

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки**  
**«Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН»**

УТВЕРЖДАЮ  
директор ИЯФ СО РАН,

академик \_\_\_\_\_ П.В.Логачев

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

**01.04.16 ФИЗИКА АТОМНОГО ЯДРА И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ. КАНДИДАТСКИЙ ЭКЗАМЕН.**

Рабочая программа дисциплины

Направление подготовки

**03.06.01 Физика и астрономия (уровень подготовки кадров высшей квалификации)**

Общая трудоемкость дисциплины: 3 зачетные единицы – **108** часа.

Форма промежуточной аттестации: кандидатский экзамен

Виды деятельности:

Лекции	0	контактная работа обучающихся с преподавателем	8
Семинарские занятия	0		
Самостоятельная работа	56	занятия в активной и интерактивной форме	
Консультации	8		
Зачеты		Экзамены	36

Программа курса «Физика атомного ядра и элементарных частиц. Кандидатский экзамен» составлена в соответствии с требованиями федерального государственного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия (уровень подготовки кадров высшей квалификации).

Курс входит в набор вариативных дисциплин, направленных на подготовку к сдаче экзаменов кандидатского минимума, для аспирантов, обучающихся по направленности (профилю подготовки) 01.04.16 " Физика атомного ядра и элементарных частиц".

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: самостоятельная подготовка студента по программе кандидатского экзамена, консультации с преподавателем, сдача кандидатского экзамена по специальности "Физика атомного ядра и элементарных частиц".

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: очные индивидуальные консультации с преподавателем

Промежуточная аттестация: кандидатский экзамен по специальности «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 часов, в том числе 8 часов индивидуальных консультаций.

Составитель:

д.ф.-м.н. В.П. Дружинин

Рабочая программа

## Содержание

1. Цели освоения дисциплины .....	4
2. Место дисциплины в структуре программы обучения.....	4
3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины .....	4
4. Структура и содержание дисциплины .....	5
5. Образовательные технологии .....	20
6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов и аспирантов .....	20
7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины:.....	20
8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины .....	20
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины .....	21

# «Физика атомного ядра и элементарных частиц. Кандидатский экзамен»

## Рабочая программа дисциплины

### 1. Цели освоения дисциплины

Дисциплина «Физика атомного ядра и элементарных частиц. Кандидатский экзамен» предназначена для закрепления и контроля знаний аспирантов, специализирующихся в области физики элементарных частиц, по следующим разделам: Физика элементарных частиц, ядерная физика, методика экспериментальных исследований в физике высоких энергий, методы регистрации частиц высоких энергий, методика обработки экспериментальных данных, приборы ядерной электроники и другие.

### 2. Место дисциплины в структуре программы обучения

Дисциплина «Физика атомного ядра и элементарных частиц. Кандидатский экзамен» относится к вариативной части блока 1 «Дисциплины (модули)». Аспиранты, приступающие к изучению этой дисциплины, должны пройти предусмотренные программой обучения в аспирантуре курсы и иметь детальное представление о всех представленных в программе дисциплины разделах.

### 3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующих компетенций:

- Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);
- Готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3);
- Способность построения теоретических моделей физических явлений и процессов для решения научных и практических задач (в соответствии с направленностью подготовки) (ПК-1);
- Способность к получению, критическому осмыслению и реферативному изложению научных результатов в области физики (в соответствии с направленностью подготовки) (ПК-2);

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **знать** основные законы и положения включенных в программу кандидатского экзамена разделов физики плазмы
- **уметь** находить и анализировать научную информацию о теоретических моделях физических явлений.

#### 4. Структура и содержание дисциплины

Дисциплина «Физика атомного ядра и элементарных частиц. Кандидатский экзамен» представляет собой полугодовой курс, читаемый в аспирантуре ИЯФ СО РАН. Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 часов.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Промежуточная аттестация (в период сессии) (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа в течение семестра (не включая период сессии)	
				Лекции (кол-во часов)	Индивидуальные консультации с преподавателем (кол-во часов)		
	2	3	4	5	6	7	8
1	Теория атомного ядра Физика элементарных частиц.	1-2	9		1	8	
2	Квантовая теория поля. теория элементарных частиц	3-4	9		1	8	
	Ядерная физика	5-6	9		1	8	
4	Элементарные частицы. Методика экспериментальных исследований. Основные сведения по экспериментальной ядерной физике.	7-8	9		1	8	
5	Общая радиоэлектроника и вычислительная техника	9-10	9		1	8	
6	Приборы ядерной электроники	11-12	9		1	8	
7	Накопление и обработка информации во время эксперимента	13-14	9		1	8	
8	Вопросы дополнительной программы	15-16	9		1	8	
9	Кандидатский экзамен по специальности " Приборы и методы экспериментальной физики "						36
	Итого				8	64	
			108				36

