношению к сильному взаимодействию протон и нейтрон ведут себя совершенно одинаково. Это позволяет рассматривать протон и нейтрон как два разных состояния одной и той же частицы – нуклона. Нуклон характеризуется квантовым числом  $T = 1/2$ , которое называется изоспином. Протонное и нейтронное состояния нуклона различаются значениями третьей проекции изоспина в особом изотопическом пространстве: для протона  $T_{3p} = +1/2$ , для нейтрона  $T_{3n} = -1/2$ .

Изотопический спин является характеристикой изомультиплета в целом. Во всех процессах, обусловленных сильным взаимодействием, имеет место закон сохранения изотопического спина.

Таблица 5 – Аналогия спина и изотопического спина

Спин электрона в квантовой механике	Изотопический спин в физике элементарных частиц
<p>Электрон имеет два спиновых состояния, соответствующие двум возможным проекциям спина (<math>\uparrow</math> и <math>\downarrow</math>).</p> <p>Спин электрона</p> $S = \frac{1}{2},$ $S_z = \pm \frac{1}{2}, \quad \hbar \equiv 1.$ <p>Связь операторов спина со спиновыми матрицами Паули:</p> $\hat{S}_x = \frac{\hbar}{2} \hat{\sigma}_x; \hat{S}_y = \frac{\hbar}{2} \hat{\sigma}_y; \hat{S}_z = \frac{\hbar}{2} \hat{\sigma}_z.$ $\hat{\sigma}_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}; \hat{\sigma}_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}; \hat{\sigma}_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$ <p>Волновая функция электрона – двух-компонентный спинор:</p> $\Psi_{\uparrow} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}; \Psi_{\downarrow} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$ $\hat{\sigma}_x \Psi_{\uparrow} = \Psi_{\downarrow}; \hat{\sigma}_x \Psi_{\downarrow} = \Psi_{\uparrow};$ $\hat{\sigma}_y \Psi_{\uparrow} = i \Psi_{\downarrow}; \hat{\sigma}_y \Psi_{\downarrow} = -i \Psi_{\uparrow};$ $\hat{\sigma}_z \Psi_{\uparrow} = \Psi_{\uparrow}; \hat{\sigma}_z \Psi_{\downarrow} = -\Psi_{\downarrow}.$ <p>Число спиновых состояний при данном S (мультиплетность):</p> $\boxed{N_s = 2S + 1}$	<p>Протон и нейтрон рассматриваются как два зарядовых состояния нуклона (<math>q = 1</math>, протон; <math>q = 0</math>, нейтрон).</p> <p>Изотопический спин нуклона</p> $T = \frac{1}{2},$ $T_{3p} = \frac{1}{2}, T_{3n} = -\frac{1}{2}, \quad \hbar \equiv 1.$ <p>Связь операторов изотопического спина с матрицами Паули:</p> $\hat{T}_1 = \frac{1}{2} \hat{t}_1; \hat{T}_2 = \frac{1}{2} \hat{t}_2; \hat{T}_3 = \frac{1}{2} \hat{t}_3.$ $\hat{t}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}; \hat{t}_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}; \hat{t}_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$ <p>Волновые функции протона и нейтрона:</p> $\Psi_p =  p\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \Psi_n =  n\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$ $\hat{t}_1 \Psi_p = \Psi_n; \hat{t}_1 \Psi_n = \Psi_p;$ $\hat{t}_2 \Psi_p = i \Psi_n; \hat{t}_2 \Psi_n = -i \Psi_p;$ $\hat{t}_3 \Psi_p = \Psi_p; \hat{t}_3 \Psi_n = -\Psi_n.$ <p>Число состояний с данным изоспином T (число членов изотопического мультиплета):</p> $\boxed{N_T = 2T + 1}$

## II. Барионный заряд

В ядерной физике наряду с обычным электрическим зарядом вводится барионный заряд (или барионное число). Барионный заряд – это квантовое число, которое принимает следующие значения:

$$B = +1 \text{ для барионов, } B = -1 \text{ для антибарионов,}$$
$$B = 0 \text{ для мезонов и лептонов.}$$

Соответственно, для протона и нейтрона  $B = +1$ , для антипротона и антинейтрона  $B = -1$ .

В ядерных реакциях должен выполняться закон сохранения барионного заряда, поэтому должно сохраняться число нуклонов (или антинуклонов). Нарушение закона сохранения барионного заряда и, как следствие этого – возможная нестабильность протона, будет рассматриваться в теории Великого объединения фундаментальных взаимодействий на последнем практическом занятии.

## III. Странность и гиперзаряд

Странность  $S$  – квантовое число, которое было введено для описания необычных свойств частиц, получивших название странных. У обычных частиц  $S = 0$ . Для странных частиц  $S = \pm 1, \pm 2, \pm 3$ . «Самой странной» частицей является  $\Omega^-$ -гиперон, обладающий максимальной по модулю странностью ( $S = -3$ ).

Странность сохраняется при сильном и электромагнитном взаимодействии, но не сохраняется в слабом взаимодействии.

Гиперзаряд  $Y$  определяется следующим образом:

$$Y = B + S. \tag{3.1}$$

### 3.1. Задачи практического занятия 2

1. Определить собственные значения оператора третьей проекции изотопического спина  $T_3$  в состояниях протона и нейтрона. Расположить изодублет нуклонов на оси  $T_3$ . Обобщить полученный результат для произвольного ядра  ${}^A_ZX$ .

2. Определить изотопический спин  $T$  и его третью проекцию для изотопического триплета пи-мезонов:  $\pi^+, \pi^0, \pi^-$ . Расположить изотопический триплет пи-мезонов на оси  $T_3$ .

3. Определить  $T$  и  $T_3$   $\Lambda^\circ$ -гиперона, являющегося изотопическим синглетом ( $m_{\Lambda^\circ} = 1115,6 \text{ МэВ}$ ; для сравнения:  $m_p = 938,3 \text{ МэВ}$ ). Показать положение  $\Lambda^\circ$ -гиперона на оси  $T_3$ .

4. Определить  $T$  и  $T_3$  для семейства  $\Delta$ -резонансов:  $\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$ . Расположить изотопический квартет резонансов на оси  $T_3$ .

По результатам задач 1–4 заполнить таблицу 6.

Таблица 6 – Значения  $T$  и  $T_3$  для различных изомультиплетов

$N_T$	1	2	3	4	
$T$					
$T_3$					

5. Используя закон сохранения барионного заряда, определить возможность следующих реакций:

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e, \quad (3.2)$$

$$p + p \rightarrow {}^2_1\text{H} + \pi^+. \quad (3.3)$$

6. Установить связь между электрическим зарядом  $Q$ , третьей проекцией изотопического спина  $T_3$  и барионным зарядом  $B$ , полагая, что они связаны между собой линейно, т.е. получить формулу Гелл-Манна–Нишиджимы для нестранных частиц:

$$Q = T_3 + \frac{1}{2}B. \quad (3.4)$$

7. Используя формулу Гелл-Манна–Нишиджимы, определить  $T_3$  для антипротона и антинейтрона. Расположить дублет антинуклонов на оси  $T_3$ .

8. Показать, что для  $\Lambda^\circ$ -гиперона имеет место нарушение соотношения Гелл-Манна–Нишиджимы (3.4). Такие частицы получили название странных, они

характеризуются квантовым числом странности  $S$  (Гелл-Манн, 1953 г. и независимо Нишиджима, 1954 г.). «Странным» было следующее:

1) эти частицы рождаются только парами из нестранных частиц, причём сравнительно быстро, за время  $\tau \sim 10^{-23}$  с, т.е. в результате сильного взаимодействия;

2) они имеют сравнительно большое время жизни (например,  $\tau_{\Lambda^0} \sim 10^{-10}$  с;  $\tau_{K^+} \sim 10^{-8}$  с), т.е. распадаются путём слабого взаимодействия.

Обобщённая формула Гелл-Манна–Нишиджимы с учётом странности имеет вид:

$$Q = T_3 + \frac{1}{2}(B + S), \quad (3.5)$$

или

$$Q = T_3 + \frac{1}{2}Y. \quad (3.6)$$

Следует заметить, что природа странности  $S$  неизвестна. Однако физический смысл гиперзаряда  $Y$ , являющегося суммой барионного заряда и странности, можно выяснить в рамках следующей задачи.

9. Показать, что гиперзаряд равен удвоенному среднему значению электрического заряда частиц изотопического мультиплетта:

$$Y = 2\bar{Q}. \quad (3.7)$$

10. Определить странность и гиперзаряд  $\Lambda^0$ -гиперона, используя обобщённую формулу Гелл-Манна–Нишиджимы.

11. Определить странность и гиперзаряд изотопического триплетта  $\Sigma$ -гиперонов ( $\Sigma^+$ ,  $\Sigma^0$ ,  $\Sigma^-$ ).

12. Определить странность и гиперзаряд изодублета  $\Xi$ -гиперонов ( $\Xi^0$ ,  $\Xi^-$ ).

13. Определить странность и гиперзаряд изотопического дублета протона и нейтрона.

### 3.2. Задания для самостоятельной работы

1. Определить действие первой и второй матриц изотопического спина ( $\hat{t}_1$  и  $\hat{t}_2$ ) на волновые функции протона и нейтрона.

2. Определить изотопический спин  $T$  и его третью проекцию  $T_3$  для изотопического дублета кси-гиперонов:  $\Xi^0, \Xi^-$ .

3. Определить изотопический спин  $T$  и его третью проекцию  $T_3$  для изотопического дублета  $K^-$  и  $K^0$ -мезонов и для изодублета их античастиц  $K^+$  и  $\bar{K}^0$ -мезонов.

4. Учитывая закон сохранения барионного заряда, определить возможны ли следующие реакции:

а)  $p + p \rightarrow p + p + \bar{p}$ ;

б)  $n + \nu_e \rightarrow e^- + p$ .

5. Проверить, выполняется ли соотношение Гелл-Манна–Нишиджимы для:

а) протона;

б) нейтрона;

в) дейтерия.

6. Объясните, почему в природе отсутствует процесс «аннигиляции» атома водорода:

$$p + e^- \rightarrow 2\gamma.$$

7. Проверить выполнение законов сохранения электрического заряда, числа нуклонов и барионного заряда в следующих ядерных превращениях:

Реакция	Электрический заряд	Число нуклонов, барионный заряд
${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + n$	1+1=2+0	2+2=3+1
$p + {}^7_3\text{Li} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + n$	и так далее.....	
$\gamma + {}^7_4\text{Be} \rightarrow 2 {}^4_2\text{He} + n$		
$\gamma + {}^2_1\text{H} \rightarrow p + n$		
$n + {}^{32}_{16}\text{S} \rightarrow {}^{32}_{15}\text{P} + p$		
${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + p$		

8. Проверить выполнение законов сохранения электрического заряда, числа нуклонов и барионного заряда в реакциях  $\alpha$ -распада,  $\beta$ -распада, и  $K$ -захвата:

Реакция	Электрический заряд	Число нуклонов, барионный заряд
${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{88}\text{Ra} + {}^4_2\text{He}$		
${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + e^- + \bar{\nu}$		
${}^7_4\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7_3\text{Li} + \nu$		

9. В 1955 г. американские физики Сегре, Чемберлен, Виганд и Ипсилантис обнаружили антипротон ( $\bar{p}$ ). Установить, разрешены ли законами сохранения барионного заряда ( $B$ ) и изотопического спина ( $T, T_3$ ) следующие реакции взаимодействия протона и антипротона:

$$1) \bar{p} + p \rightarrow \bar{\Lambda}^0 + \Lambda^0; \quad 2) \bar{p} + p \rightarrow \bar{\Lambda}^0 + \Lambda^0 + \pi^0; \quad 3) \bar{p} + p \rightarrow \bar{\Sigma}^0 + \Lambda^0.$$

10. Антинейтрон ( $\bar{n}$ ) впервые наблюдался в 1956 г. в США (Корк, Ламбертсон, Пиччиони, Вентцель) в процессах перезарядки антипротонов при их взаимодействии с нуклонами:

$$1) \bar{p} + p \rightarrow \bar{n} + n; \quad 2) \bar{p} + n \rightarrow \bar{n} + n + \pi^-$$

Проверить выполнение законов сохранения барионного заряда и изотопического спина ( $T, T_3$ ) в этих процессах.

#### *Рекомендуемая литература*

1. Михайлов, М.А. Ядерная физика и физика элементарных частиц. Часть 2. Элементарные частицы: учебное пособие / М.А. Михайлов. – Москва: Прометей, 2013. – 28 с. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/58212.html>.
2. Наумов, А.И. Физика атомного ядра и элементарных частиц / А.И. Наумов. – Москва: Просвещение, 1984 – 384 с.
3. Сафаров, Р.Х. Физика атомного ядра и элементарных частиц / Р.Х. Сафаров. – Казань: РИЦ «Школа», 2008. – 280 с. – ISBN 5-94712-015-1.

## 4. ИЗОТОПИЧЕСКИЕ И УНИТАРНЫЕ МУЛЬТИПЛЕТЫ

### I. Изотопические мультиплеты

Большое разнообразие адронов (их несколько сотен) привело к необходимости упорядочения множества этих частиц. В первой классификационной схеме, которую предложили М. Гелл-Манн (1953 г.) и независимо К. Нишиджима (1954 г.), адроны разбиваются на изотопические мультиплеты с определённым значением изотопического спина  $T$  и гиперзаряда  $Y$ . Члены данного изомультиплета имеют одинаковые значения спина  $J$ , пространственной чётности  $\lambda_p$ , барионного заряда  $B$ , близкие массы  $M$ , но разные значения проекции изоспина  $T_3$ . Число членов изомультиплета совпадает с числом возможных значений третьей проекции изотопического спина  $T_3$  и определяется формулой  $N_T = 2T + 1$ . Характеристики четырёх изомультиплетов, рассчитанных в задачах № 10–13 на предыдущем занятии, представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Характеристики четырёх изомультиплетов

Изомультиплет	Частицы	Q	B	$J^{\lambda_p}$	T	$T_3$	S	Y	M, МэВ
N	p	+1	+1	$\frac{1^+}{2}$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	0	1	938,3
	n	0	+1	$\frac{1^+}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	1	939,6
$\Lambda$	$\Lambda^0$	0	+1	$\frac{1^+}{2}$	0	0	-1	0	1115,6
$\Sigma$	$\Sigma^+$	+1	+1	$\frac{1^+}{2}$	1	+1	-1	0	1189,4
	$\Sigma^0$	0	+1	$\frac{1^+}{2}$	1	0	-1	0	1192,5
	$\Sigma^-$	-1	+1	$\frac{1^+}{2}$	1	-1	-1	0	1197,3
$\Xi$	$\Xi^0$	0	+1	$\frac{1^+}{2}$	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	-2	-1	1315
	$\Xi^-$	-1	+1	$\frac{1^+}{2}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	-2	-1	1321,3

Изомультиплеты удобно иллюстрировать с помощью весовых диаграмм, располагая каждый член изотопического мультиплета на оси  $T_3$  в соответствии со значением этого квантового числа.

*Задание:* построить весовые диаграммы для четырёх изомультиплетов, представленных в таблице 7.

Схема Гелл-Манна–Нишиджимы не только упорядочила адроны, но и позволила предсказать ряд частиц, открытых затем экспериментально (например,  $\Sigma^0$ ,  $\Xi^0$ ,  $\tilde{K}^0$  – в соответствующих мультиплетах были пустые места до экспериментального обнаружения этих частиц).

После открытия резонансов появилось очень много различных изомультиплетов, в результате схема Гелл-Манна–Нишиджимы стала слишком узкой. На смену этой схемы пришла другая, основанная на введении унитарных мультиплетов.

## II. Унитарные мультиплеты

В 1961 г. М. Гелл-Манн и независимо Ю. Неeman построили новую схему, в которой адроны разбиваются на унитарные мультиплеты. Каждый член унитарного мультиплета характеризуется двумя «внутренними» квантовыми числами –  $T_3$  и  $Y$  (в то время как члены изомультиплета различались значениями одного «внутреннего» квантового числа – проекции изоспина  $T_3$ ). Размерность изомультиплета может быть любым натуральным числом. А для унитарных мультиплетов могут иметь место такие семейства, как синглет, октет, декуплет, 27-плет и т.д.

### 4.1. Задачи практического занятия 3

1. Заполнить таблицу квантовых чисел, характеризующих октет барионов ( $B = 1$ ) со спином  $1/2$  ( $J^{\lambda_p} = \frac{1}{2}^+$ ).

Таблица 8 – Квантовые числа октета барионов со спином  $1/2$

частицы	p	n	$\Lambda^0$	$\Sigma^+$	$\Sigma^0$	$\Sigma^-$	$\Xi^0$	$\Xi^-$
$T_3$								
$Y$								

2. Построить весовую диаграмму в координатах  $(T_3, Y)$  октета барионов со спином  $1/2$ . Классификационная схема адронов, в которой число 8 играет выделенную роль, по предложению Гелл-Манна получила название «восьмеричный формализм», или «восьмеричный путь» (по аналогии с «благородным восьмеричным путём», который был указан Буддой монахам, чтобы избежать страданий). «Вектор» унитарного спина имеет 8 компонентов. Унитарная симметрия соответствует группе  $SU(3)$ .

3. Определить странность и гиперзаряд изотопического триплета  $\pi$ -мезонов ( $\pi^+, \pi^0, \pi^-$ ). Мезоны не имеют барионного заряда ( $B = 0$ ).

4. Определить изотопический спин  $T$ , его третью проекцию  $T_3$ , странность и гиперзаряд изотопического дублета  $K$ -мезонов ( $K^+, K^0$ ).

5. Определить изотопический спин  $T$ , его третью проекцию  $T_3$ , странность и гиперзаряд изодублета античастиц  $K^-$  и  $\bar{K}^0$ .

6. Определить изотопический спин  $T$ , его третью проекцию  $T_3$ , странность и гиперзаряд  $\eta^0$ -мезона, представляющего собой изотопический синглет.

7. Заполнить таблицу квантовых чисел, характеризующих октет мезонов ( $B = 0$ ) со спином 0 ( $J^{\lambda p} = 0^-$ ).

Таблица 9 – Квантовые числа октета мезонов

частицы	$\pi^+$	$\pi^0$	$\pi^-$	$K^+$	$K^0$	$K^-$	$\bar{K}^0$	$\eta^0$
$T_3$								
$Y$								

8. Построить весовую диаграмму в координатах  $(T_3, Y)$  октета мезонов со спином 0.

9. Определить странность и гиперзаряд квартета барионных резонансов  $\Delta^{++}, \Delta^+, \Delta^0, \Delta^-$ .

10. Определить странность и гиперзаряд триплета барионных резонансов  $\Sigma^{*+}, \Sigma^{*0}, \Sigma^{*-}$ .

11. Определить странность и гиперзаряд дублета  $\Xi^{*0}$  и  $\Xi^{*-}$ -резонансов.

12. Определить странность частицы  $\Omega^-$ -гиперона ( $m_{\Omega} = 1672.5 \text{ МэВ}$ ), которая сначала была предсказана теоретически на основе модели кварков, а затем открыта экспериментально в 1964 г. в реакции



Предсказание и последующее открытие  $\Omega^-$ -гиперона явилось настоящим триумфом восьмеричного формализма.

13. Заполнить таблицу квантовых чисел, характеризующих декуплет барионных резонансов ( $B = 1$ ) со спином  $3/2$  ( $J^{\lambda p} = \frac{3^+}{2}$ ).

Таблица 10 – Квантовые числа барионного декуплета

частицы	$\Delta^{++}$	$\Delta^+$	$\Delta^0$	$\Delta^-$	$\Sigma^{*+}$	$\Sigma^{*0}$	$\Sigma^{*-}$	$\Xi^{*0}$	$\Xi^{*-}$	$\Omega^-$
$T_3$										
$Y$										

14. Построить весовую диаграмму в координатах  $(T_3, Y)$  декуплета барионных резонансов со спином  $3/2$ .