Содержание дисциплины:

Содержание дисциплины совпадает с программой кандидатского экзамена по специальности 01.04.16 "Физика атомного ядра и элементарных частиц". Дисциплина содержит следующие разделы:

## **1. Теория атомного ядра**

### **1.1. Ядерные силы и модели ядра**

1. Общие свойства ядерного вещества. Полная энергия ядер. Энергия связи. Химический потенциал, импульс Ферми (модель Ферми-газа).
2. Нуклон-нуклонные взаимодействия при низких энергиях. Изотопическая симметрия. Тензорные силы. Мезонная теория сильного взаимодействия. Феноменологические нуклон-нуклонные потенциалы. Дейтрон.
3. Оболочечная модель ядра. Средний ядерный потенциал. Последовательность одночастичных уровней. Частично-дырочный формализм. Метод Хартри-Фока. Приближение хаотических фаз. Гигантские резонансы. Зарядово - обменные резонансы. Релятивистские модели среднего поля ядра.
4. Парные взаимодействия сверхпроводящего типа. Модель Бардина - Купера - Шриффера. Преобразование Боголюбова, квазичастицы. Энергетическая щель, энергия основного состояния.
5. Ротационные и вибрационные спектры ядер. Моменты инерции. Электромагнитные переходы и правила отбора. Метод бозонных разложений. Модель взаимодействующих бозонов и фермионов. Высокоспиновые состояния. Статистическое описание сильновозбужденных ядер. Плотность уровней ядра.
6. Ядро как конечная Ферми-система. Метод функций Грина. Аналитические свойства функций Грина. Спектральное разложение. Одночастичные функции Грина для бесконечных и конечных систем. Взаимодействие между квазичастицами. Парные корреляции в формализме функций Грина.
7. Бета - распад ядер. Гамильтониан слабого взаимодействия. Правила отбора для  $\beta$ -переходов.  $ft$ -величины. Гипотеза сохранения векторного тока и частичного сохранения аксиально - векторного тока.  $\mu$ -захват. Несохранение четности в слабом взаимодействии. Описание бета - распада свободного нейтрона. Матричные элементы бета - переходов ядер и их оценки в ядерных моделях. Процессы двойного двух - нейтринного и без - нейтринного бета - распада.
8. Протонный распад, альфа - распад и кластерные распады ядер. Запаздывающие распадные процессы. Деление ядер. Спонтанное деление. Мультимодальное деление. Метод оболочечной поправки Струтинского. Нарушение четности в процессах деления. Трансурановые и сверхтяжелые элементы, остров стабильности сверхтяжелых ядер.

### **1.2. Теория ядерных реакций**

1. Волновые функции непрерывного спектра. Аналитические свойства  $S$ -матрицы. Дисперсионные соотношения. Амплитуда рассеяния.  $T$ -матрица. Вероятность и сечение рассеяния. Оптическая теорема.
2. Рассеяние двух частиц без спина и со спином. Принципы инвариантности и законы сохранения. Одноканальное и многоканальное рассеяние. Борновский ряд. Борновское приближение с плоскими и искаженными волнами.
3. Рассеяние электронов на ядрах. Мультипольное разложение. Упругое и неупругое рассеяние. Радиационные поправки.

4. Оптическая модель взаимодействия нуклонов с ядрами. Мнимая часть потенциала. Прямые ядерные реакции. Реакции выбивания, подхвата, передачи.
5. Рассеяние на системах связанных частиц. Квазиупругое рассеяние. Многократное рассеяние, теория Глаубера. Ядро - ядерные столкновения. Реакции слияния. Рассеяние мезонов на ядрах. Поглощение мезонов.  $\pi$ -мезоатомы. Гиперядра.
6. Малонуклонные системы. Уравнения Фаддеева. Ефимовские состояния. Описание слабосвязанных легких гало - ядер.
7. Рассеяние частиц высокой энергии на ядрах. Форм-факторы. Проявление в ядерных реакциях кварковых и других ненуклонных степеней свободы.