#### 4.2. Задания для самостоятельной работы

1. Построить весовые диаграммы для антибарионов, у которых

$$B = -1, J^{\lambda p} = \frac{1^-}{2}.$$

2. В сильных и электромагнитных взаимодействиях имеет место закон сохранения странности ( $\Delta S = 0$ ). Проверьте справедливость этого закона в следующих процессах рождения странных частиц:

1)  $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$ ; 2)  $\pi^+ + n \rightarrow \Xi^- + K^+ + K^+$ ; 3)  $p + p \rightarrow \Lambda^0 + K^+ + p$ .

3. Покажите, что законом сохранения странности запрещены следующие процессы:

1)  $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$ ; 2)  $p + n \rightarrow \Lambda^0 + \Sigma^+$ ; 3)  $\pi^- + p \rightarrow \Omega^- + K^+ + K^+ + K^0$ .

4. Намбу, Нишиджима, Ямагучи, Онеда (1951 г.) и Пайс (1952 г.) высказали гипотезу о парном рождении странных частиц из нестранных в процессах силь-

ного взаимодействия. Вычислив  $\Delta S$ , установите, подтверждается ли эта гипотеза в следующих процессах:

$$1) \pi^- + p \rightarrow \Sigma^- + K^+; \quad 2) \pi^- + p \rightarrow K^+ + K^- + n.$$

5. Проверьте возможность распада  $\Xi^0$ -гиперона

$$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$$

а) по электрическому заряду; б) по странности; в) по энергии (учесть, что масса распадающейся частицы должна превышать сумму масс частиц, получающихся в результате распада).

6. Закон сохранения странности не является универсальным. Он может не выполняться при слабом взаимодействии. В процессах распада странных частиц на обычные, нестранные,  $\Delta S = 0, \pm 1$ . Проверьте справедливость этого утверждения на двух примерах:

$$1) \Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-; \quad 2) \Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0.$$

7. Составить таблицу октета мезонов со спином 0:

Таблица 11 – Характеристики октета мезонов

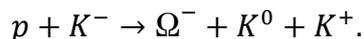
частицы	Q	B	$J^{\lambda_P}$	T	$T_3$	S	Y	M (МэВ)
$\pi^+$								
$\pi^-$								
и т.д.								

8. Составить таблицу характеристик декуплета барионных резонансов со спином 3/2:

Таблица 12 – Характеристики декуплета барионных резонансов

частицы	Q	B	$J^{\lambda_P}$	T	$T_3$	S	Y	M (МэВ)
$\Delta^{++}$								
$\Delta^+$								
и т.д.								

9. Самая странная частица  $\Omega^-$ -гиперон ( $S = -3$ ) была открыта в 1964 г. в Брукхейвене. Пучок отрицательных каонов, сфокусированных магнитным полем, направлялся на водородную мишень, в результате чего было зарегистрировано рождение  $\Omega^-$ -гиперона:



Проверьте справедливость законов сохранения барионного заряда и странности в этом процессе.

10. В цепочке превращений  $\Omega^-$ -гиперона проверьте возможность каждого этапа:

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

а) по электрическому заряду; б) по барионному заряду; в) по странности.

Образование и все стадии распада  $\Omega^-$ -гиперона можно зарегистрировать с помощью пузырьковой камеры (фотография события и его расшифровка):

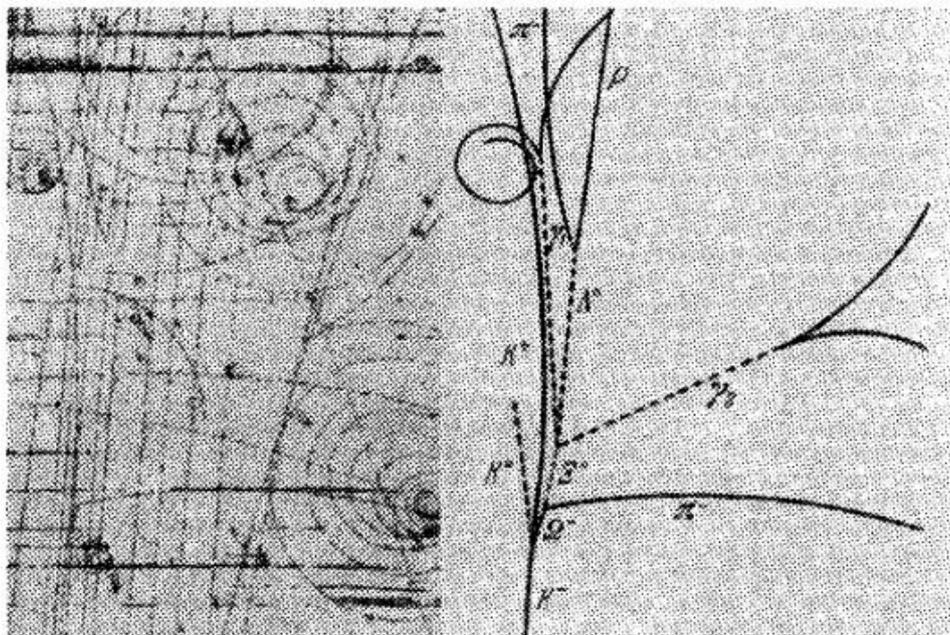


Рис. 3. Фотография события в пузырьковой камере, в котором участвует  $\Omega^-$ -гиперон, и его расшифровка (справа)

### *Рекомендуемая литература*

1. Мухин, К.Н. Экспериментальная ядерная физика: в 3 т. / К.Н. Мухин. – Санкт-Петербург: Лань, 2021 – Том 3: Физика элементарных частиц. 2021. – 416 с. – ISBN 978-5-8114-7643-5. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/163401>.
2. Наумов, А.И. Физика атомного ядра и элементарных частиц / А.И. Наумов. – Москва: Просвещение, 1984. – 384 с.
3. Широков, Ю.М. Ядерная физика / Ю.М. Широков, Н.П. Юдин. – Москва: Наука, 1980. – 728 с.

### **5. КВАРКИ $u$ , $d$ , $s$**

Симметрия весовых диаграмм, построенных на предыдущем занятии, наводит на мысль о существовании внутренней структуры адронов. В 1964 г. М. Гелл-Манн и Дж. Цвейг высказали гипотезу о существовании трёх фундаментальных частиц, из которых построены адроны. Цвейг предложил назвать их «тузами», но это название не прижилось в физике. А Гелл-Манн назвал их кварками. Происхождение термина «кварк» – не физическое, а литературное. Гелл-Манн заимствовал его из романа писателя Дж. Джойса «Поминки по Финнегану». Герою этого романа снится сон, в котором мечущиеся над морем чайки кричат: «Три кварка для мистера Марка!». Вероятно, это загадочное слово «quark» и явилось подходящим названием для новых фундаментальных частиц).



*Мюррей Гелл-Манн*

Вместе с гипотезой кварков в физике проявились представления о дробных зарядах: дробные значения гиперзаряда, барионного заряда и электрического заряда (который кратен  $e/3$ , где  $e$  – элементарный заряд).

### 5.1. Задачи практического занятия 4

1. Определить минимальное число фундаментальных частиц со спином  $1/2$ , из которых можно построить нуклоны.
2. Определить барионный заряд  $B$  каждого из трёх фундаментальных фермионов, считая, что их барионные заряды одинаковы.
3. Сколько среди этих фундаментальных фермионов должно быть странных и сколько нестранных, чтобы из них можно было построить протон, нейтрон и  $\Lambda^0$ -гиперон ( $S = -1$ ).
4. Определить изотопический спин  $T$  и его третью проекцию  $T_3$  для двух нестранных ( $u, d$ ) и одного странного кварка ( $s$ ).
5. Используя соотношение Гелл-Манна – Нишиджимы, определить электрический заряд кварков трёх ароматов:  $u, d, s$ .
6. Определить гиперзаряд кварков  $u, d, s$ .
7. Определить кварковый состав протона.
8. Определить кварковый состав нейтрона.
9. Определить кварковую структуру  $\Lambda^0$ -гиперона.
10. Определить кварковый состав  $\Sigma^0$ -гиперона.
11. Определить, из каких фундаментальных фермионов можно построить мезоны ( $B = 0$ ).
12. Определить кварковую структуру  $K^+$ -мезона ( $Y = 1, B = 0$ ).
13. Определить кварковую структуру  $\pi^+$  и  $\pi^-$ -мезонов.
14. Определить кварковую структуру  $\pi^0$ -мезона, учитывая, что его волновая функция ортогональна к состоянию  $\eta^0$ -мезона:

$$\langle \pi^0 | \eta^0 \rangle = 0, \quad |\eta^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{6}}(u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}).$$

### 5.2. Задания для самостоятельной работы

1. Построить таблицу характеристик трёх кварков:

Таблица 13 – Характеристики кварков  $u, d, s$

Кварк	Символ	$Q$	$B$	$J$	$\lambda_p$	$T$	$T_3$	$S$	$Y$
Верхний (up)	$u$								
Нижний (down)	$d$								
Странный (strange)	$s$								

2. Построить аналогичную таблицу характеристик трёх антикварков ( $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ ), учитывая, что при переходе от частиц к античастицам меняются знаки электрического заряда  $Q$ , барионного заряда  $B$ , третьей проекции изотопического спина  $T_3$ , странности  $S$ , гиперзаряда  $Y$ .

3. Построить весовую диаграмму для кварков  $u, d, s$  в координатах  $(T_3, Y)$ .

4. Построить весовую диаграмму для трёх соответствующих антикварков.

5. Показать, что члены октета барионов со спином  $1/2$  имеют следующий кварковый состав:

Таблица 14 – Кварковый состав октета барионов со спином  $1/2$

Частица	$p$	$n$	$\Lambda^0$	$\Sigma^+$	$\Sigma^0$	$\Sigma^-$	$\Xi^-$	$\Xi^0$
Кварковый состав	$uud$	$udd$	$uds$	$uus$	$uds$	$dds$	$dss$	$uss$

Необходимые значения странности частиц возьмите из вашей таблицы домашнего задания 3.

6. Согласно мезонной теории ядерных сил (Х. Юкава, 1935 г.) ядерное взаимодействие обусловлено обменом нуклонов виртуальными пионами.

Возможны 4 типа обмена:

$$p \leftrightarrow p + \pi^0, \quad (5.1)$$

$$n \leftrightarrow n + \pi^0, \quad (5.2)$$

$$p \leftrightarrow n + \pi^+, \quad (5.3)$$

$$n \leftrightarrow p + \pi^-. \quad (5.4)$$

В процессах (5.1) и (5.2) зарядовое состояние нуклона не меняется, в процессах (5.3) и (5.4) протон переходит в нейтронное состояние и обратно. Под наблюдаемым нуклоном понимается некий затравочный нуклон, окружённый пионным облаком. Образно говоря, «голый нуклон одевается в пионную шубу». Дать объяснение кварковых диаграмм (рис. 4), иллюстрирующих две возможности реализации процесса (5.1).

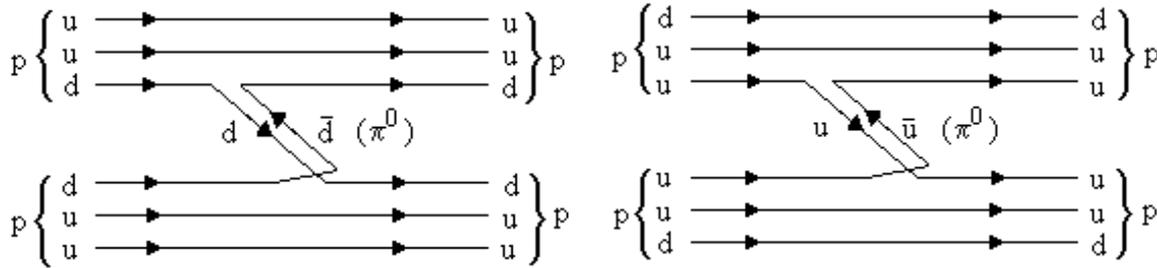


Рис. 4. Обмен протонов виртуальным  $\pi^0$ -мезоном

7. Дать объяснение кварковых диаграмм (рис. 5), иллюстрирующих две возможности реализации процесса (5.2).

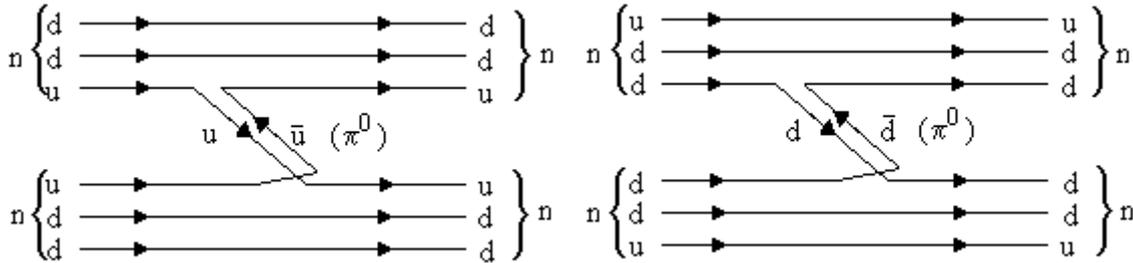


Рис. 5. Обмен нейтронов виртуальным  $\pi^0$ -мезоном

8. Построить и объяснить кварковые диаграммы, иллюстрирующие взаимопревращения протона и нейтрона (5.3) и (5.4).

9. Исходя из законов сохранения электрического заряда  $Q$ , барионного заряда  $B$ , странности  $S$  и проекции изоспина  $T_3$ , определить частицы  $X$ , образующиеся в реакциях сильного взаимодействия:

$$\pi^- + p \rightarrow K^- + p + X, \quad (5.5)$$

$$p + \tilde{p} \rightarrow \Xi^- + \pi^+ + X. \quad (5.6)$$

10. Установить, какие каналы распада запрещены и по какой причине:

$$1) \Xi^- \rightarrow p + 2\pi^-; \quad 2) \Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-; \quad 3) \Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-.$$

### *Рекомендуемая литература*

1. Бояркин, О.М. Введение в физику элементарных частиц / О.М. Бояркин. – Москва: КомКнига, 2010. – 264 с. – ISBN 978-5-484-01085-1.
2. Михайлов, М.А. Ядерная физика и физика элементарных частиц. Часть 2. Элементарные частицы: учебное пособие / М.А. Михайлов. – Москва: Прометей, 2013. – 28 с. – ISBN: 978-5-7042-2471-6. – Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/58212.html>.
3. Наумов, А.И. Физика атомного ядра и элементарных частиц / А.И. Наумов. – Москва: Просвещение, 1984. – 384 с.
4. Рудницкая, Т.Г. Элементарные частицы и фундаментальные взаимодействия / Т.Г. Рудницкая, Ю.А. Изюмов. – Екатеринбург: УРО РАН, 2010. – 348 с. – ISBN 978-5-7691-9.

## **6. ЦВЕТ КВАРКОВ И ГЛЮОНЫ**

На данном занятии рассматривается вопрос о необходимости введения дополнительной характеристики кварков. Для объяснения спинов наблюдаемых адронов необходимо принять, что кварки имеют полуцелый спин, равный  $1/2$ . Следовательно, они подчиняются статистике Ферми-Дирака (являются фермионами) и принципу Паули. В ряде случаев оказалось, что при построении барионов одинаковые кварки находятся в одном и том же состоянии, что противоречит принципу Паули. Это противоречие можно было разрешить двумя способами:

1. Допустить, что кварки являются не фермионами, а подчиняются промежуточной квантовой статистике.

2. Ввести дополнительное квантовое число, позволяющее сделать различными одинаковые кварки.

Развитие кварковой модели пошло по второму пути: было введено дополнительное квантовое число, получившее образное название «цвет», которое может

принимать три значения. Таким образом, каждый кварк характеризуется своим ароматом и цветом. Соответственно, антикварк имеет антиаромат и антицвет.

Взаимодействие между кварками в адронах носит обменный характер: оно происходит путём обмена глюонами – квантами возбуждения сильного поля. Эти частицы, образно говоря, как бы «склеивают» кварки и антикварки в адронах. Само название «глюон» происходит от английского слова «glue», означающего «клей». Таким образом, взаимодействие двух кварков происходит следующим образом: один кварк испускает глюон, а другой его поглощает.

Как и фотоны (кванты возбуждения электромагнитного поля), глюоны имеют спин, равный 1 и отрицательную чётность. Частицы со спином, равным единице, и отрицательной чётностью ( $J^{λp} = -1$ ) называются векторными. При вращениях и отражениях координат их волновые функции преобразуются как обычные пространственные векторы. Поэтому глюон, как и фотон, относится к фундаментальным векторным бозонам. Так же, как и фотон, глюоны безмассовы.

И кварки, и глюоны несут цветовой заряд. Он называется «зарядом» по аналогии с электрическим зарядом и не имеет никакого отношения к обычным оптическим цветам. Цветовой заряд, подобно электрическому заряду, сохраняется.

Теория взаимодействия фотонов с электронами называется квантовой электродинамикой (КЭД). На языке квантовой теории поля КЭД – это теория взаимодействия электронно-позитронного и электромагнитного полей. По аналогии теория взаимодействия глюонов с кварками получила название квантовой хромодинамики (КХД, от греческого слова «хромос» – цвет).

### 6.1. Задачи практического занятия 5

1. Определить кварковый состав  $\Delta^{++}$ -резонанса, принадлежащего декуплету барионных резонансов со спином  $3/2$  ( $B = 1$ ).

2. Определить кварковый состав  $\Delta^-$ -резонанса, принадлежащего к этому же изотопическому мультиплету.

3. Определить кварковый состав  $\Omega^-$ -гиперона, входящего в состав барионного декуплета.

4. Установить, согласуется ли с принципом Паули кварковая структура барионных резонансов, рассмотренных в задачах 1–3.

5. С целью устранения противоречия с принципом Паули Н.Н. Боголюбов, Б.В. Струминский, А.Н. Тавхелидзе, а также независимо Ё. Намбу и М.И. Хан в 1965 г. высказали гипотезу о том, что у кварков имеется дополнительная степень свободы, получившая название «цветовой заряд» (или «цвет»). Каждый кварк может находиться в одном из трёх «цветовых» состояний: R (*red* – красный), G (*green* – зелёный), B (*blue* – голубой). Т.е. состояние кварка данного аромата утраивается.

Устраняется ли при этом противоречие с принципом Паули?

6. Новая характеристика, «цвет», легла в основу современной теории сильно-взаимодействующих элементарных частиц. Сформулировать правило построения барионов и мезонов из кварков с учётом дополнительного квантового числа «цвет», учитывая, что каждый барион и мезон должен быть «бесцветным».

7. Определить, сколько возможно переходов между кварками трёх цветов. Составить матрицу  $3 \times 3$ , элементы которой обозначают глюоны (g).

Таблица 15

уничтожение $\Rightarrow$ рождение $\Downarrow$	$q_k$	$q_z$	$q_r$
$q_k$			
$q_z$			
$q_e$			

8. Установить, сколько среди этих переходов цветоактивных и цветопассивных.

9. В квантовой хромодинамике (КХД) предполагается, что цвет кварка является источником сильного взаимодействия (подобно тому, как в электродинамике электрический заряд является источником электромагнитного взаимодействия), а квантами сильного (глюонного) поля (аналога электромагнитного поля) являются

глюоны (вместо фотонов). Определить число глюонов, необходимое для цветового взаимодействия кварков, и их структуру.

10. Учитывая закон сохранения цвета, показать, что кварк, испустив глюон, не может превратиться в антикварк. Принять для определённости, что кварк имеет красный цвет. Диаграмма предполагаемого процесса показана на рис. 6.