### **1.3. Ядерная астрофизика**

1. Происхождение и эволюция Вселенной. Нуклеосинтез нуклидов в Солнечной системе и Галактике. Физика элементарных частиц и космология. Реликтовые нуклоны, барионная асимметрия и проблема стабильности протона.
2. Солнечная энергия. Основные ядерные реакции на Солнце. Ядерные реакции в звездах в процессе эволюции. Происхождение элементов легче железа. Модели звезд и эволюция звезд до взрыва сверхновой. Белые карлики.
3. Природа взрывов сверхновых. Динамика коллапса. Роль нейтрино в коллапсе сверхновых. S - и R - процессы. Происхождение средних и тяжелых элементов. Космохронология.
4. Нейтринная астрофизика. Солнечные нейтрино и нейтрино от сверхновых. Наблюдение взрыва сверхновой 1987A. Современные детекторы солнечных нейтрино, проблема дефицита солнечных нейтрино. Масса нейтрино и гипотеза нейтринных осцилляций.

## **2. Физика элементарных частиц**

### **2.1. Общий обзор элементарных частиц и их свойства**

1. Таблица элементарных частиц. Квантовые числа частиц. Слабые, электромагнитные и сильные распады частиц. Эмпирические правила отбора.
2. Модель кварков. Изотопическая и SU(3) симметрия сильных взаимодействий; свойства слабых и электромагнитных взаимодействий по отношению к этим симметриям. Стандартная модель электрослабого и сильного взаимодействий. Массовые формулы. Цветовая симметрия сильных взаимодействий. Понятие о квантовой хромодинамике.

### **2.2. Взаимодействия элементарных частиц**

1.  $\pi$ N-рассеяние. Формальная теория рассеяния  $\pi$ -мезонов нуклонами.
2. Рассеяние электронов на нуклонах и электромагнитные форм-факторы нуклонов. Формула Розенблюта.
3. Слабое взаимодействие, электромагнитные и сильные распады частиц. Эмпирические правила отбора. Сохраняющий странность слабый ток. Стандартная модель Вайнберга-Глэшоу - Салама. Нейтральные токи. Z - и W- бозоны, их ширины и моды распада.
4. Физика нейтрино. Уравнение Вейля. Дираковское и майорановское нейтрино. Электронное, мюонное и тау - нейтрино. Масса нейтрино. Гипотеза нейтринных осцилляций. Гипотеза аномального магнитного момента нейтрино. Современные данные по нейтринным осцилляциям.
5. Процессы с большой передачей импульса. Понятие о партонной модели. Кварковый счет. Понятие о квантовой хромодинамике.

### 3. Квантовая теория поля

#### 3.1. Классическая теория поля

1. Лагранжев и гамильтонов формализм в классической теории. Теорема Нетер и сохраняющиеся величины. Тензор энергии-импульса. Тензоры момента и спина. Заряд и вектор тока.
2. Скалярное поле. Уравнение Клейна-Гордона и свойства его решений. Разложение полей по положительно и отрицательно-частотным решениям и плоским волнам. Комплексное (заряженное) поле. Вектор энергии-импульса, тензор момента. Заряд и ток скалярного поля.
3. Векторное поле. Лагранжиан векторного поля. Вектор энергии-импульса, вектор спина, тензор напряженности.
4. Электромагнитное поле. Вектор-потенциал и напряженности. Калибровочные преобразования. Условие Лоренца. Поперечные, продольная и временная компоненты. Вектор энергии-импульса, спин.

#### 3.2. Квантовая теория свободного поля

1. Метод вторичного квантования. Пространство чисел заполнения. Операторы рождения и уничтожения. Пространство Фока. Операторы в представлении вторичного квантования. Шредингеровская и гайзенберговская картины в методе вторичного квантования.
2. Постулаты квантования полевой системы. Операторы рождения и уничтожения. Типы перестановочных соотношений.
3. Квантование скалярного, векторного и спинорного полей. Динамические переменные свободных полей и отвечающие им операторы энергии-импульса, спина, тока, заряда. Положительная определенность энергии. Проекционные операторы и спиновая матрица плотности. Зарядовое сопряжение.
4. Электромагнитное поле. Индефинитная метрика. Условие Лоренца. Динамические переменные. Проекционные операторы, поляризация матрица плотности.
5. Перестановочные функции и различные типы функций Грина. Явный вид особенности на конусе. Нормальное произведение операторов.