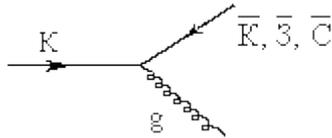


Рис. 6. Испускание глюона кварком

Подсказка: цветовую структуру глюона  $g$  можно получить из следующих равенств:

$$K = \tilde{K} + g,$$

$$K = \tilde{Z} + g,$$

$$K = \tilde{I} + g.$$

11. Имеется существенное отличие фотонов (квантов электромагнитного поля) от глюонов (квантов глюонного поля). Согласно КЭД фотон электрически нейтрален и поэтому не может испускать фотоны («светящийся свет» невозможен), а согласно КХД глюон несёт цветовой заряд, и поэтому имеется возможность самопроизвольного испускания глюоном глюона (рис. 7). Как на этой основе можно объяснить конфайнмент кварков (невыветание кварков из адронов, их «пленение» в адронном мешке)?

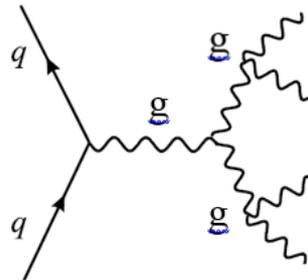


Рис. 7. Испускание глюонов глюонами

12. Проанализировать потенциал взаимодействия кварков

$$U(R) = -\frac{a}{R} + bR, \quad a > 0, b > 0, \quad (6.1)$$

показанный на рис. 8, с учётом особенностей их поведения: асимптотической свободы на малых расстояниях и конфайнмента – на больших.

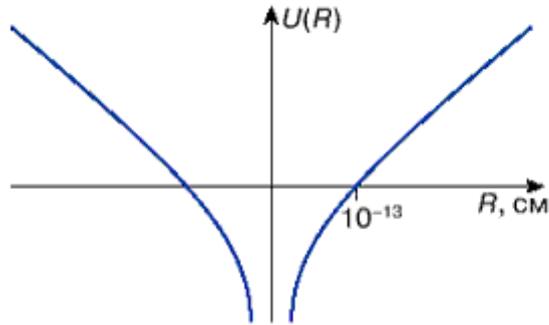


Рис. 8. Потенциальная энергия взаимодействия кварков в адроне

Вследствие конфайнмента свободные кварки существовать не могут. Может быть, кварки – это лишь удачная интерпретация наблюдаемых явлений, а на самом деле их нет? Каковы экспериментальные доказательства существования кварков? Ответ на этот вопрос содержится в следующих двух задачах.

13. На рисунке 9 приведены диаграммы процессов, наблюдаемых на электронно-позитронных коллайдерах.

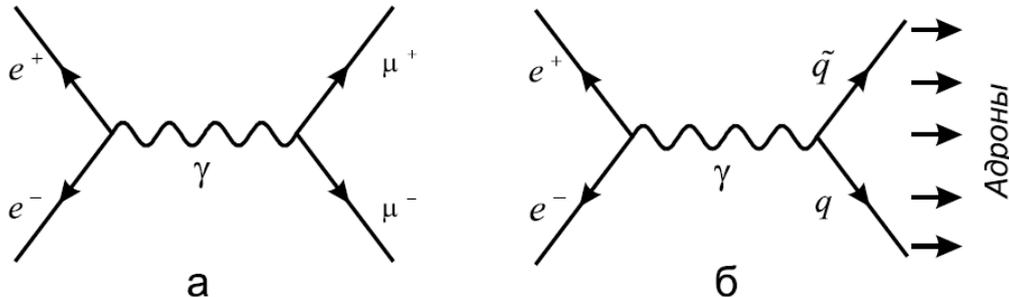


Рис. 9. Процессы, происходящие при столкновении электронов и позитронов

Сечение процесса образования адронов на встречных пучках определяется вероятностью рождения пары кварк–антикварк при столкновениях электронов и позитронов. Если кварки рассматривать как точечные частицы, то вероятность образования кварк-антикварковой пары виртуальным фотоном можно описывать теми же формулами, что и образование пар других точечных заряженных частиц со спином  $1/2$  например, образование пары мюонов ( $\mu^+\mu^-$ ). Сечение каждого из этих процессов пропорционально сумме квадратов электрических зарядов получающихся частиц. Поэтому отношение сечений процессов 9б и 9а должно быть равно отношению квадратов электрических зарядов кварка и мюона:

$$R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{адроны})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = \sum_q Q_q^2, \quad (6.2)$$

где  $Q_q$  – электрический заряд кварка в единицах абсолютного заряда электрона.

Суммирование проводится по всем ароматам кварков. Вычислить  $R$  по формуле (6.2), полагая что при низких энергиях могут рождаться только кварки  $u, d, s$ , для двух случаев:

- а) с учётом трёх цветовых степеней свободы;
- б) в модели бесцветных кварков.

Сравнить полученные теоретические результаты с экспериментом в области энергий до 3 ГэВ:  $R = 2$ . Сформулировать выводы.

14. Дать интерпретацию двух адронных струй, наблюдаемых в электрон-позитронной аннигиляции (рис. 10).

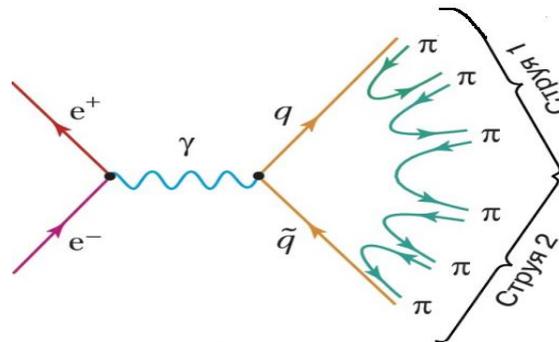


Рис. 10. Образование двух адронных струй при столкновении электрона и позитрона

15. Используя концепцию цветовых полей и формулу Эйнштейна о связи между массой и энергией

$$m = \frac{E}{c^2}, \quad (6.3)$$

объяснить механизм формирования массы адронов. Например, как можно объяснить тот факт, что масса протона значительно превосходит суммарную массу входящих в него кварков ( $m_u \cong 5 \text{ МэВ}$ ,  $m_d \cong 7 \text{ МэВ}$ ,  $m_p \cong 938 \text{ МэВ}$ )?

*Подсказка:* учесть взаимодействие валентных и морских кварков.

## 6.2. Задания для самостоятельной работы

1. Показать, что частицы, входящие в состав октета мезонов со спином 0, имеют следующий кварковый состав:

Частица	$\pi^+$	$\pi^0$	$\pi^-$	$K^+$	$K^0$	$K^-$	$\tilde{K}^0$	$\eta^0$
S	0	0	0	1	1	-1	-1	0
Состав	$u\tilde{d}$	$\frac{u\tilde{u} - d\tilde{d}}{\sqrt{2}}$	$d\tilde{u}$	$u\tilde{s}$	$d\tilde{s}$	$s\tilde{u}$	$s\tilde{d}$	$\frac{u\tilde{u} + d\tilde{d} - 2s\tilde{s}}{\sqrt{6}}$

2. Определить кварковый состав  $\Delta^+$  и  $\Delta^0$ -резонансов.

3. Определить кварковый состав  $\Sigma^{*+}$ ,  $\Sigma^{*0}$  и  $\Sigma^{*-}$ -резонансов.

4. Определить кварковый состав  $\Xi^{*0}$  и  $\Xi^{*-}$ -резонансов.

5. Расположите 10 членов барионного декуплета со спином 3/2 на диаграмме (Y, Q) с указанием их кваркового состава в порядке возрастания масс изомультиплетов. По оси абсцисс отложить электрический заряд частиц Q: от -1 до +2, по оси ординат – гиперзаряд Y: от +1(нижнее значение) до -2 (верхняя точка на графике). Получится 4 строки: по одной для каждого изомультиплета. Установите, чем обусловлена разность масс частиц в соседних строках этого унитарного мультиплета. Принять следующие массы кварков u, d, s: 5 МэВ, 10 МэВ и 150 МэВ соответственно.

6. Глюоны сами несут цветовой заряд и поэтому могут взаимодействовать друг с другом. Нарисовать диаграмму распада глюона на два (или слияния двух глюонов в один).

7. Нарисовать диаграмму рассеяния глюонов друг на друге.

8. Нарисовать диаграмму Фейнмана для процесса рассеяния кварков  $u$  и  $d$  друг на друге в результате обмена глюоном  $g_1 = g_{кз}$ : красный  $u$ -кварк превращается в зелёный  $u$ -кварк, испуская глюон, который затем поглощается зелёным  $d$ -кварком, превращающимся в красный  $d$ -кварк.

9. Что такое конфайнмент и асимптотическая свобода в теории сильных взаимодействий?

10. Дать объяснение процесса образования адронных струй при столкновении протона и электрона (рис. 11).

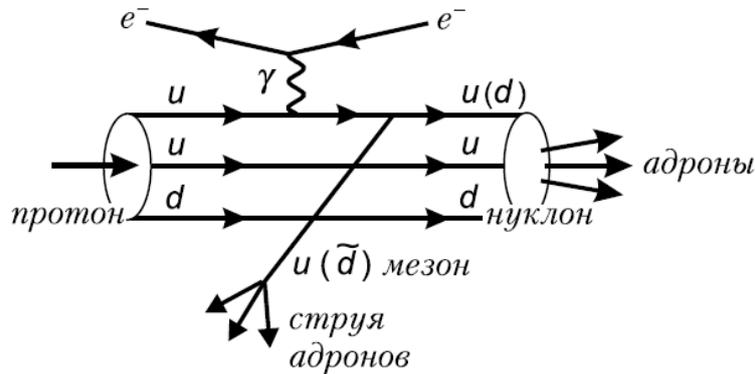


Рис. 11. Образование адронных струй при столкновении протона и электрона

### Рекомендуемая литература

1. Ахиезер, А.И. Элементарные частицы / А.И. Ахиезер, М.П. Рекало. – Москва: Наука, 1986. – 256 с.
2. Наумов, А.И. Физика атомного ядра и элементарных частиц / А.И. Наумов. – Москва: Просвещение, 1984. – 384 с.
3. Окунь, Л.Б.  $\alpha \beta \gamma \dots Z$ . Элементарное введение в физику элементарных частиц. Библиотечка «Квант». Вып. 45 / Л.Б. Окунь. – Москва: Наука, 1985. – 112 с.
4. Рудницкая, Т.Г. Элементарные частицы и фундаментальные взаимодействия / Т.Г. Рудницкая, Ю.А. Изюмов. – Екатеринбург: УРО РАН, 2010. – 348 с.

## 7. КВАРКИ $c, b, t$

На протяжении 10 лет (1964–1974 гг.) кварковая структура адронов была связана с кварками трёх ароматов:  $u, d, s$ . При этом каждой комбинации кварков соответствовала вполне определённая, экспериментально наблюдаемая частица.

В 1974 г. произошло сенсационное открытие, в результате которого пришлось ввести четвёртый кварк. Затем были открыты кварки ещё двух ароматов. В результате число истинно элементарных частиц со спином  $1/2$  должно быть следующим: 6 кварков в трёх цветовых состояниях, 6 антикварков и 6 лептонов, т.е.  $48 = (6 \times 3 + 6) \times 2$ . Множитель 2 учитывает существование антикварков и антилептонов.

### 7.1. Задачи практического занятия 6

1. В ноябре 1974 г. был открыт  $J/\Psi$ -мезон ( $B = 0$ ) с массой 3,1 ГэВ, превышающей три массы протона ( $m_p = 938 \text{ МэВ}$ ). Его открыли независимо друг от друга две экспериментальные группы – Самюэла Тинга и Бартона Рихтера.

Группа С. Тинга на протонном ускорителе в Брукхейвенской национальной лаборатории исследовала процесс образования электронно-позитронных пар, возникающих при столкновении протонов с ядрами бериллия:

$$p + Be \rightarrow J \rightarrow e^- + e^+.$$

Обнаруженная новая массивная частица получила название  $J$ -частицы.

Группа Б. Рихтера, работавшая на электронно-позитронном коллайдере в Национальной ускорительной лаборатории SLAC (Стэнфорд), зарегистрировала рождение новой частицы в следующей реакции:

$$e^- + e^+ \rightarrow \Psi.$$

Группа Рихтера назвала эту частицу  $\Psi$ . Время жизни её оказалось порядка  $10^{-20} \text{ с}$ . В дальнейшем этот резонанс, открытый двумя независимыми методами, получил двойное название:  $J/\Psi$ -мезон.

Установить, можно ли построить этот мезон из трёх «стандартных» кварков  $u, d, s$ .

2. Невозможность построения  $J/\Psi$ -мезона из трёх «старых» кварков привела к формулировке гипотезы о существовании четвёртого,  $c$ -кварка. С ним связано новое квантовое число  $C$  – очарование (*charm*):

$$\begin{aligned} C &= +1, \text{ для очарованного кварка,} \\ C &= -1, \text{ для очарованного антикварка,} \\ C &= 0, \text{ для остальных кварков.} \end{aligned}$$

Оценить массу  $c$ -кварка, входящего в состав чармония ( $J/\Psi$ -частицы со скрытым очарованием).

3. Открытие четвертого кварка получило название «ноябрьской революции» 1974 г. Через два года, в 1976 г., Рихтер и Тинг получили Нобелевскую премию за открытие этого кварка. Обобщить формулу Гелл-Манна–Нишиджимы с учётом нового квантового числа – очарования.

4. В 1976 г. были открыты мезоны с явным очарованием, у которых масса примерно в два раза меньше массы  $J/\Psi$ -мезона. Их интерпретировали как системы, состоящие из одного «старого» кварка ( $u$ ,  $d$ ,  $s$ ) и одного очарованного кварка (или антикварка):

$D^0(c\bar{u})$	$D^+(c\bar{d})$	$F^+(c\bar{s})$
$\bar{D}^0(u\bar{c})$	$D^-(d\bar{c})$	$F^-(s\bar{c})$
$m = 1865 \text{ МэВ}$	$m = 1869 \text{ МэВ}$	$m = 2020 \text{ МэВ}$

Учитывая кварковый состав этих мезонов, определить электрический заряд кварка  $c$  и антикварка  $\bar{c}$ .

5. В 1977 г. был открыт ещё более тяжёлый нейтральный  $\Upsilon$ -мезон (ипсилон-мезон), имеющий массу 9,46 ГэВ (группа С. Херба, Фермилаб). Он получил название ботомоний. Его интерпретировали как связанную систему  $\Upsilon(b\bar{b})$ , где  $b$  – прелестный (или красивый) кварк с квантовым числом  $b = -1$  (прелесть, или красота).  $\Upsilon$ -мезон – это мезон со скрытой прелестью.

Определить массу, гиперзаряд и электрический заряд кварка  $b$ .

6. Идея кварк-лептонной симметрии приводит к выводу о существовании шестого – «правдивого» (или истинного)  $t$ -кварка (от английского слова *truth* – исти-

на), открытого экспериментально в 1994 г. Обобщить формулу Гелл-Манна–Нишиджимы с учётом трёх новых кварков и определить на её основе электрический заряд  $t$ -кварка.

7. Провести классификацию 6 кварков и 6 лептонов по поколениям, расположив их в порядке возрастания массы.

Таблица 16 – Три поколения кварков и лептонов

Поколения		I	II	III	Q
Кварки	верхние				
	нижние				
Лептоны	верхние				
	нижние				

Зачем нужны частицы первого поколения? Из заряженных частиц первого поколения построены атомы. Электронное нейтрино тоже играет важную роль: без него погасли бы Солнце и другие звёзды. А какова роль частиц двух других поколений? Шелдон Глэшоу (американский физик, лауреат Нобелевской премии по физике за 1979 год) написал: «Разумеется, вторая и третья группа не созданы природой лишь для развлечения физиков и умственных упражнений. Природа вполне могла бы обойтись первой группой, этого было бы достаточно, чтобы построить атомы и молекулы, и даже чтобы заставить светить звёзды».

8. Физики, работающие на Большом адронном коллайдере в Европейском Центре ядерных исследований (CERN), 14 июля 2015 г. сообщили об обнаружении пентакварков – субатомных частиц, существование которых ранее считалось недоказанным. Пентакварк – частица, состоящая из пяти кварков, – был впервые теоретически предсказан российскими учеными Д.И. Дьяконовым, М.В. Поляковым и В.Ю. Петровым (Петербургский институт ядерной физики) в 1997 году. Кварковый состав этих частиц:  $u, u, d, s, \bar{c}$ . Всего было открыто одновременно 2 представителя группы:  $P_c(4450)^+$  и  $P_c(4380)^+$ . Их массы составляют 4450 МэВ и 4380 МэВ соответственно. Определить электрический заряд пентакварка.

9. Заполнить сравнительную таблицу «Электромагнитное и сильное взаимодействия»:

Таблица 17 – Сравнение сильного и электромагнитного взаимодействий

	Квантовая электродинамика (КЭД)	Квантовая хромодинамика (КХД)
1. Источник взаимодействия		
2. Поле		
3. Переносчики		
4. Особенности заряда		
4. Энергия взаимодействия		
5. Примеры диаграмм Фейнмана		

### 7.2. Задания для самостоятельной работы

1. Заполните таблицу «Квантовые числа кварков», учитывая, что ароматы  $s$ ,  $c$ ,  $b$ ,  $t$  образуют изотопические синглеты ( $T = 0, T_3 = 0$ ).

Таблица 18 – Квантовые числа кварков

Кварк	$Q$	$B$	$J^{\lambda}$	$T$	$T_3$	$S$	$C$	$b$	$t$	$Y$
Верхний ( $u$ )										
Нижний ( $d$ )										
Странный ( $s$ )										
Очарованный ( $c$ )										
Красивый ( $b$ )										
Правдивый ( $t$ )										

2. Построить аналогичную таблицу квантовых чисел 6 соответствующих антикварков, учитывая, что при переходе к античастицам меняется знак  $Q, B, T_3, S, c, b, t, Y$ .

3. В таблице, содержащей 16 фундаментальных частиц (12 фермионов со спином  $1/2$  – в первых трёх столбцах, и 4 бозона – в последнем столбце), приведены их массы, времена жизни (либо энергетической ширины  $\Gamma$  в соответствии с «кредитом» Гейзенберга) и год их экспериментального открытия.

Таблица 19 – Массы элементарных частиц и год их открытия

$\nu_e$ ; < 10 эВ, 1956	$\nu_\mu$ ; < 170 КэВ, 1962	$\nu_\tau$ ; < 24 МэВ, 1975	$\gamma$ ; < $10^{-15}$ эВ, 1905
e; 0,51 МэВ, 1897	$\mu$ ; 105,7 МэВ, $2 \cdot 10^{-6}$ с, 1937	$\tau$ ; 1777 МэВ, $3 \cdot 10^{-13}$ с, 1975	g; 0 1973
u; 5 МэВ, 1964	c; 1300 МэВ, $10^{-12}$ с, 1974	t; 176 ГэВ, $\Gamma = 2$ ГэВ, 1996	Z; 91,2 ГэВ, $\Gamma = 2,5$ ГэВ, 1983
d; 10 МэВ, 1964	s; 150 МэВ, 1964	b; 4,3 ГэВ, $10^{-12}$ с, 1977	W 80,4 ГэВ, $\Gamma = 2.1$ ГэВ, 1983

Ответьте на следующие вопросы:

а) почему нейтрон тяжелее протона, но легче  $\Lambda^0$ -гиперона?

б) почему самый тяжёлый из кварков ( $t$ -кварк) рождается и умирает свободным?

в) почему  $t$ -кварк был открыт экспериментально лишь через 32 года после создания кварковой модели (1964 г.)?

г) могут ли кварки  $c$  и  $b$  входить в состав  $\Sigma$ -гиперонов?

д) используя соотношение неопределённостей для энергии и времени, оцените время жизни промежуточных векторных бозонов  $W^\pm$  и  $Z^0$  (принять за  $\Delta E$  значения  $\Gamma$ ).

4. Оцените массу кварка (выраженную в ГэВ), который может появиться в результате реакции:

$$p + p \rightarrow p + p + q + \bar{q}.$$

Здесь  $q$  – кварк,  $\bar{q}$  – антикварк (их массы одинаковы). Энергия налетающего протона  $E = 76$  ГэВ (см., напр., учебник А.И. Наумова, с. 31).

5. Заполните таблицу «Очарованные барионы», в которой нет барионов с очарованием  $C = 1$  состоит из изотопического синглета  $C_0^+$  и триплета ( $C_1^{++}, C_1^+, C_1^0$ ) барионов, двух изотопических дублетов ( $S^+, S^0$ ) и изотопического синглета  $T^0$ .

Таблица 20 – Очарованные барионы

Барионы	Кварковый состав	T	T <sub>3</sub>	S	C
$C_1^{++}$	cuu				1
$C_1^+$	c(ud) <sub>s</sub>				1
$C_1^0$	cdd				1
$C_1^0$	c(ud) <sub>a</sub>				1
$S^+$	c(su) <sub>s</sub>				1
$S^0$	c(sd) <sub>s</sub>				1
$A^+$	c(su) <sub>a</sub>				1
$A^0$	c(sd) <sub>a</sub>				1
$T^0$	css				1

(Индексы  $a$  и  $s$  обозначают симметричную и антисимметричную волновую функцию кварковых пар).

6. Определить кварковый состав,  $T$  и  $T_3$  двух нестранных и одного странного барионов с очарованием  $C = 2$ :

Барионы	Кварковый состав	$T$	$T_3$	$S$	$C$
$X_u^{++}$				0	2
$X_d^+$				0	2
$X_s^+$				-1	2

7. Проиллюстрируйте с помощью диаграмм Фейнмана процессы (64.1) из учебника А.И. Наумова, обусловленные электромагнитным взаимодействием:

а)  $e^- + e^- \rightarrow e^- + e^-$  ;

б)  $\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$  ;

в)  $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$  ;

г)  $e^- + e^+ \rightarrow \mu^- + \mu^+$ .

8. Изобразите с помощью фейнмановских диаграмм распространение свободного электрона с испусканием и поглощением виртуального фотона (взаимодействие электрона со своим электромагнитным полем).

9. Нарисуйте фейнмановскую диаграмму, иллюстрирующую распространение фотона, который виртуально превращается в электронно-позитронную пару с последующей аннигиляцией снова в фотон.

10. Объединив две предыдущие диаграммы, представьте графически процесс «одевания» электрона в «шубу».

#### *Рекомендуемая литература*

1. Ахиезер, А.И. Элементарные частицы / А.И. Ахиезер, М.П. Рекало. – Москва: Наука, 1986. – 256 с.
2. Наумов, А.И. Физика атомного ядра и элементарных частиц / А.И. Наумов. – Москва: Просвещение, 1984 – 384 с.
3. Окунь, Л.Б..  $\alpha \beta \gamma \dots Z$ . Элементарное введение в физику элементарных частиц. Библиотечка «Квант». Вып. 45 / Л.Б. Окунь. – Москва: Наука, 1985. – 112 с.
4. Сафаров, Р.Х. Физика атомного ядра и элементарных частиц / Р.Х. Сафаров. – Казань: РИЦ «Школа», 2008. – 280 с.

## 8. ЭЛЕКТРОСЛАБОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

В теории электрослабого взаимодействия, которую построили в 1967 г. С. Вайнберг, Ш. Глэшоу и А. Салам (Нобелевская премия 1979 г.), предполагается, что наряду с электромагнитным полем ( $\gamma$ ) и полем глюонов ( $g$ ) существует также поле, передающее слабое взаимодействие, квантами которого являются **промежуточные векторные бозоны** (ПВБ):  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ . Эти частицы были экспериментально открыты в 1983 г. в ЦЕРНе при столкновении встречных протон-антипротонных пучков с энергиями  $E \sim 270$  ГэВ. Их массы  $\sim 100$  ГэВ ( $m_{W^\pm} = 80,4$  ГэВ,  $m_{Z^0} = 91,2$  ГэВ), спин  $J = 1$ .



*Абдус Салам*



*Шелдон Глэшоу*

*Стивен Вайнберг*

Лауреаты Нобелевской премии 1979 г.

В теории Вайнберга–Глэшоу–Салама электромагнитное и слабое взаимодействия вводятся на одинаковой основе и рассматриваются как частные проявления единого электрослабого взаимодействия. Объединение электромагнитного и слабого взаимодействий происходит при энергиях порядка 100 ГэВ. В объединённой теории имеет место обмен четырьмя частицами – безмассовыми фотонами (электромагнитное взаимодействие) и тремя тяжёлыми промежуточными векторными бозонами (слабое взаимодействие).

Постоянная тонкой структуры, характеризующая электромагнитное взаимодействие

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}.$$

Аналогично для слабого взаимодействия вводится постоянная

$$\alpha_W = \frac{g_W^2}{\hbar c} = \frac{1}{30},$$

где константа  $g_W$  играет такую же роль, как и электрический заряд в электродинамике.

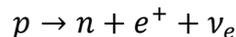
Отношение

$$\frac{\alpha}{\alpha_W} = \sin^2 \theta_W,$$

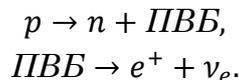
где  $\theta_W$  – угол Вайнберга. Экспериментально установлено, что  $\sin^2 \theta_W \cong 0,23$ , т.е.  $\theta_W \cong 30^\circ$ .

### 8.1. Задачи практического занятия 7

1. Построить кварковую диаграмму превращения протона в нейтрон ( $\beta^+$ -распад)



и определить тип ПВБ, участвующего в этом двухступенчатом процессе:



Проверить выполнимость закона сохранения электрического заряда на каждом этапе.

2. Построить кварковую диаграмму превращения нейтрона в протон ( $\beta^-$ -распад)

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$$

и определить тип ПВБ, участвующего в этом двухступенчатом процессе:

$$n \rightarrow p + \text{ПВБ},$$
$$\text{ПВБ} \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e.$$

Проверить выполнимость закона сохранения электрического заряда на каждом этапе.

3. Построить фейнмановскую диаграмму рассеяния мюонного нейтрино на электроне и установить тип ПВБ, участвующего в этом процессе.

4. Построить кварковую диаграмму распада  $\pi^-$ -мезона на электрон и электронное антинейтрино и установить тип ПВБ, участвующего в этом процессе.

5. Записать следующие реакции слабых процессов с учётом кваркового состава адронов:

а)  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu$ ;

б)  $n + \mu^+ \rightarrow p + \nu_\mu$ ;

в)  $\Lambda^0 \rightarrow p + \tilde{\nu}_e + e^-$ .

6. Учитывая результаты задач 1, 2, 4, 5, показать, что слабые взаимодействия представляют собой процессы превращения друг в друга пар лептонов и кварков.

7. В теории слабого взаимодействия имеют место два вида слабых токов: заряженные токи соответствуют изменению заряда на единицу, а нейтральные токи переводят частицы самих в себя. Экспериментальное открытие в 1973 г. слабых нейтральных токов, описывающих переходы без изменения электрического заряда элементарных частиц, явилось важным подтверждением справедливости идей, положенных в основу теории Вайнберга–Глэшоу–Салама. Определить, сколько возможно заряженных и нейтральных токов, а также сколько всего может быть взаимодействий с участием  $W^\pm$  и  $Z^0$ -бозонов (рисунки 12, 13).

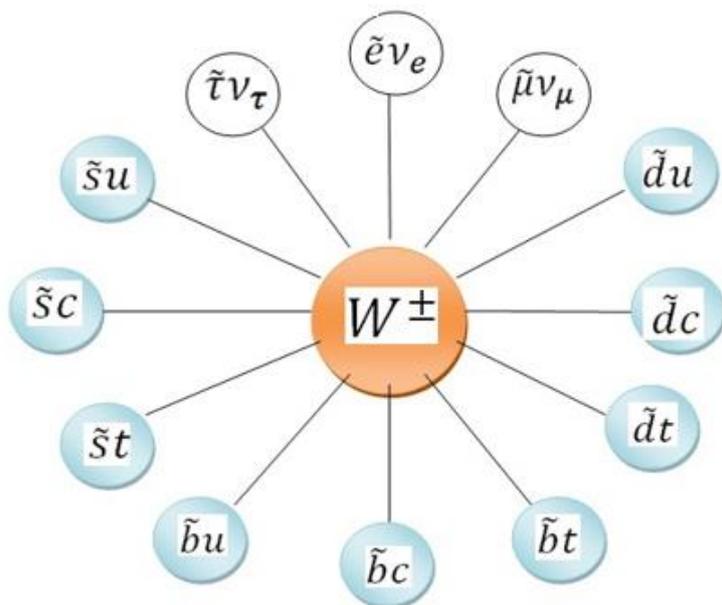


Рис. 12. Схема заряженных слабых токов лептонов и кварков

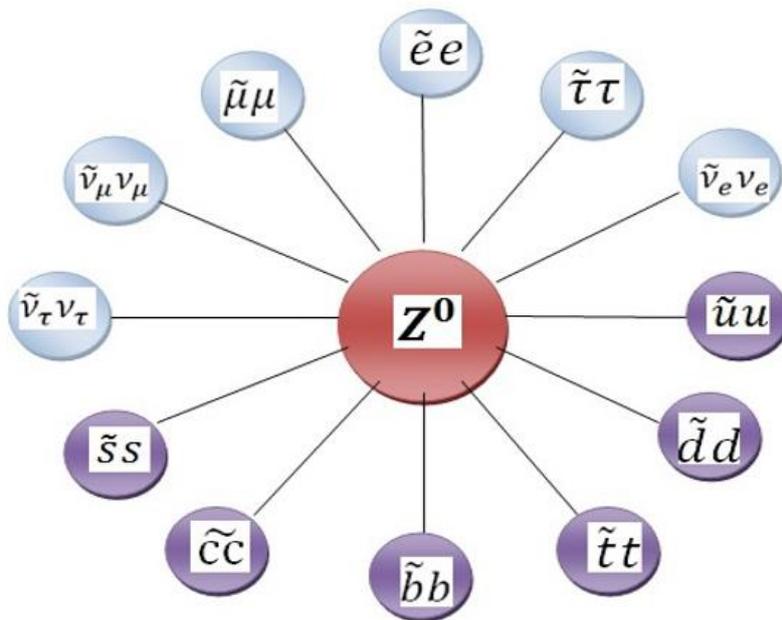


Рис. 13. Схема нейтральных слабых токов лептонов и кварков

8. Оценить радиус слабого взаимодействия, обусловленного обменом ПВБ, учитывая, что радиус взаимодействия и масса покоя переносчика связаны соотношением

$$r_{\text{вз.}} = \frac{\hbar}{m_0 c}.$$

9. Вычислить массу промежуточных векторных бозонов, учитывая, что

$$m_W = \left( \frac{\pi \alpha_W \hbar^3 c^3}{\sqrt{2} G_F} \right)^{1/2} \approx \frac{37,3}{\sin \theta_W} \text{ ГэВ}, \square \square$$

$$m_Z = \frac{m_W}{\cos \theta_W},$$

$G_F = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ ГэВ}^{-2} \hbar^3 c^3$  – константа Ферми.

10. В чём состоит проблема объединения электромагнитного и слабого взаимодействий?

Таблица 21 – Сравнение электромагнитного и слабого взаимодействий

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ	СЛАБОЕ
1) $r_{\text{вз}} \rightarrow \infty$	1) $r_{\text{вз}} \sim 10^{-16} \text{ см}$
2) $m_0 = 0$ (фотон)	2) $m_0 \cong 100 \text{ ГэВ}$ (ПВБ)
3) Имеет место зеркальная симметрия	3) Нарушение зеркальной симметрии ( $\square \mathcal{P}$ -инвариантности)
4) Симметрично относительно комбинированной инверсии $\mathcal{CP}$	4) Нарушение $\mathcal{CP}$ -инвариантности
5) Странность $S$ сохраняется	5) Несохранение странности

Объединение этих взаимодействий основывается на двух фундаментальных положениях:

1. Локальная калибровочная инвариантность (ЛКИ).

Калибровочная симметрия – это преобразование полей, не изменяющее вид уравнений движения. При этом параметры преобразований зависят от точки пространства-времени, в которой заданы эти поля. Например, фаза волновой функ-

ции зависит от координат. Во всех точках волновая функция преобразуется по одному и тому же закону.

Электромагнитное поле, поля Янга–Миллса и гравитационное поле – все эти поля являются калибровочными. Общая черта всех калибровочных полей – наличие безмассовых бозонов и дальнодействующий характер. Слабое поле тоже должно быть калибровочным. Но его симметрия скрыта её спонтанным нарушением.

## 2. Спонтанное нарушение симметрии (СНС).

У состояний с нарушенной симметрией более низкая энергия, т.е. устойчивость системы «оплачивается» нарушением симметрии. В 1964 г. Питер Хиггс предположил, что наряду с калибровочными векторными бозонами существует **скалярное поле** (поле Хиггса). Его кванты – скалярные бозоны (спин равен нулю). Первоначально ПВБ являются безмассовыми, но при слиянии их с хиггсами происходит СНС, в результате чего ПВБ обретают массу. По образному выражению Абдуса Салама, они «поедают» хиггса и прибавляют в весе.

А. Салам предложил следующую наглядную иллюстрацию СНС [2]. Представим себе званый обед, большой круглый стол, вокруг которого плотно уселись гости. И пёсика не забыли посадить за стол... Пока никто из гостей не взял салфетку, имеется право-левая симметрия: можно взять салфетку и справа, и слева. Но стоит одному гостю выбрать случайно салфетку, лежащую справа, так сразу симметрия спонтанно исчезает. Теперь остальные гости уже вынуждены брать только правую салфетку (см. рис. 14)!

Аналогичная ситуация возникает в примере буриданова осла (рис. 15).

Этот осёл стоит на одинаковых расстояниях от двух стогов сена, и картина выглядит симметрично. Но в момент, когда осёл «выбирает» один из стогов сена и делает шаг к нему, симметрия нарушается – возникает спонтанное нарушение симметрии.



**Спонтанное нарушение симметрии: пример Салама.**

Рис. 14. Наглядная иллюстрация спонтанного нарушения симметрии

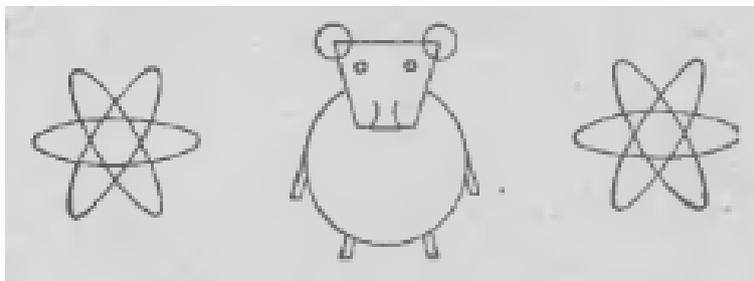


Рис. 15. Буриданов осёл

Другие СНС представлены на рисунке 16: потенциал в форме шляпы Незнайки и двухъямный потенциал (система может самостоятельно перейти в любую из потенциальных ям).

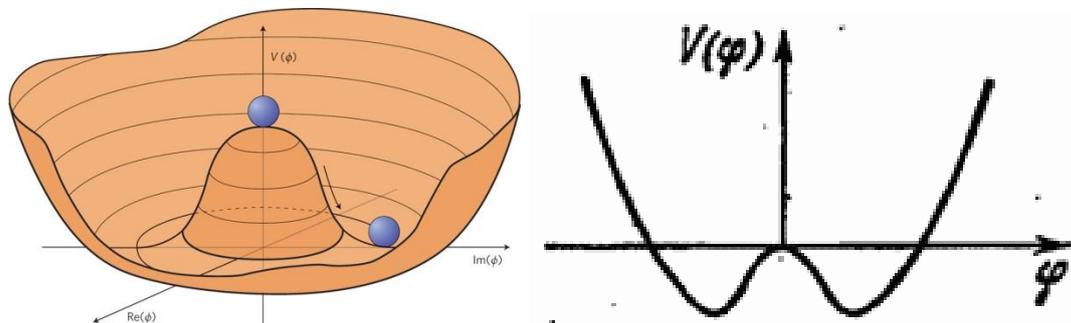


Рис. 16. Возможные проявления спонтанного нарушения симметрии

Важным примером спонтанного нарушения симметрии является ферромагнетик. Выше точки Кюри ферромагнетик находится в парамагнитном состоянии, в котором не существует выделенного направления намагниченности (рис. 17а). При охлаждении ниже температуры Кюри в ферромагнетике происходит фазовый переход и возникает спонтанная намагниченность, направление которой при отсутствии внешнего магнитного поля является случайным (рис. 17б).

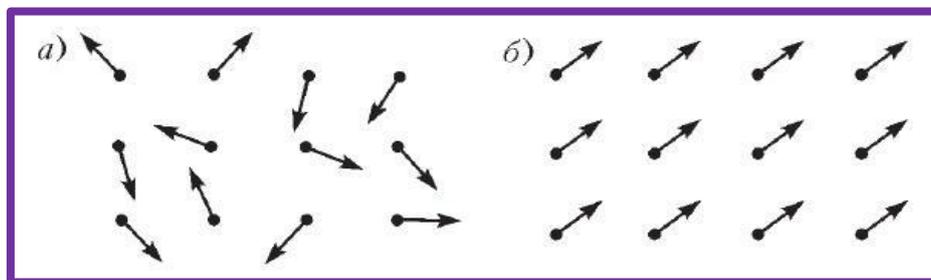
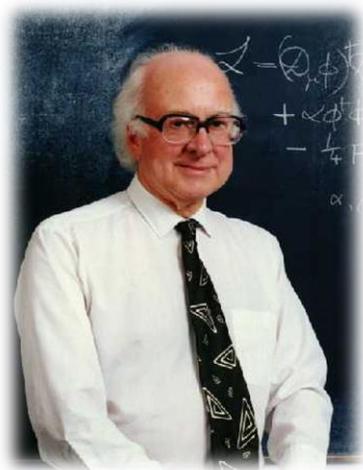


Рис. 17. Спонтанное нарушение симметрии в ферромагнетике



**Peter Ware Higgs** – британский физик-теоретик, профессор Эдинбургского университета, лауреат Нобелевской премии по физике за 2013 год совместно с Франсуа Энглером за предсказание бозона Хиггса.

*Питер Хиггс*

## 8.2. Задания для самостоятельной работы

1. В каких из приведённых ниже реакциях испускается нейтрино, а в каких антинейтрино:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \dots$$

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \dots$$

$$K^- \rightarrow \mu^- + \dots$$

2. Установите, какая из следующих двух диаграмм, описывающих распад  $\Lambda \rightarrow n + \pi^0$ , является неправильной.