#### 3.3. *Описание взаимодействия, матрица рассеяния, свойства симметрии. Метод теории возмущений*

1. Представления Гайзенберга, Шредингера, Дирака (взаимодействия). Общая форма оператора эволюции. Определение матрицы рассеяния. Свойства релятивистской инвариантности, унитарности и причинности. Условие причинности Боголюбова.
2. Лагранжианы различных типов взаимодействия и принципы симметрии. Сильные, электромагнитные и слабые взаимодействия. С, Р, Т - преобразования. Теорема Людерса - Паули. Р - нечетный лагранжиан слабого взаимодействия.
3. Вероятности и сечения. Релятивистски инвариантное определение амплитуды реакции. Инвариантные фазовые объемы. Соотношение унитарности для инвариантных амплитуд рассеяния. Оптическая теорема.
4. Вывод хронологического представления для S-матрицы в теории возмущений. Приведение S-матрицы к нормальной форме. Теорема Вика. Диаграммы Фейнмана. Теорема Фарри.



5. Эффекты низшего порядка теории возмущений: комптон-эффект, фотоэффект, аннигиляция пары, тормозное излучение и рождение пары в поле ядра, формфакторы, естественная ширина линий, позитроний.
6. Мультипольное излучение.

### **3.4. Общий метод перенормировки**

1. Расходимости в низших порядках электродинамики: собственная энергия электрона, поляризация вакуума, вершинная часть. Методы регуляризации и выделение расходимостей. Перенормировка массы и заряда в низшем порядке по константе связи. Размерная регуляризация. Схема минимальных вычитаний.
2. Классификация ренормируемости теории. Примеры перенормируемых теорий. Приводимые и скелетные диаграммы. Степень расходимости произвольной скелетной диаграммы. Перенормировка массы, заряда, волновых функций и вклада произвольной диаграммы. Общая теория R-операции Боголюбова-Парасюка. Операторные разложения и их основные применения.
3. Градиентная инвариантность, тождества Уорда - Такаши и ренормируемость квантовой электродинамики. Перенормировка массы и заряда.
4. Суммирование диаграмм. Уравнение Дайсона - Швингера. Уравнение Бете-Солпитера. Инфракрасные расходимости, их факторизация и устранение при учете испускания мягких квантов.
5. Ренормализационная группа. Инвариантный заряд, функция Гелл - Манна - Лоу. Уравнение Овсянникова - Калана - Симанчика. Аномальные размерности.
6. Вычисление радиационных поправок к закону Кулона и магнитному моменту. Лэмбовский сдвиг.

### **3.5. Квантование неабелевых калибровочных теорий**

1. Метод континуального интегрирования.
2. Квантование неабелевых калибровочных полей. Постулат квантования и вспомогательные поля Фаддеева-Попова. Перенормируемость. Асимптотическая свобода на малых расстояниях. Квантовая хромодинамика.
3. Спонтанное нарушение симметрии. Теорема Голдстоуна, явление Хиггса. Концепция квазисредних Боголюбова.

### **3.6. Элементы аксиоматической квантовой теории поля.**

#### **Аналитические свойства амплитуды**

1. Аксиоматическая формулировка Боголюбова. Радиационные операторы.
2. Формулировка теории поля Лемана - Симанчика - Циммермана. Асимптотические условия. Редукционные формулы.
3. Перекрестная симметрия. Аналитические свойства амплитуды рассеяния по  $\cos \theta$ . Ограничения Фруассара.
4. Аналитические свойства диаграмм Фейнмана и уравнение Ландау для их особенностей (особенности петли, треугольника, квадрата). Представление Мандельштама для четырехугольника.

## **4. Теория элементарных частиц**

### **4.1. Общий обзор элементарных частиц и их свойства**

1. Таблица элементарных частиц: лептоны, мезоны, барионы, мезонные и барионные резонансы,  $W$ ,  $Z$  - бозоны. Квантовые числа частиц: масса, спин, четность, зарядовая четность, изоспин, странность, чарм,  $G$ -четность.