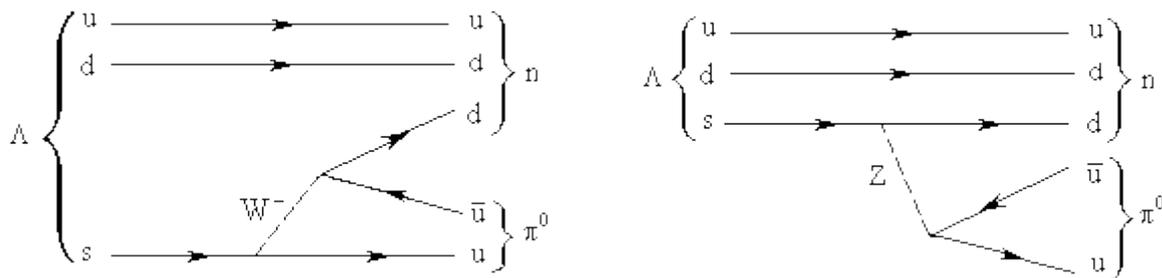


Рис. 18. Возможные схемы распада  $\Lambda^0$ -гиперона

3. Определить тип ПВБ, участвующих в следующих процессах (рис. 19):

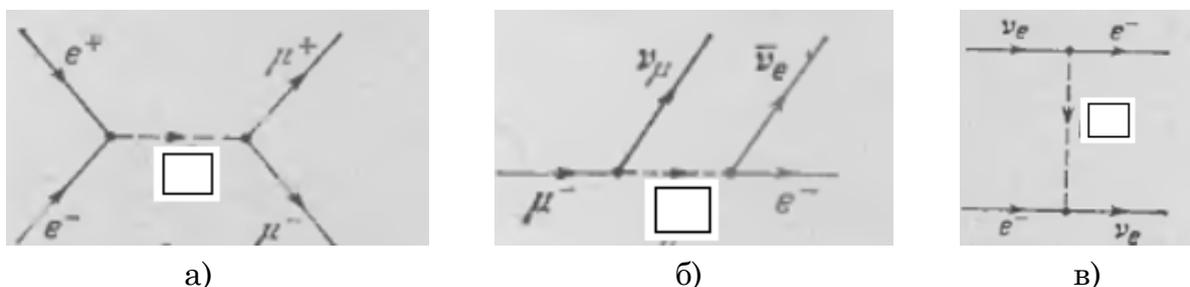


Рис. 19. Диаграммы, определяющие обмен промежуточными векторными бозонами:  
 а) распад мюона, б) аннигиляция электронно-позитронной пары в мюонную пару,  
 в) рассеяние мюонного нейтрино на электроне

4. В процессах слабого взаимодействия, происходящих при столкновении нейтрона с электронным нейтрино, эти частицы превращаются в протон и электрон. Нарисуйте фейнмановскую диаграмму этого процесса и определите тип промежуточного векторного бозона, участвующего в данном превращении.

5. На рисунке 20 представлено распределение по энергиям электронов, вылетающих при  $\beta$ -распаде.

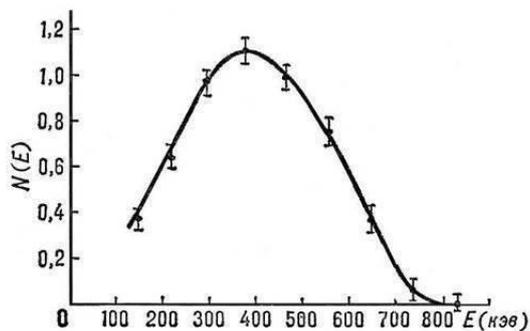


Рис. 20. Энергетический спектр  $\beta$ -распада

Здесь  $E_0$ -граничная энергия, являющаяся постоянной для данного распада величиной:

$$E_0 = E_{\text{материнск.}} - E_{\text{дочерн.}} - m_0 c^2.$$

С другой стороны,

$$E_0 = E_{\text{кинетич.,}e} + E_{\bar{\nu}}$$

Тогда спектр энергий антинейтрино можно получить вычитанием спектра энергий электронов из постоянной величины  $E_0$ . Как же выглядит спектр антинейтрино?

6. Тепловая мощность солнечного излучения составляет  $W = 3.9 \cdot 10^{26}$  Вт. Она обеспечивается выделением энергии в термоядерных реакциях. В каждом цикле четыре протона превращаются в ядро гелия-4, вылетают два нейтрино и в виде тепла выделяется энергия  $Q \approx 20$  МэВ. Оцените поток нейтрино, падающий на  $1 \text{ см}^2$  земной поверхности (нейтрино/  $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ ). Расстояние между Солнцем и Землёй  $R = 149 \cdot 10^6$  км.

7. По сообщениям Европейского Центра ядерных исследований (ЦЕРН, Швейцария), частица, зарегистрированная на Большом Адронном коллайдере LHC (*Large Hadron Collider* – ускорителе на встречных пучках) 4 июля 2012 года с массой около  $125\text{--}126 \text{ ГэВ}/c^2$ , может рассматриваться как бозон Хиггса. Так называется квант скалярного поля Хиггса, предсказанного в рамках Стандартной модели физики элементарных частиц английским теоретиком Хиггсом в 1964 г. Этот бозон, появляющийся вследствие хиггсовского механизма спонтанного нарушения электрослабой симметрии, ответствен за инертную массу элементарных частиц. В экспериментах использовались встречные пучки протонов с энергией в каждом порядке  $7 \text{ ТэВ}$ , т.е. полная энергия в системе центра масс сталкивающихся нуклонов порядка  $14 \text{ ТэВ}$ . Оцените:

а) какой выигрыш в энергии получается в этом суперколлайдере по сравнению с ускорителем с неподвижной мишенью (см. напр., учебник А.И. Наумова, с. 66–67);

б) во сколько раз масса хиггса превосходит массу ранее открытых экспериментально в ЦЕРНе  $W$  и  $Z$  бозонов.

8. Определите, на какое расстояние могут сблизиться протоны с энергией  $E_c \square \square = 14 \text{ ТэВ}$ , если энергии  $E_c$  соответствует длина  $\ell_c = \hbar c / E_c$  (проверьте размерность!).

9. Протон в космических лучах с энергией  $3 \cdot 10^{20} \text{ эВ} = 3 \cdot 10^8 \text{ ТэВ}$ , сталкивающийся с покоящимся нуклоном, в системе центра масс имеет энергию около 400 ТэВ. Какая длина  $\ell_c$  соответствует этой энергии? Оцените, во сколько раз природная «лаборатория» из космических лучей сверхвысоких энергий превосходит достижения самого мощного ускорителя (по энергии  $E_c$  и по длине  $\ell_c$ ), и объясните, почему космические лучи ещё долго будут представлять интерес для физики высоких энергий.

10. В модели ядерных оболочек попытайтесь предсказать структуру 7-й нейтронной оболочки для ядра с числом нейтронов 184 и объясните возможность существования «острова стабильности» вокруг ядер  ${}_{114}^{298}\text{X}$  и  ${}_{126}^{310}\text{Y}$  (ядро с числом протонов 114 уже открыто, соответствующий химический элемент имеет официальное название «флёровий»). Синтез этого элемента демонстрирует триумф теории, предсказавшей существование «острова стабильности»).

### *Рекомендуемая литература*

1. Ахиезер, А.И. Элементарные частицы / А.И. Ахиезер, М.П. Рекало. – Москва: Наука, 1986. – 256 с.
2. Намбу, Ё. Кварки / Ё. Намбу. – Москва: Мир, 1984. – 224 с.
3. Наумов, А.И. Физика атомного ядра и элементарных частиц / А.И. Наумов. – Москва: Просвещение, 1984. – 384 с.
4. Окунь, Л.Б.  $\alpha \beta \gamma \dots Z$ . Элементарное введение в физику элементарных частиц. Библиотечка «Квант». Вып. 45 / Л.Б. Окунь. – Москва: Наука, 1985. – 112 с.

## 9. ВЕЛИКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ. СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ

Теория великого объединения (ТВО, или *Grand Unification*), построенная в 1974 г. Г. Джорджи и Ш. Глэшоу, объединяет сильное (*strong* – *S*), электромагнитное (*E*) и слабое (*weak* – *W*) взаимодействия.

**S:** описывается квантовой хромодинамикой (КХД), в основу которой положен фундаментальный триплет кварков (u, d, s). Суммарный заряд

$$\sum Q = Q_u + Q_d + Q_s = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0. \quad (9.1)$$

Переносчики взаимодействия – 8 глюонов, группа симметрии SU(3).

**W:** происходит с участием дублетов лептонов ( $e, \nu_e$ ) и кварков. Переносчики взаимодействия: 3 промежуточных векторных бозона ( $W^\pm$  и  $Z^0$ ), группа симметрии SU(2).

**E:** переносчик – один фотон, группа симметрии U(1).

Предполагается, что объединение этих трёх взаимодействий происходит при энергиях порядка  $10^{14}$  ГэВ (рис. 21).

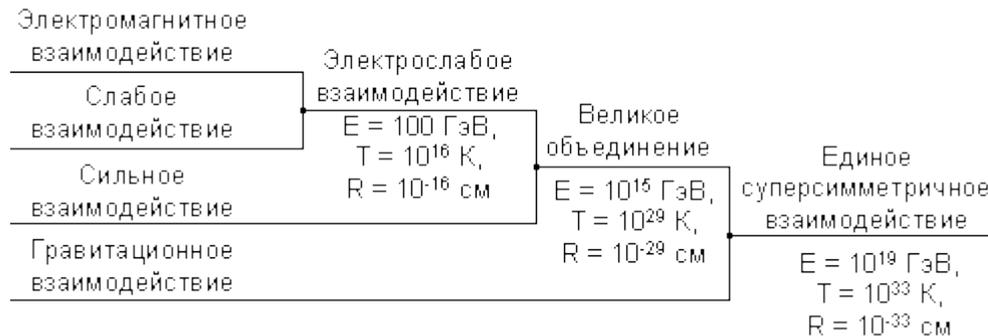


Рис. 21. Схема объединения фундаментальных взаимодействий

ТВО, или Стандартная модель (СМ), включает в себя: 6 кварков, 6 лептонов, 4 частицы-переносчика силовых взаимодействий, а также бозон Хиггса. С учётом античастиц и 8 глюонов, СМ описывает 61 частицу (рис. 22).

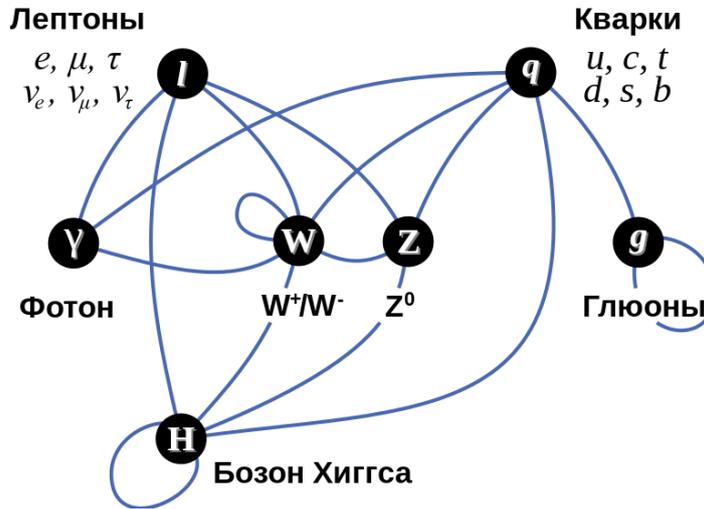


Рис. 22. Взаимодействие между частицами в Стандартной модели

### 9.1. Задачи практического занятия 8

1. ТВО разрешает переходы между пятью членами квинтета фундаментальных фермионов, содержащего три антикварка ( $\tilde{d}_r, \tilde{d}_s, \tilde{d}_t$ ) и два лептона ( $e, \nu_e$ ). Группа симметрии  $SU(5)$ . Суммарный заряд

$$\sum Q = 3Q_{\tilde{d}} + Q_e + Q_{\nu_e} = 1 - 1 + 0 = 0. \quad (9.2).$$

Определить число векторных полей, осуществляющих такие переходы.

2. Определить цвета и электрические заряды переносчиков объединённого взаимодействия, образующих 24-плет калибровочных бозонов (таблица 22). Половина из них ещё экспериментально не открыта, но теоретически предсказать их вполне возможно. Это сверхтяжёлые частицы,  $X$ - и  $Y$ -бозоны с массами порядка  $(10^{14} - 10^{15})$  ГэВ.

Таблица 22 – Великое объединение фундаментальных взаимодействий

Уничтожение → Рождение ↓	$\tilde{d}_k$	$\tilde{d}_3$	$\tilde{d}_\Gamma$	$e^-$	$\nu_e$
$\tilde{d}_k$	$g_7 + g_8 + \gamma + Z^0$	$g_{k\tilde{z}}$	$g_{k\tilde{z}}$		
$\tilde{d}_3$	$g_{z\tilde{k}}$	$g_7 + g_8 + \gamma + Z^0$	$g_{z\tilde{z}}$		
$\tilde{d}_2$	$g_{z\tilde{k}}$	$g_{z\tilde{z}}$	$g_7 + g_8 + \gamma + Z^0$		
$e^-$					
$\nu_e$					

3. Установить, разрешает ли закон сохранения электрического заряда следующие переходы:

$$u + u \rightarrow X_{4/3}, \quad X_{4/3} \rightarrow e^+ + \tilde{d}. \quad (9.3)$$

4. Согласно задаче 3 возможен следующий процесс:

$$u + u \rightarrow X_{4/3} \rightarrow e^+ + \tilde{d}. \quad (9.4)$$

Определить, сохраняется ли при этом барионный заряд.

5. Показать, что результат задачи 4 приводит к возможности распада протона по схеме

$$p \rightarrow e^+ + \pi^0. \quad (9.5)$$

6. Определить, разрешает ли закон сохранения электрического заряда следующие реакции:

$$u + d \rightarrow Y_{1/3}, \quad Y_{1/3} \rightarrow e^+ + \tilde{u}. \quad (9.6)$$

7. Согласно задаче 6 разрешена следующая реакция:

$$u + d \rightarrow Y_{1/3} \rightarrow e^+ + \tilde{u}. \quad (9.7)$$

Установить, сохраняется ли при этом барионный заряд.

8. Показать, что из задачи 7 снова вытекает нестабильность протона («светлое» будущее!).

9. ТВО предсказывает время жизни протона, определяемое формулой

$$\tau_p \approx \frac{1}{\alpha^2} \frac{M_x^4 \hbar}{m_p^5 c^2}, \quad (9.8)$$

где  $M_x^4 \approx 3 \cdot 10^{14} \text{ ГэВ}$ ,  $m_p \sim 1 \text{ ГэВ}$ ,  $\alpha_{GU} = 1/40 = 0,025$ . Оценить это время.

Экспериментальное обнаружение распада протона стало бы экспериментом века. Как заметил Л.Б. Окунь, «подобно камертону, он настроил бы всю физику высоких энергий на планковские частоты», т.е. на энергию  $E_p \sim 10^{19} \text{ ГэВ}$ , связанную с планковской длиной

$$\ell_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \sim 10^{-33} \text{ см.} \quad (9.9)$$

10. Установить, разрешает ли закон сохранения электрического заряда следующий процесс

$$Y_{1/3} \rightarrow \tilde{\nu}_e + \tilde{d}. \quad (9.10)$$

11. Согласно задачам 6 и 10 возможны следующие превращения:

$$u + d \rightarrow Y_{1/3} \rightarrow \tilde{\nu}_e + \tilde{d}. \quad (9.11)$$

Установить, сохраняется ли при этом барионный заряд.

12. Показать, что результат задачи 11 приводит к возможности распада нейтрона (т.е. к его нестабильности) по схеме

$$n \rightarrow \pi^0 + \tilde{\nu}_e. \quad (9.12)$$

### ***Отметим основные предсказания ТВО.***

1. Слияние констант связи всех фундаментальных взаимодействий в области энергий  $E_0 \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ ГэВ}$ . Из рисунка 23 видно, что эффективные константы связи сливаются в одной точке ( $\alpha_E = \alpha_S = \alpha_W = \alpha_{GU}$ ), при этом интенсивности всех взаимодействий выравниваются и всякое различие между ними пропадает.

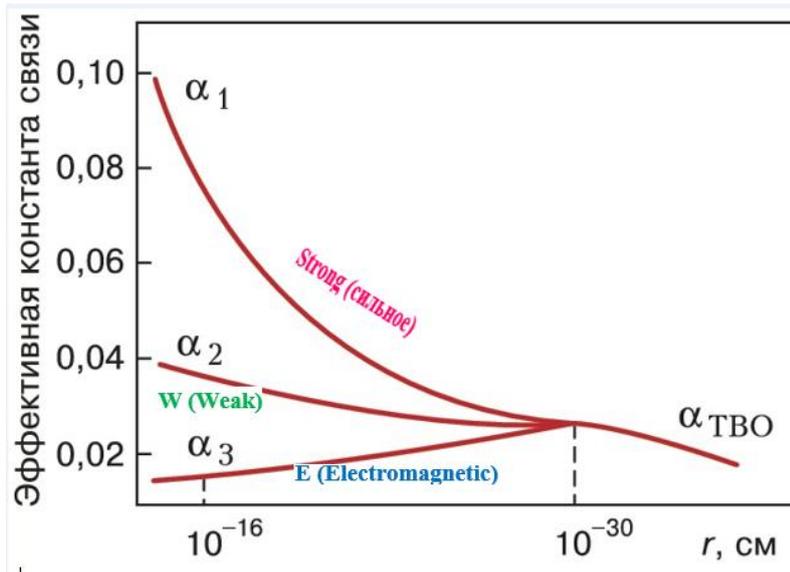


Рис. 23. Слияние констант связи трёх фундаментальных взаимодействий

2. Одинаковость констант взаимодействия при великом объединении означает, что единое фундаментальное взаимодействие должно обладать некоторой единой симметрией – кварков и симметрией, лежащей в основе электрослабого взаимодействия. Такой симметрией является SU(5)- симметрия. При этом суммарный электрический заряд всех частиц данного мультиплета обращается в нуль:

$$\sum Q = 3Q_{\bar{d}} + Q_e + Q_{\nu_e} = 0, \quad (9.13)$$

$$\begin{aligned} 3Q_{\bar{d}} &= -Q_e, \\ Q_{\bar{d}} &= 1/3, Q_d = -1/3. \end{aligned} \quad (9.14)$$

Обращение в нуль суммарного электрического заряда в SU(5)-симметрии имеет ту же природу, что и обращение в нуль суммарной проекции изотопического спина частиц, принадлежащих каждому мультиплету группы SU(5) или SU(3). При этом электрический заряд появляется как квантовое число, непосредственно порождаемое преобразованиями симметрии. Тем самым, как видно из (9.14), получает объяснение дробность электрических зарядов кварков и теоретически устанавливается квантованность электрического заряда, которая до создания ТВО считалась совершенно загадочным фактом.

3. Для того чтобы сделать симметрию  $SU(5)$  локальной, должны быть введены калибровочные поля, число которых равно 24. С этими полями связаны векторные бозоны, обмен которыми приводит к взаимодействию фермионов: между кварками, между лептонами и между кварками и лептонами. Первоначально эти бозоны являются безмассовыми, но благодаря механизму Хиггса (спонтанного нарушения  $SU(5)$ -симметрии) бозоны приобретают массу (кроме фотона и глюонов).

4. Посредством бозонов  $X$  и  $Y$  оказываются возможными процессы (9.4) и (9.11), идущие с несохранением барионного и лептонного зарядов и приводящие к распадам нуклонов. Таким образом, протон оказывается нестабильным. Этот же вывод относится и к нейтронам, связанным в ядрах, которые обычно считаются абсолютно устойчивыми.

5. Стандартная модель не включает гравитационное взаимодействие. На классическом уровне оно описывается общей теорией относительности (ОТО) Эйнштейна. Обобщением ОТО является супергравитация, которая базируется на концепциях ЛКИ, СНС и суперсимметрии (SUSY). Все ранее рассматриваемые симметрии приводили к мультиплетам частиц, содержащим либо бозоны, либо фермионы. В SUSY-моделях каждому фермиону ставится в соответствие бозон, и наоборот. Суперсимметричные мультиплеты включают и бозоны, и фермионы, переходящие друг в друга при соответствующих преобразованиях. Т.е. бозоны и фермионы становятся суперпартнёрами. Примеры суперпартнёров приведены в таблице 23.

Таблица 23 – Суперсимметричные партнёры

Частицы	Спин	Частицы	Спин
Фотон	1	Фотино	1/2
Глюон	1	Глюино	1/2
Z-бозон	1	Зино	1/2
W-бозон	1	Вино	1/2
Хиггс	0	Хиггсино	1/2
Гравитон	2	Гравитино	3/2
Нейтрино	1/2	Снейтрино	0
Лептоны	1/2	Слептоны	0
Кварки	1/2	Скварки	0

На концепции SUSY основываются попытки объединённого описания всех четырёх фундаментальных взаимодействий. В качестве естественного масштаба физики элементарных частиц в теории суперобъединения взаимодействий выступают планковская энергия  $E_p \sim 10^{19} \text{ ГэВ}$  и планковская длина (9.9). На расстояниях  $r \sim \ell_p \sim 10^{-33} \text{ см}$  должны проявляться эффекты квантовой гравитации.

6. ТВО предсказывает возможность существования магнитных монополей. Ещё в 1931 г. П. Дирак высказал гипотезу о существовании частиц, обладающих магнитными зарядами. Он установил, что магнитный заряд  $g$  и электрический заряд  $e$  должны быть связаны соотношением

$$ge = \frac{n}{2} \hbar c, \quad (9.15)$$

где  $n$  – произвольное целое число. Отсюда вытекает, что минимальный магнитный заряд

$$g_{min} = \frac{e}{2\alpha} \cong 67,7 e. \quad (9.16)$$

Магнитные монополи, предсказываемые ТВО, должны обладать чрезвычайно большими массами порядка  $10^{16} \text{ ГэВ}$ . Они могли бы рождаться в первые мгновения Большого взрыва. Такие реликтовые монополи интенсивно ищут экспериментально.

7. Для объяснения барионной асимметрии Вселенной (число протонов и нейтронов резко превышает число антипротонов и антинейтронов) привлекается  $\hat{C}\hat{P}$ -неинвариантность, дополненная несохранением барионного заряда, предсказываемого в теории великого объединения.

## 9.2. Задания для самостоятельной работы

1. Определить, возможны ли следующие реакции:

а)  $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$ ,

б)  $\tau^+ \rightarrow \mu^+ + \tilde{\nu}_\tau$ ,

в)  $\tau^- \rightarrow e^- + \tilde{\nu}_e + \nu_\tau$ .

(Учтёшь сохранение лептонных зарядов: электронного  $L_e$ , мюонного  $L_\mu$  и таонного  $L_\tau$ ).

2. Определить тип промежуточных векторных бозонов, испускаемых и поглощаемых в следующих процессах (рис. 24):

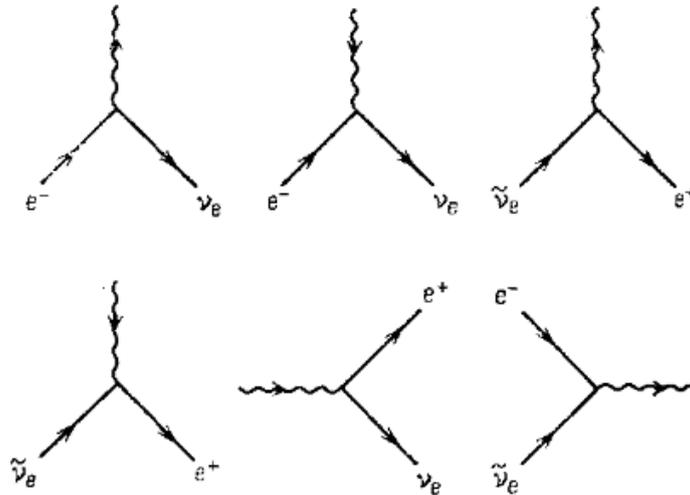


Рис. 24. Фейнмановские диаграммы, описывающие испускание и поглощение заряженных ПВБ слабым положительным током  $\tilde{\nu}_e e$

3. Определить тип ПВБ, испускаемых и поглощаемых в следующих превращениях (рис. 25):

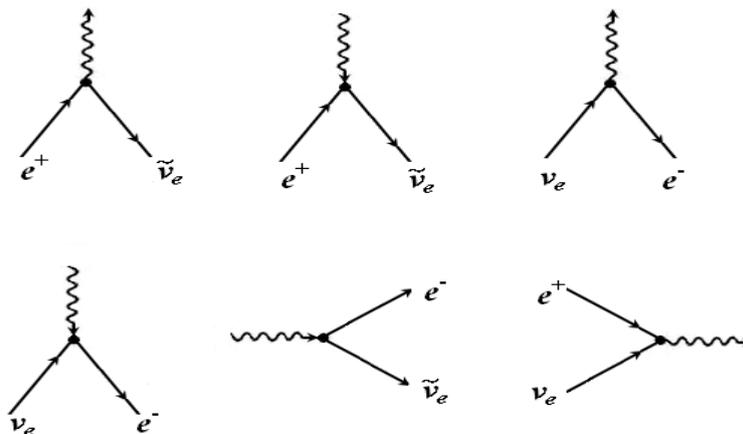


Рис. 25. Фейнмановские диаграммы, описывающие испускание и поглощение заряженных ПВБ слабым отрицательным током  $\tilde{\nu}_e e$

4. Определить, какие ПВБ рождаются в следующих столкновениях кварка и антикварка (рис. 26):

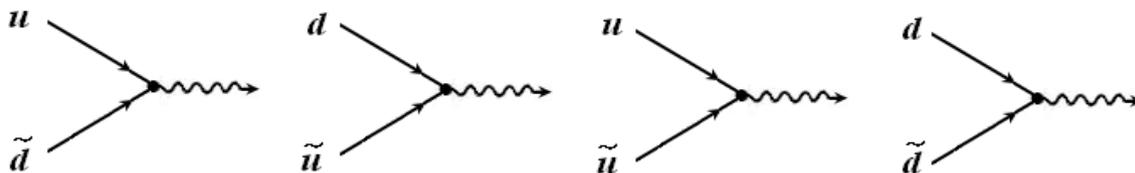


Рис. 26. Рождение ПВБ при столкновениях кварка и антикварка

5. Определить тип переносчика объединённого взаимодействия (бозонов  $X$  или  $Y$ ), участвующих в превращении протона в позитрон (а) и нейтрона в электронное антинейтрино (б). Структура протона и нейтрона легко угадывается при мысленной замене вылетающего антикварка  $\bar{d}$  на влетающий кварк  $d$ , т.е. переход от частицы к античастице соответствует изменению направления движения (рис. 27).

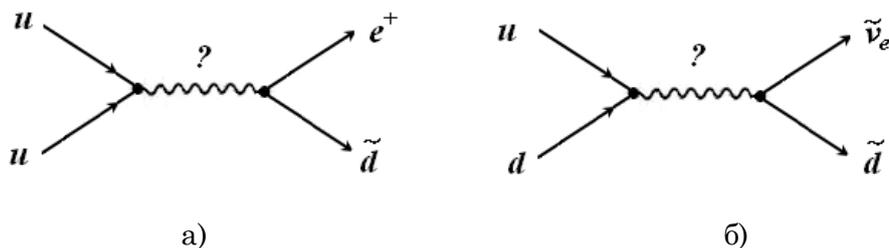


Рис. 27. Процессы с участием  $X$ - и  $Y$ -бозонов

6. Начинаящие музыканты («подготовишки») запоминают ноты, читая стихотворение:

«СЕМЬ ВСЕГО ЛИШЬ НОТ НА СВЕТЕ:  
 ДО, РЕ, МИ, ФА, СОЛЬ, ЛЯ, СИ,  
 ТЫ ЗАПОМНИ НОТЫ ЭТИ  
 И В ТЕТРАДКУ ЗАНЕСИ!»

Разместите 3 поколения фундаментальных фермионов (заряженные лептоны и антилептоны, кварки и антикварки, нейтральные лептоны) на 7 линейках (подобно нотам на нотном стане, содержащем 5 линеек), и откройте для себя удиви-

тельную музыкальность мира элементарных частиц. Каждая линейка должна соответствовать электрическому заряду фермиона

$$(-1, -2/3, -1/3, 0, 1/3, 2/3, 1).$$

Отличие «ноток-фермионов» от обычных нот проявится в том, что обычные ноты располагаются не только на 5 линейках, но и между ними.

7. Используя значения энергии, при которых должно происходить объединение фундаментальных взаимодействий (таблица 24), оцените соответствующие температуры и характерные расстояния, на которых должны проявляться данные взаимодействия.

Таблица 24 – Масштаб энергий, температур и расстояний для объединённых взаимодействий

Взаимодействия	Энергия E, ГэВ	T, К	R, см
Электрослабое	100		
Сильное+электрослабое (ТВО, или Стандартная модель)	$10^{15}$		
Единое суперсимметричное ( <i>Theory of Everything</i> )	$10^{19}$		

8. Обнаружение распада протона, предсказываемого ТВО, стало бы открытием века. Эксперименты проводятся в глубоких шахтах (для исключения фона космических лучей). В 1 г водорода содержится  $6 \cdot 10^{23}$  протонов, поэтому в 1 тонне воды ( $10^6$  г) содержится  $6 \cdot 10^{29}$  протонов. На долю водорода в молекуле воды приходится 2 ат. ед. массы, т.е.  $2/18 = 1/9$ . Если взять 9 тонн воды (т.е. 1 тонну свободных протонов) и в течение года не обнаружится ни одного распада протона, тогда можно утверждать, что время жизни протона  $\tau > 6 \cdot 10^{29}$  лет, т.е. почти  $10^{30}$  лет. Используя это значение, оцените массу X (или Y)-бозонов, обуславливающих взаимопревращения кварков и лептонов согласно ТВО.

9. Что такое планковские величины (планковская длина, планковское время, планковская масса, планковская температура, планковская энергия)? Вычислите

эти величины, используя значения фундаментальных физических констант – скорости света  $c$ , гравитационной постоянной  $G$ , постоянной Планка  $\hbar$ , постоянной Больцмана  $k$  (см. статью М. Планка [4] «О необратимых процессах излучения», § 26 «Естественные единицы измерения»).

10. Заполните таблицу «Законы сохранения в физике частиц» (см. учебник А.И. Наумова, § 59).

Таблица 25 – Законы сохранения в физике частиц

№	Законы сохранения	Следствие каких симметрий	Виды фундаменталь- ных взаимодействий
1	энергии		
2	импульса		
3	момента импульса		
4	электрического заряда		
5	барионного заряда		
6	лептонного заряда		
7	изотопического спина		
	и так далее...		

### *Рекомендуемая литература*

1. Ахиезер, А.И. Элементарные частицы / А.И. Ахиезер, М.П. Рекало. – Москва: Наука, 1986. – 256 с.
2. Высоцкий, М.И. Суперсимметричные модели элементарных частиц – физика для ускорителей нового поколения / М.И. Высоцкий. – УФН, 1985. – Т. 146. – Вып. 4. – С. 591–635.
3. Наумов, А.И. Физика атомного ядра и элементарных частиц / А.И. Наумов. – Москва: Просвещение, 1984. – 384 с.
4. Окунь, Л.Б.  $\alpha \beta \gamma \dots Z$ . Элементарное введение в физику элементарных частиц. Библиотечка «Квант». Вып. 45 / Л.Б. Окунь. – Москва: Наука, 1985. – 112 с.
5. Планк, М. Избранные труды. Ответственный редактор Л.С. Полак / Макс Планк; составитель У.И. Франкфурт. – Москва: Наука, 1975. – Серия «Классики науки». – 788 с.

## 10. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ «МАГНЕТИЗМ МИКРОЧАСТИЦ»

**Цель работы:** научиться вычислять магнитные моменты протона, нейтрона, атомных ядер в рамках однонуклонной модели Шмидта и магнитных моментов адронов на основе кварковой модели.

### Теоретическое введение

#### 1. Магнетизм протона и нейтрона в модели Х. Юкавы

Протоны и нейтроны, а также состоящие из них атомные ядра обладают собственными магнитными моментами. Поскольку масса ядер в тысячи раз больше массы электрона, величина магнитных моментов нуклонов и сложных ядер в среднем в тысячу раз меньше спинового или орбитального магнитного момента электронной оболочки атома. В силу того, что ядерный магнетизм очень слабый, он проявляет себя в гораздо более тонких эффектах (например, в сверхтонкой структуре спектральных линий) и требует для своего экспериментального обнаружения и изучения применения сложных экспериментальных методов.

В релятивистской квантовой теории Дирака (1928 г.) показано, что если у частицы есть отличный от нуля электрический заряд и спин, то она обладает собственным магнитным моментом. В частности, для электрона, у которого проекция спина на ось Z равна  $1/2 \hbar$ , величина вектора спина имеет вид

$$|\vec{S}| = \sqrt{s(s+1)} \hbar = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar. \quad (10.1)$$

Величина вектора спинового магнитного момента соответственно равна

$$|\vec{\mu}_{en}| = \frac{|e|\hbar}{mc} \sqrt{s(s+1)} \hbar = \sqrt{3} \mu_B, \quad (10.2)$$

где  $s$  – спиновое квантовое число, равное  $1/2$ ,  $\mu_B$  – магнетон Бора –

$$\mu_B = \frac{|e|\hbar}{2mc} = 0,9284851 \cdot 10^{-20} \text{ эрг} \cdot \text{Гс}^{-1}. \quad (10.3)$$

По аналогии с магнитными свойствами электрона протон, как положительно заряженная частица со спином  $(\sqrt{3}/2)\hbar$ , должен обладать спиновым магнитным моментом  $\sqrt{3}e\hbar/2m_p c$ , где  $m_p$  – масса протона, которая в 1836,1 раз больше массы

электрона  $m$ . Таким образом, в ядерном магнетизме роль элементарного магнитного момента должна играть величина проекции магнитного момента протона на направление внешнего магнитного поля, равная ядерному магнетону Бора:

$$\mu_{яд} = e\hbar/2m_p c = 1/1836,1\mu_B = 5,050951 \cdot 10^{-24} \text{ эрг/Гс}. \quad (10.4)$$

Нейтрон не имеет электрического заряда и, следовательно, по теории Дирака не должен иметь магнитного момента.

Измерения показали, что магнитные моменты протона и нейтрона являются аномальными по сравнению с теоретическими значениями: магнитный момент протона почти в три раза больше ядерного магнетона

$$\mu_p = 2,792782\mu_{Б,яд}. \quad (10.5)$$

а магнитный момент нейтрона оказался отличным от нуля (и отрицательным!):

$$\mu_n = -1,913148\mu_{Б,яд}. \quad (10.6)$$

Согласно теории Х. Юкавы (1935 г.) сильное (или ядерное) взаимодействие между нуклонами можно представить как процесс обмена виртуальными квантами мезонного поля –  $\pi$ -мезонами (или пионами). Нуклоны в результате непрерывного испускания и поглощения пионов создают вокруг себя мезонное поле. Здесь можно отметить аналогию с электромагнитным взаимодействием зарядов, которое является результатом обмена между ними квантами электромагнитного поля – виртуальными фотонами. Однако в отличие от фотонов, масса покоя которых равна нулю и которые не имеют электрического заряда, кванты мезонного поля,  $\pi$ -мезоны, обеспечивающие взаимопревращения нуклонов, имеют конечную массу покоя ( $273 m_e$  или приблизительно  $1/7 m_p$ ) и положительный или отрицательный заряд. При этом нуклоны, которые обнаруживаются на опыте либо как протоны, либо как нейтроны, испытывают непрерывные превращения друг в друга. В физической литературе часто встречается такая фраза: «голый нуклон одевается в пионную шубу».



Хидеки Юкава

Нестабильность протона и нейтрона можно представить в виде последовательности виртуальных диссоциаций и рекомбинаций (рисунки 28, 29).

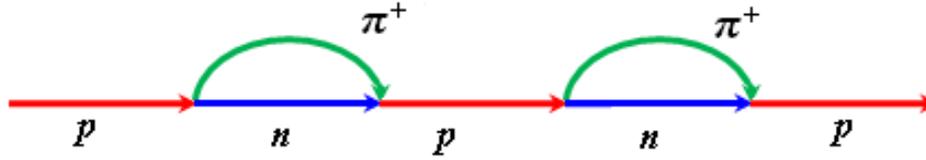


Рис. 28. Превращение протона в нейтрон с участием  $\pi^+$ -мезонов.

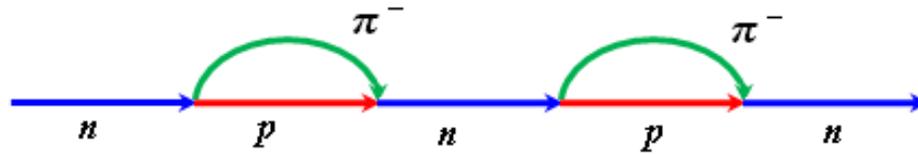


Рис. 29. Превращение нейтрона в протон с участием  $\pi^-$ -мезонов

Наблюдаемое среднее значение магнитного момента протона определяется равенством

$$\bar{\mu}_{p,набл.} = \mu_{B,яд}W(p) + 7\mu_{B,яд}.W(\pi^+, n^0), \quad (10.7)$$

где  $W(p)$  и  $W(\pi^+, n^0)$  – вероятность нахождения протона в собранном и диссоциированном состоянии соответственно. Второе слагаемое в (10.7) обусловлено магнитным моментом  $\pi^+$ -мезона  $\mu(\pi^+) = 7\mu_{B,яд}$ . Очевидно, что

$$W(p) + W(\pi^+, n^0) = 1. \quad (10.8)$$

По аналогии с (10.7) наблюдаемое среднее значение магнитного момента нейтрона определяется равенством

$$\bar{\mu}_{n,набл.} = 0 \cdot W(n) + (1 - 7)\mu_{B,яд}.W(p, \pi^-), \quad (10.9)$$

где  $W(n)$  и  $W(p, \pi^-)$  – вероятность нахождения нейтрона в собранном и диссоциированном состоянии соответственно. Второе слагаемое в (10.9) обусловлено магнитным моментом  $\pi^-$ -мезона  $\mu(\pi^-) = -7\mu_{B,яд}$ . Очевидно, что

$$W(n) + W(p, \pi^-) = 1. \quad (10.10)$$

Из (10.7)–(10.10) можно определить вероятности нахождения протона и нейтрона в собранном и диссоциированном состояниях.

Нуклоны, обнаруженные как протоны, большую часть времени пребывают в протонном состоянии, а обнаруженные как нейтроны – в нейтронном. Поскольку процесс обмена пионами происходит не мгновенно, а требует некоторого времени, то в ядре постоянно, на относительно короткие промежутки, появляются пионы, и поэтому результирующий магнитный момент протона оказывается больше ядерного магнетона, а у нейтрона исключительно за счет мезонного поля, появляется отрицательный магнитный момент.

Таково качественное объяснение аномальных значений магнитных моментов протона и нейтрона на докварковом уровне.

## 2. Связь магнитного момента со спином ядра

Таблица 26 дает представление о возможных значениях спинов и магнитных моментов ядер в основном состоянии (38 ядер).

Таблица 26 – Спины и магнитные моменты атомных ядер

Ядро	$J / \hbar$	$\mu / \mu_{Б,яд}$	Ядро	$J / \hbar$	$\mu / \mu_{Б,яд}$
протон	1/2	2,79	$^{26}_{13}Al$	5	+2,82
нейтрон	1/2	-1,91	$^{28}_{14}Si$	0	0
$^2_1D$	1	0,86	$^{30}_{15}P$	1	1,61
$^3_1T$	1/2	2,98	$^{32}_{16}S$	0	0
$^3_2He$	1/2	-2,13	$^{35}_{17}Cl$	3/2	0,82
$^4_2He$	0	0	$^{37}_{18}Ar$	3/2	0,95
$^6_3Li$	1	0,82	$^{40}_{19}K$	4	-1,298
$^9_4Be$	3/2	-1,17	$^{43}_{20}Ca$	7/2	-1,317
$^{10}_5B$	3	1,8	$^{44}_{21}Sc$	2	2,56
$^{12}_6C$	0	0	$^{46}_{22}Ti$	0	0
$^{13}_6C$	1/2	0,7	$^{50}_{23}V$	6	3,35
$^{14}_7N$	1	0,4	$^{53}_{24}Cr$	3/2	-0,74
$^{15}_7N$	1/2	-0,28	$^{55}_{25}Mn$	5/2	3,47
$^{15}_8O$	1/2	0,72	$^{56}_{26}Fe$	0	0
$^{16}_8O$	0	0	$^{57}_{27}Co$	7/2	4,65
$^{17}_9F$	5/2	+4,72	$^{134}_{55}Cs$	8	1,1
$^{20}_{10}Ne$	0	0	$^{197}_{79}Au$	3/2	0,16
$^{23}_{11}Na$	3/2	+2,22	$^{209}_{83}Bi$	9/2	4,08
$^{25}_{12}Mg$	5/2	-0,855	$^{238}_{92}U$	0	0

Из таблицы 26 видно, что нет тесной корреляции между величиной спина и магнитного момента. Например, изотоп цезия  $^{134}_{55}\text{Cs}$  имеет аномально большой спин  $J = 8$ , но весьма «скромный» магнитный момент  $\mu = 1,1 \mu_{B,яд}$ . Большинство ядер имеют спин, не превышающий  $9/2$ . Это позволяет считать, что подобно электронам атомной оболочки нуклоны образуют замкнутые «слои» с нулевым значением спина и магнитного момента. Следовательно, спин ядра является результатом сложения спинов лишь небольшого числа нуклонов, не вошедших в замкнутые слои.

Удовлетворительное согласие с экспериментом дает однонуклонная модель Шмидта (1937 г.).

### 3. Однонуклонная модель Т. Шмидта

В этой модели рассматривается 1 нуклон сверх заполненного ядерного остова. Таким образом, модель Шмидта является аналогом модели одновалентных атомов. Вычисление магнитных моментов нуклонов проводится в следующей последовательности.

1. Вычисляется гиромангнитное отношение для орбитального и спинового магнитных моментов  $g_\ell$  и  $g_s$  протона и нейтрона.

2. Находится гиромангнитное отношение  $g_j$  для полного момента импульса протона и нейтрона в двух случаях:  $\vec{K} \uparrow S \uparrow$  и  $\vec{K} \uparrow S \downarrow$  ( $\vec{K}$  – орбитальный момент,  $\vec{S}$  – спиновый момент импульса).

3. Вычисляются магнитные моменты протона и нейтрона для двух указанных случаев в зависимости от значений  $j$  – квантового числа полного момента импульса.

Результаты вычислений приведены в таблице 27. По формулам (10.11)–(10.14) этой таблицы можно рассчитать магнитные моменты протона и нейтрона для различных квантовых состояний и построить графики зависимости  $\mu(j)$  – диаграммы Шмидта (рис. 30).

Таблица 27 – Гиромагнитное отношение и магнитный момент протона и нейтрона в модели Шмидта

Величина	Протон (p)	Нейтрон (n)
$g_\ell$	$\frac{e}{2m_p c}$	0
$g_s$	$5,58 \frac{e}{2m_p c}$	$-3,82 \frac{e}{2m_p c}$
$g_j (\vec{K} \uparrow \vec{S})$	$\frac{e}{2m_p c} \left(1 + \frac{2,29}{j}\right)$	$-\frac{1,91}{j} \frac{e}{2m_p c}$
$g_j (\vec{K} \uparrow \downarrow \vec{S})$	$\frac{e}{2m_p c} \left(1 - \frac{2,29}{j+1}\right)$	$\frac{1,91}{j+1} \frac{e}{2m_p c}$
$\mu (\vec{K} \uparrow \vec{S})$	$(j + 2,29) \mu_{B,яд.} (10.11)$	$-1,91 \mu_{B,яд.} (10.12)$
$\mu (\vec{K} \uparrow \downarrow \vec{S})$	$\left(1 - \frac{2,29}{j+1}\right) j \mu_{B,яд.} (10.13)$	$\frac{1,91}{j+1} j \mu_{B,яд.} (10.14)$

Из рисунка 30 видно, что экспериментальные значения магнитных моментов ядер заключены между кривыми  $j = \ell - 1/2$  и  $j = \ell + 1/2$ .

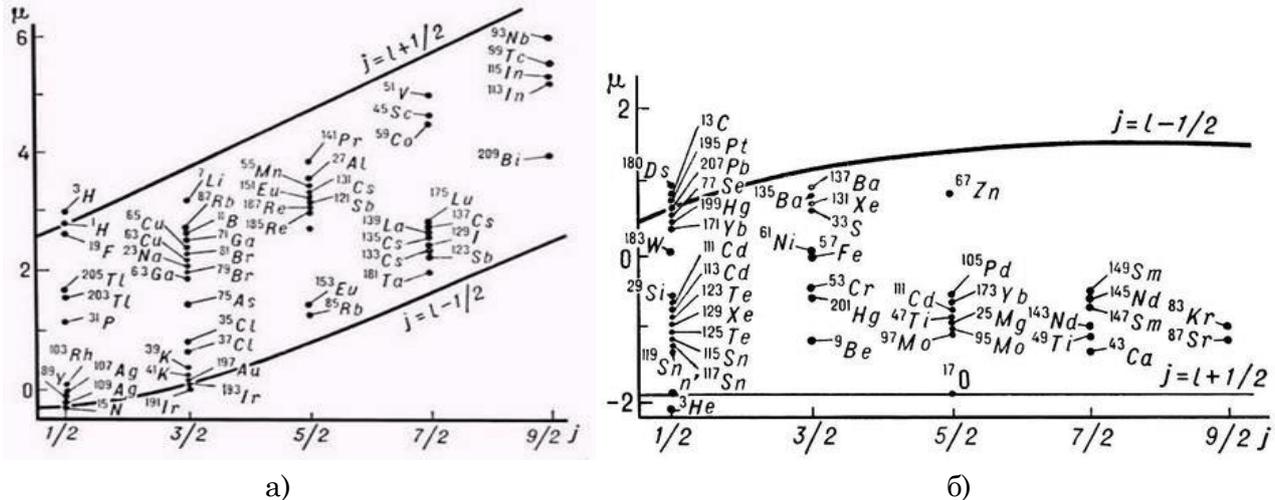
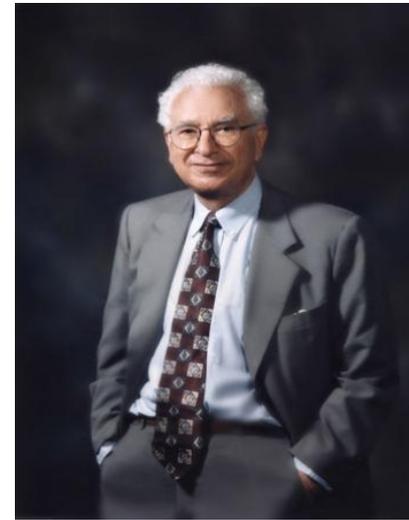
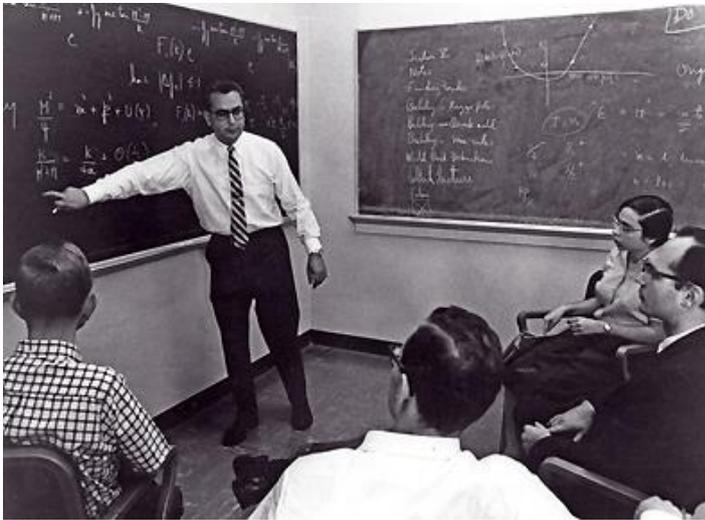


Рис. 30. Диаграммы Шмидта для ядер с нечетным числом протонов (а) и нечетным числом нейтронов (б)

#### 4. Магнитные моменты адронов по гипотезе кварков

Магнитные моменты адронов рассчитываются, исходя из магнетизма входящих в их состав кварков. Магнитные моменты кварков пропорциональны их зарядам. Зная кварковый состав адрона, можно определить его магнитный момент.

В 1964 г. М. Гелл-Манн все сильно взаимодействующие частицы сгруппировал в «семейства». Свою схему ученый назвал восьмеричным путем (по аналогии с восемью атрибутами праведного жития в буддизме), так как некоторые частицы были сгруппированы в семейства, насчитывающие по восемь членов.



б)

Рис. 31. Мир большой науки: а) на семинаре физиков-теоретиков; б) М. Гелл-Манн – американский физик-теоретик, лауреат Нобелевской премии по физике (1969 г.)

Гелл-Манн обнаружил, что детальная структура восьмеричного пути может быть объяснена, если предположить, что каждая частица, участвующая в сильном взаимодействии, состоит из триплета частиц с зарядом, составляющим дробную часть электрического заряда протона. Частицы с дробным зарядом получили название кварков. Кварки могут иметь заряд  $+2/3$  или  $-1/3$ . Соответственно антикварки имеют заряды  $-2/3$  или  $+1/3$ .

Различные комбинации кварков позволяют описывать все сильно взаимодействующие частицы. Например, протон, обладающий зарядом  $+1$ , состоит из двух

кварков с зарядами  $+2/3$  и одного кварка с зарядом  $-1/3$  ( $uud$ ). Нейтрон, не имеющий электрического заряда, состоит из одного кварка с зарядом  $+2/3$  и двух кварков с зарядом  $-1/3$  ( $udd$ ).

Весовые диаграммы в координатах гиперзаряд  $Y$  – третья проекция изотопического спина  $T_3$  октета барионов со спином  $1/2$ , октета мезонов с нулевым спином и декуплета барионных резонансов представлены на рисунках 32–34.

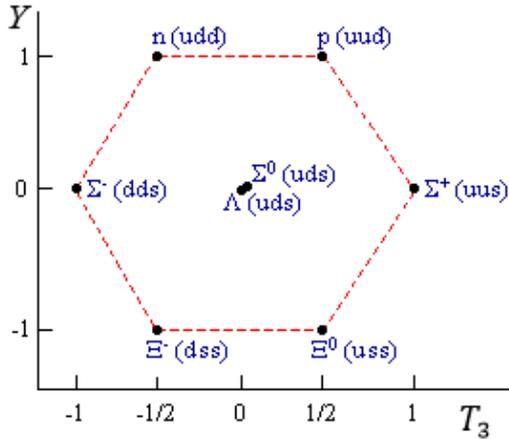


Рис. 32. Октет барионов со спином  $1/2$

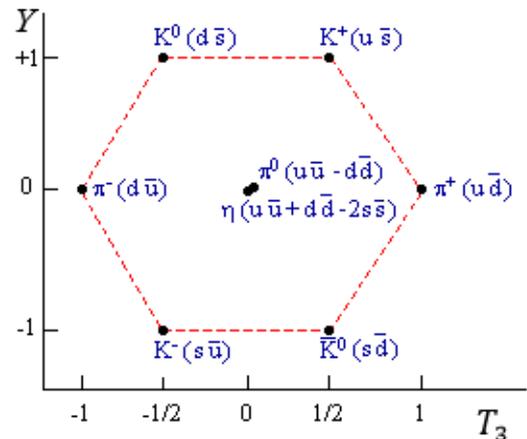


Рис. 33. Октет мезонов со спином  $0$

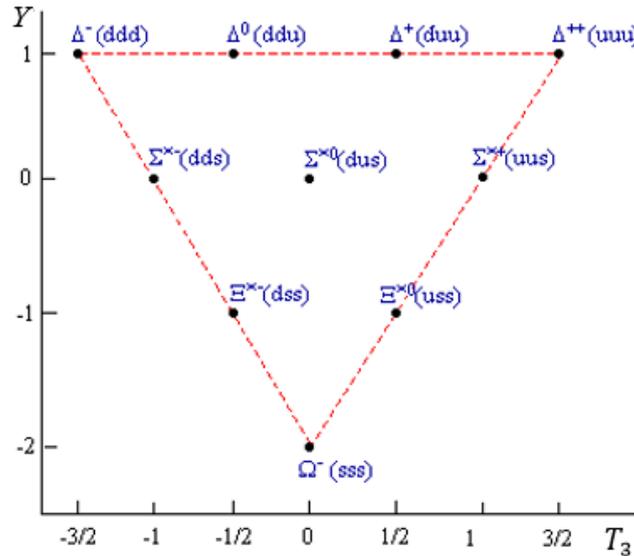


Рис. 34. Декуплет барионных резонансов со спином  $3/2$

## Экспериментальная часть

*Задание 1.* Согласно теории Юкавы аномальный магнитный момент протона связан с его взаимодействием с квантами пионного поля. Нестабильность протона можно представить в виде последовательности виртуальных диссоциаций и рекомбинаций (рис. 28). Определить вероятность нахождения протона в диссоциированном и собранном состояниях, используя формулы (10.7) и (10.8).

*Задание 2.* В тех же условиях определить вероятность нахождения нейтрона в диссоциированном и собранном состояниях, используя формулы (10.9) и (10.10). Компьютерную модель «одевания» протона и нейтрона в пионную «шубу» можно посмотреть, щёлкнув левой кнопкой мыши на клавишу «МОДЕЛЬ».

*Задание 3.* Используя соотношение неопределённостей Гейзенберга для энергии и времени, покажите, что появление виртуальных пи-мезонов в процессах, рассмотренных в заданиях 1 и 2, не противоречит закону сохранения энергии.

*Задание 4.* На основе данных таблицы 26 объясните обращение в нуль спина и магнитного момента некоторых ядер (эти ядра выделены в таблице цветом).

*Задание 5.* Используя данные таблицы 26, постройте график зависимости ядерных магнитных моментов от числа протонов в ядре. Убедитесь в отсутствии периодического характера этой зависимости (в отличие от магнетизма электронной оболочки атомов, где имеет место ярко выраженная периодичность в зависимости от порядкового номера элемента в таблице Менделеева).

*Задание 6.* Пользуясь данными таблицы 26, убедитесь, что для лёгких ядер наблюдается аддитивность магнитных моментов (на примере дейтерия, трития, гелия). Магнитные моменты этих ядер получаются простым суммированием магнитных моментов входящих в их состав нуклонов. Щёлкнув левой кнопкой мыши по данному ядру в таблице Менделеева, Вы получите в правой колонке экспериментальное значение его магнитного момента. А в нижней части поля можно провести вычисления магнетизма ядра, введя массовое число и число протонов. Число нейтронов Вам поможет вычислить встроенный калькулятор. Полученный результат отразит свойство аддитивности магнитных моментов нуклонов в случае лёгких ядер.

При переходе к более тяжёлым ядрам свойство аддитивности магнитных моментов нарушается. Выберите какие-либо три ядра в таблице Менделеева и убедитесь в отклонении расчетных данных, полученных в предположении аддитивности, от экспериментальных.

*Задание 7.* На основе данных таблицы 28 постройте круговую диаграмму распределения ядер по спинам. Сформулируйте выводы.

Таблица 28 – Распределение ядер по спинам

Спин изотопа $J$	Число ядер с данным спином	Спин изотопа $J$	Число ядер с данным спином
0	172	4	5
1/2	57	9/2	18
1	24	5	8
3/2	59	11/2	2
2	21	6	4
5/2	51	13/2	1
3	10	7	1
7/2	31	8	2

*Задание 8.* Используя формулы (10.11)–(10.14) из табл. 27, постройте диаграммы Шмидта для ядер с одним неспаренным протоном и одним неспаренным нейтроном.

*Задание 9.* Вычислите магнитные моменты адронов, принадлежащих барионному декуплету (рисунок 34), с учётом их кваркового состава, полагая, что магнитные моменты кварков пропорциональны их зарядам (таблица 29).

Таблица 29 – Электрический заряд и магнитный момент кварков

Кварк	Электрический заряд, $Q$	Магнитный момент, $\mu$
$u$	+2/3	$2/3 \mu_1$
$d$	-1/3	$-1/3 \mu_1$
$s$	-1/3	$-1/3 \mu_1$

Сформулируйте вывод о связи магнитных моментов с зарядами адронов.

*Задание 10.* Определить магнитные моменты протона и нейтрона, принадлежащих барионному октету, учитывая их кварковую структуру.

Посмотрев на кварковый состав протона, можно заметить, что он совпадает с кварковым составом  $\Delta^+$ -резонанса, принадлежащего барионному декуплету со спином  $3/2$ . Различие состоит в том, что в случае протона проекция спина  $S_z = 1/2$ , а в случае декуплета  $S_z = 3/2$  и  $1/2$ . Проекция  $S_z = 3/2$  соответствует состоянию  $(u\uparrow u\uparrow d\uparrow)$ , а проекция  $S_z = 1/2$  соответствует состоянию с отклонённым спином, которое может реализоваться двумя способами:

$$1) (u\uparrow u\downarrow d\uparrow); \quad 2) (u\uparrow u\uparrow d\downarrow).$$

Вероятность получить состояние 1) в 2 раза больше вероятности получить состояние 2). Поэтому волновая функция  $\Delta^+$ -резонанса с учётом условия нормировки имеет вид

$$\Psi_{\Delta^+} \left( s = \frac{3}{2}, s_z = \frac{1}{2} \right) = \sqrt{\frac{2}{3}} (u\uparrow u\downarrow d\uparrow) + \sqrt{\frac{1}{3}} (u\uparrow u\uparrow d\downarrow). \quad (10.15)$$

Поскольку волновые функции протона и  $\Delta^+$ -резонанса взаимно ортогональны (эти частицы принадлежат разным унитарным мультиплетам)

$$\langle \Psi_p | \Psi_{\Delta^+} \rangle = 0, \quad (10.16)$$

то волновую функцию протона следует выбрать в виде

$$\Psi_p \left( s = \frac{1}{2}, s_z = \frac{1}{2} \right) = -\sqrt{\frac{1}{3}} (u\uparrow u\downarrow d\uparrow) + \sqrt{\frac{2}{3}} (u\uparrow u\uparrow d\downarrow). \quad (10.17)$$

Это означает, что вероятность нахождения нуклона в протонном состоянии представляет собой суперпозицию состояний, входящих в формулу (10.17):

$$W_p = \frac{1}{3} (u\uparrow u\downarrow d\uparrow) + \frac{2}{3} (u\uparrow u\uparrow d\downarrow). \quad (10.18)$$

Теперь, пользуясь таблицей 29, можно подсчитать средний магнитный момент протона:

$$\bar{\mu}_p = \frac{1}{3} \left( \frac{2}{3} \mu_1 - \frac{2}{3} \mu_1 - \frac{1}{3} \mu_1 \right) + \frac{2}{3} \left( \frac{2}{3} \mu_1 + \frac{2}{3} \mu_1 - \left( -\frac{1}{3} \mu_1 \right) \right). \quad (10.19)$$

По аналогии с (10.18) можно показать, что для нейтрона, волновая функция которого ортогональна к состоянию  $\Delta^0$ -резонанса (имеющего тот же самый кварковый состав) –

$$W_n = \frac{1}{3}(u \uparrow d \uparrow d \downarrow) + \frac{2}{3}(u \downarrow d \uparrow d \uparrow). \quad (10.20)$$

Пользуясь таблицей 29, можно с помощью (10.20) подсчитать средний магнитный момент нейтрона:

$$\bar{\mu}_n = \frac{1}{3} \left( \frac{2}{3} \mu_1 - \frac{1}{3} \mu_1 + \frac{1}{3} \mu_1 \right) + \frac{2}{3} \left( -\frac{2}{3} \mu_1 - \frac{1}{3} \mu_1 - \frac{1}{3} \mu_1 \right). \quad (10.21)$$

С помощью формул (10.19) и (10.21) получите окончательные значения магнитных моментов протона и нейтрона, выраженные в единицах  $\mu_1$ , а затем составьте их отношение:

$\left(\frac{\mu_n}{\mu_p}\right)$ теоретическое	
$\left(\frac{\mu_n}{\mu_p}\right)$ экспериментальное	

Вычисленное Вами теоретическое отношение магнитных моментов должно с точностью до 2% совпадать с экспериментальным. Это позволит сделать заключение о разумности гипотезы кварков.

#### *Рекомендуемая литература*

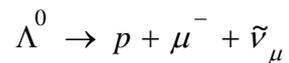
1. Вонсовский, С.В. Магнетизм микрочастиц / С.В. Вонсовский. – Москва: Наука, 1973. – 280 с.
2. Наумов, А.И. Физика атомного ядра и элементарных частиц / А.И. Наумов. – Москва: Просвещение, 1984. – 384 с.

## 11. ТИПОВЫЕ ЗАДАНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Используя обобщенную формулу Гелл-Манна–Нишидзимы, определить электрический заряд кварка  $s$ .

2. Определить изотопический спин, его третью проекцию, странность, гиперзаряд и кварковый состав  $K^-$ -мезона.

3. Учитывая кварковый состав  $\Lambda^0$ -гиперона и протона, построить диаграмму превращения



и определить тип промежуточного векторного бозона, участвующего в этой реакции.

4. Определить тип переносчика, его цвет и электрический заряд, осуществляющего переход от электронного нейтрино к красному антикварку  $\tilde{d}_k$  согласно ТВО.

## 12. МАЛЕНЬКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ПО ФИЗИКЕ АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

### 1. Краткий словарь терминов

1. Адроны	27. Магнетон Бора. Ядерный магнетон Бора
2. Альфа-распад	28. Массовое число
3. Античастицы	29. Мезоны
4. Асимптотическая свобода	30. Нуклоны
5. Барионы	31. Нейтрино
6. Барьер деления атомного ядра	32. Очарование
7. Бета-распад	33. Остров стабильности
8. Великое объединение фундаментальных взаимодействий	34. Прелесть
9. Гамма-излучение	35. Промежуточные векторные бозоны
10. Гипероны	36. Пространственная чётность
11. Гиперзаряд	37. Радиоактивность
12. Глюоны	38. Спонтанное нарушение симметрии
13. Гравитон	39. Странность
14. Диаграммы Шмидта	40. Супермультиплеты
15. Законы сохранения в физике элементарных частиц	41. Унитарные мультиплеты (октет барионов, октет мезонов, барионный декуплет)
16. Зарядовая чётность	42. Фотон
17. Зеркальные ядра	43. Фундаментальные взаимодействия
18. Изотопы, изобары, изотоны	44. Хиггс-бозон
19. Изотопический спин	45. Цвет
20. Коллайдеры	46. <i>CPT</i> -теорема
21. Квантовая хромодинамика (КХД)	47. Чармоний
22. Кварки	48. Элементарные частицы
23. Комбинированная чётность	48. Электрослабое взаимодействие
24. Конфайнмент	48. Энергия связи атомных ядер
25. Лептоны	51. Ядерные оболочки
26. Магические числа	52. Янга–Миллса поля

## 2. Основные формулы

1. Связь массового числа с числом протонов и числом нейтронов.
2. Три матрицы изотопического спина.
3. Число членов изотопического мультиплета.
4. Эмпирическое соотношение между числом протонов и числом нейтронов в стабильных ядрах.
5. Радиус ядра, объём ядра.
6. Концентрация ядерного вещества, плотность атомного ядра.
7. Энергия связи ядер.
8. Дефект массы.
9. Удельная энергия связи ядра.
10. Полуэмпирическая формула Вейцеккера для энергии связи атомных ядер.
11. Магнитный момент протона и нейтрона.
12. Связь квадрупольного момента ядра с полным моментом импульса.
13. Закон радиоактивного распада.
14. Закон Гейгера–Неттола.
15. Связь постоянной радиоактивного распада с периодом полураспада.
16. Постоянная тонкой структуры.
17. Критерий деления атомного ядра.
18. Коэффициент размножения нейтронов.
19. Протон-протонный цикл.
20. Углеродно-азотный цикл.
21. Критерий Лоусона.
22. Формула Гелл-Манна–Нишиджимы для нестранных частиц.
23. Формула Гелл-Манна–Нишиджимы для странных частиц.
24. Формула Резерфорда для дифференциального эффективного сечения рассеяния.

### **3. Экспериментальная база физики ядра и элементарных частиц**

1. Ускорители (линейные, циклические: бетатрон, циклотрон, фазотрон, синхротрон, синхрофазотрон; коллайдеры).

2. Детекторы частиц (масс-анализаторы, счётчики, трековые детекторы, годоскопические камеры).

3. Ядерные реакторы (на тепловых нейтронах, на быстрых нейтронах, бридеры, гибридные реакторы).

4. Термоядерные установки для осуществления управляемого термоядерного синтеза (УТС):

а) магнитное удержание высокотемпературной плазмы: токамаки, стеллараторы; б) импульсный УТС.

### **4. Ведущие мировые научные центры в области ядерной физики и физики элементарных частиц (краткие сведения)**

Например, Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ) в г. Дубна Московской области; Дармштадт; ЦЕРН; Фермилаб и т.д.

### **5. Вклад лауреатов Нобелевской премии в исследования по физике атомного ядра и элементарных частиц**

№	Год присуждения	Учёные	Краткая справка
1	1903	А. Беккерель	
2	1903	П. Кюри, М. Склодовская-Кюри	
3	1908	Э. Резерфорд	
4	1927	Ч. Вильсон	
5	1932	В. Гейзенберг	
6	1935	Дж. Чэдвик	
7	1936	К.Д. Андерсон, В.Ф. Гесс	
8	1938	Э. Ферми	
9	1939	Э. Лоуренс	

№	Год присуждения	Учёные	Краткая справка
10	1943	О. Штерн	
11	1944	О. Ганн	
12	1945	В. Паули	
13	1949	Х. Юкава	
14	1950	С.Ф. Пауэлл	
15	1957	Ц. Ли, Ч. Янг	
16	1959	Э. Сегре, О. Чемберлен	
17	1961	Р.Л. Мёссбауэр	
18	1963	Э. Вигнер	
19	1963	М. Гёпперт-Майер, Й.Х.Д. Йенсен	
20	1967	Х. Бете	
21	1968	Л.У. Альварес	
22	1969	М. Гелл-Манн	
23	1975	О. Бор, Б. Моттelson, Дж. Рейнуотер	
24	1976	Б. Рихтер, С. Тинг	
25	1979	С. Вайнберг, Ш. Глэшоу, А. Салам	
26	1980	Дж. У. Кронин, В.Л. Фитч	
27	1984	С. Мер, К. Руббиа	
28	1988	Л. Ледерман, Дж. Стейнбергер, М. Шварц	
29	1995	М. Перл, Ф. Рейнес	
30	1999	Г. Хофт, М. Вельтман	
31	2004	Д. Гросс, Д. Политцер, Ф. Вильчек	
32	2008	Ё. Намбу, М. Кобаяси, Т. Маскава	
33	2013	Ф. Энглер, П. Хиггс	
34	2015	Т. Кадзита, А. Макдональд	

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахиезер, А.И. Элементарные частицы / А.И. Ахиезер, М.П. Рекало. – Москва: Наука, 1986. – 256 с.
2. Бояркин, О.М. Введение в физику элементарных частиц / О.М. Бояркин. – Москва: КомКнига, 2010. – 264 с. – ISBN 978-5-484-01085-1.
3. Вонсовский, С.В. Магнетизм микрочастиц / С.В. Вонсовский. – Москва: Наука, 1973. – 280 с.
4. Высоцкий, М.И. Суперсимметричные модели элементарных частиц – физика для ускорителей нового поколения / М.И. Высоцкий. – УФН, 1985. – Т. 146. – Вып. 4. – С. 591–635.
5. Капитонов, И.М. Введение в физику ядра и частиц / И.М. Капитонов. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 512 с. – ISBN 978-5-9221-1250-5. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/2189>
6. Михайлов, М.А. Ядерная физика и физика элементарных частиц. Часть 2. Элементарные частицы: учебное пособие / М.А. Михайлов. – Москва: Прометей, 2013. – 28 с. – ISBN 978-5-7042-2471-6. – Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/58212.html>
7. Мухин, К.Н. Экспериментальная ядерная физика: в 3 т. / К.Н. Мухин. – Санкт-Петербург: Лань, 2021 – Том 3: Физика элементарных частиц. – 416 с. – ISBN 978-5-8114-7643-5. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/163401>.
8. Намбу, Ё. Кварки / Ё. Намбу. – Москва: Мир, 1984. – 224 с.
9. Наумов, А.И. Физика атомного ядра и элементарных частиц / А.И. Наумов. – Москва: Просвещение, 1984. – 384 с.
10. Окунь, Л.Б.  $\alpha \beta \gamma \dots Z$ . Элементарное введение в физику элементарных частиц. Библиотечка «Квант». Вып. 45 / Л.Б. Окунь. – Москва: Наука, 1985. – 112 с.
11. Райдер, Л. Элементарные частицы и симметрии / Л. Райдер; пер. с англ. под ред. Б.М. Барбашова. – Москва: Наука, 1983. – 317 с.
12. Рудницкая, Т.Г. Элементарные частицы и фундаментальные взаимодействия / Т.Г. Рудницкая, Ю.А. Изюмов. – Екатеринбург: УРО РАН, 2010. – 348 с. – ISBN 978-5-7691-9.
13. Сафаров, Р.Х. Физика атомного ядра и элементарных частиц / Р.Х. Сафаров. – Казань: РИЦ «Школа», 2008. – 280 с. – ISBN 5-94712-015-1.
14. Широков, Ю.М. Ядерная физика / Ю.М. Широков, Н.П. Юдин. – Москва: Наука, 1980. – 728 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ХАРАКТЕРИСТИКИ БАРИОНОВ, МЕЗОНОВ, РЕЗОНАНСОВ

Таблица 30 – Характеристики некоторых барионов, мезонов, резонансов

Частица	B	$J^{\lambda}$	S	T	$T_3$	Y	Масса, МэВ	Кварковый состав
p	+1	$1/2^{+}$	0	1/2	1/2	+1	938,3	$uud$
n	+1	$1/2^{+}$	0	1/2	-1/2	+1	939,6	$udd$
$\Lambda^0$	+1	$1/2^{+}$	-1	0	0	+1	1115,6	$uds$
$\Sigma^+$	+1	$1/2^{+}$	-1	1	+1	0	1189,4	$uus$
$\Sigma^0$	+1	$1/2^{+}$	-1	1	0	0	1192,5	$uds$
$\Sigma^-$	+1	$1/2^{+}$	-1	1	-1	0	1197,3	$dds$
$\Xi^0$	+1	$1/2^{+}$	-2	1/2	+1/2	-1	1315	$uss$
$\Xi^-$	+1	$1/2^{+}$	-2	1/2	-1/2	-1	1321,3	$dss$
$\pi^+$	0	$0^-$	0	1	+1	0	139,6	$u\bar{d}$
$\pi^0$	0	$0^-$	0	1	0	0	135	$\frac{1}{\sqrt{2}}(u\bar{u} - d\bar{d})$
$\pi^-$	0	$0^-$	0	1	-1	0	139,6	$d\bar{u}$
$K^+$	0	$0^-$	1	1/2	+1/2	1	493,7	$u\bar{s}$
$K^0$	0	$0^-$	1	1/2	-1/2	1	497,7	$d\bar{s}$
$K^-$	0	$0^-$	-1	1/2	-1/2	-1	493,7	$\bar{u}s$
$\bar{K}^0$	0	$0^-$	-1	1/2	1/2	-1	497,7	$\bar{d}s$
$\eta^0$	0	$0^-$	0	0	0	0	548,8	$\frac{u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}}{\sqrt{6}}$
$\Delta^{++}$	+1	$3/2^{+}$	0	3/2	+3/2	1	1232	$uuu$
Частица	B	$J^{\lambda}$	S	T	$T_3$	Y	Масса,	Кварковый

							МэВ	состав
$\Delta^+$	+1	$3/2^+$	0	3/2	+1/2	1	1232	<i>uud</i>
$\Delta^0$	+1	$3/2^+$	0	3/2	-1/2	1	1232	<i>udd</i>
$\Delta^-$	+1	$3/2^+$	0	3/2	-3/2	1	1232	<i>ddd</i>
$\Sigma^{*+}$	+1	$3/2^+$	-1	1	+1	0	1382,3	<i>uus</i>
$\Sigma^{*0}$	+1	$3/2^+$	-1	1	0	0	1382	<i>uds</i>
$\Sigma^{*-}$	+1	$3/2^+$	-1	1	-1	0	1387,5	<i>dds</i>
$\Xi^{*0}$	+1	$3/2^+$	-2	1/2	+1/2	-1	1532	<i>uss</i>
$\Xi^{*-}$	+1	$3/2^+$	-2	1/2	-1/2	-1	1532	<i>dss</i>
$\Omega^-$	+1	$3/2^+$	-3	0	0	-2	1672,2	<i>sss</i>

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

Periodic Table of the Elements

1 <b>H</b> Hydrogen 1.008	2 <b>He</b> Helium 4.003																																																															
3 <b>Li</b> Lithium 6.941	4 <b>Be</b> Beryllium 9.012	5 <b>B</b> Boron 10.811	6 <b>C</b> Carbon 12.011	7 <b>N</b> Nitrogen 14.007	8 <b>O</b> Oxygen 15.999	9 <b>F</b> Fluorine 18.998	10 <b>Ne</b> Neon 20.180											18 <b>Ar</b> Argon 39.948	36 <b>Kr</b> Krypton 84.738	54 <b>Xe</b> Xenon 131.294	86 <b>Rn</b> Radon 222.018																																											
11 <b>Na</b> Sodium 22.990	12 <b>Mg</b> Magnesium 24.305	13 <b>Al</b> Aluminum 26.982	14 <b>Si</b> Silicon 28.086	15 <b>P</b> Phosphorus 30.974	16 <b>S</b> Sulfur 32.065	17 <b>Cl</b> Chlorine 35.453	18 <b>Ar</b> Argon 39.948	19 <b>K</b> Potassium 39.098	20 <b>Ca</b> Calcium 40.078	21 <b>Sc</b> Scandium 44.956	22 <b>Ti</b> Titanium 47.867	23 <b>V</b> Vanadium 50.942	24 <b>Cr</b> Chromium 51.996	25 <b>Mn</b> Manganese 54.938	26 <b>Fe</b> Iron 55.845	27 <b>Co</b> Cobalt 58.933	28 <b>Ni</b> Nickel 58.693	29 <b>Cu</b> Copper 63.546	30 <b>Zn</b> Zinc 65.38	31 <b>Ga</b> Gallium 69.723	32 <b>Ge</b> Germanium 72.631	33 <b>As</b> Arsenic 74.922	34 <b>Se</b> Selenium 78.972	35 <b>Br</b> Bromine 79.904	36 <b>Kr</b> Krypton 84.738	37 <b>Rb</b> Rubidium 85.468	38 <b>Sr</b> Strontium 87.62	39 <b>Y</b> Yttrium 88.906	40 <b>Zr</b> Zirconium 91.224	41 <b>Nb</b> Niobium 92.906	42 <b>Mo</b> Molybdenum 95.94	43 <b>Tc</b> Technetium 98.907	44 <b>Ru</b> Ruthenium 101.07	45 <b>Rh</b> Rhodium 102.906	46 <b>Pd</b> Palladium 106.42	47 <b>Ag</b> Silver 107.868	48 <b>Cd</b> Cadmium 112.411	49 <b>In</b> Indium 114.818	50 <b>Sn</b> Tin 118.710	51 <b>Sb</b> Antimony 121.760	52 <b>Te</b> Tellurium 127.6	53 <b>I</b> Iodine 126.905	54 <b>Xe</b> Xenon 131.294	55 <b>Cs</b> Cesium 132.905	56 <b>Ba</b> Barium 137.328	57 <b>Fr</b> Francium 223.019	87 <b>Fr</b> Francium 223.019	88 <b>Ra</b> Radium 226.025	89-103 <b>La</b> Lanthanum 138.905	104 <b>Rf</b> Rutherfordium [261]	105 <b>Db</b> Dubnium [262]	106 <b>Sg</b> Seaborgium [266]	107 <b>Bh</b> Bohrium [264]	108 <b>Hs</b> Hassium [265]	109 <b>Mt</b> Meitnerium [268]	110 <b>Ds</b> Darmstadtium [269]	111 <b>Rg</b> Roentgenium [272]	112 <b>Cn</b> Copernicium [277]	113 <b>Nh</b> Nihonium [278]	114 <b>Fl</b> Flerovium [279]	115 <b>Mc</b> Moscovium [279]	116 <b>Lv</b> Livermorium [279]	117 <b>Ts</b> Tennessine unknown	118 <b>Og</b> Oganesson unknown
																		57 <b>La</b> Lanthanum 138.905	58 <b>Ce</b> Cerium 140.116	59 <b>Pr</b> Praseodymium 140.908	60 <b>Nd</b> Neodymium 144.242	61 <b>Pm</b> Promethium [144.913]	62 <b>Sm</b> Samarium 150.36	63 <b>Eu</b> Europium 151.964	64 <b>Gd</b> Gadolinium 157.25	65 <b>Tb</b> Terbium 158.925	66 <b>Dy</b> Dysprosium 162.500	67 <b>Ho</b> Holmium 164.930	68 <b>Er</b> Erbium 167.259	69 <b>Tm</b> Thulium 168.934	70 <b>Yb</b> Ytterbium 173.055	71 <b>Lu</b> Lutetium 174.967	89 <b>Ac</b> Actinium 227.028	90 <b>Th</b> Thorium 232.038	91 <b>Pa</b> Protactinium 231.036	92 <b>U</b> Uranium 238.029	93 <b>Np</b> Neptunium 237.048	94 <b>Pu</b> Plutonium 244.064	95 <b>Am</b> Americium 243.061	96 <b>Cm</b> Curium 247.070	97 <b>Bk</b> Berkelium 247.070	98 <b>Cf</b> Californium 251.080	99 <b>Es</b> Einsteinium [254]	100 <b>Fm</b> Fermium [257.083]	101 <b>Md</b> Mendelevium [258.1]	102 <b>No</b> Nobelium [259.101]	103 <b>Lr</b> Lawrencium [260]																	
																		Alkali Metal	Alkaline Earth	Transition Metal		Basic Metal	Semimetal	Nonmetal	Halogen	Noble Gas	Lanthanide	Actinide																																				

*Учебное издание*

**Изучение физики элементарных частиц**

Методические рекомендации

***Составитель Свирская Людмила Моисеевна***

Работа рекомендована РИС ЮУрГГПУ

Протокол № 23 от 2021 г.

Редактор Е.М. Сапегина

Технический редактор Т.Н. Никитенко

Издательство ЮУрГГПУ

454080, Челябинск, пр. Ленина, 69

Подписано в печать 02.09. 2021 г.

Формат 84×90/16. Объем 3,1 уч.-изд. л. (8,3 усл. п. л.)

Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ЮУрГГПУ

454080, Челябинск, пр. Ленина, 69