2. Распады и времена жизни частиц. Слабые, электромагнитные и сильные распады. Их характерные времена и ширины распадов. Эмпирические правила отбора на основе сохранения зарядов: электрического, барионного, лептонного, гиперзаряда, странности.

#### **4.2 . Симметрия элементарных частиц**

1. Группа Пуанкаре. Спин и спиральность, дискретные  $C$ ,  $P$  и  $T$  симметрии. Использование спиральности для описания частиц с высокими спинами.

2. Изотопическая инвариантность сильных взаимодействий.  $G$ -четность; правила отбора, вытекающие из сохранения  $G$ -четности.

3. Изотопические свойства электромагнитных взаимодействий. Изотопические соотношения между магнитными моментами гиперонов, Соотношения между амплитудами фоторождения и радиационных распадов резонансов.

4.  $SU(3)$ -симметрия сильных взаимодействий. Классификация элементарных частиц по представлениям  $SU(3)$ . Нарушение  $SU(3)$ -симметрии и массовые формулы. Соотношения между вероятностями различных процессов, вытекающие из  $SU(3)$ -симметрии; распады бозонных и барионных резонансов. Нарушение унитарной симметрии в процессах рассеяния. Частицы с чармом. Введение цвета. Глюонная гипотеза.

5. Электромагнитные и слабые взаимодействия в унитарной симметрии. Соотношения между электромагнитными вершинами и вероятностями радиационных распадов. Электромагнитное расщепление масс. Унитарная структура слабых взаимодействий. Стандартная модель электрослабого взаимодействия.

6. Кварковая модель элементарных частиц. Кварки и их основные свойства, цвет, массы кварков и массовые формулы. Тяжелые  $b$ - и  $t$ - кварки. Электромагнитные и слабые взаимодействия в рамках кварковой модели, оценки вероятностей переходов. Правила Окубо - Цвейга. Глюоны.

#### **4.3. Динамика сильных и электромагнитных взаимодействий**

1.  $\pi N$  и  $\pi K$ -рассеяние: данные опыта, фазовый анализ, резонансы. Дисперсионные соотношения. Уравнение Чу-Лоу, уравнения  $N/D$ -метода. Фоторождение  $\pi$ -мезонов и резонансов на нуклонах. Данные опыта о фоторождении. Векторная доминантность. Рождение адронных резонансов в

$e^+ - e^-$  встречных пучках. Проверка унитарной симметрии,  $\omega$ - $\phi$ -смешивание. Величина отношения  $R$ , область вблизи  $1/\psi$  и новые тяжелые кварки. Дуальность между адронами и кварками в полном сечении  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны.

Данные опыта о рождении частиц в  $\pi N$  и  $NN$ -столкновениях. Дифракционный и мультипериферический механизм рождения. Полюсные члены в амплитуде рождения. Определение характеристик  $\pi\pi$ -взаимодействия методом Чу-Лоу.

2. Рассеяние электронов на нуклонах и электромагнитные формфакторы нуклонов. Экспериментальные данные, формула Розенблюта, дисперсионные соотношения для формфакторов. Глубоконеупругое рассеяние. Партоновая модель, масштабная инвариантность.

3. Токи в физике элементарных частиц: коммутационные соотношения для токов, сохраняющиеся токи, электромагнитные и слабые токи, алгебры токов  $SU(2)\times SU(3)$  и  $SU(3)\times SU(3)$ . Векторная доминантность в электромагнитных взаимодействиях. Частичное

сохранение аксиального тока, приближение мягких пионов, правило сумм Адлера - Вайсбергера. Аномальные тождества Уорда.

4. Квантовая хромодинамика: отклонения от масштабной инвариантности в процессах глубокоэластичного рассеяния электронов и нейтрино на адронах, в  $e^+e^-$  аннигиляции в адроны. Дуальность, метод правил сумм в квантовой хромодинамике, понятие о вакуумных конденсатах.

#### **4.4. Слабые взаимодействия**

1. Универсальное V-A-взаимодействие. Токи с  $\Delta S \neq 0$ , угол Кабиббо. Сохранение странности в нейтральных токах, гипотеза симметрии лептонных и кварковых дублетов. Промежуточные бозоны. Введение чарма, механизм GIM. Модель Глэшоу - Салама - Вайнберга, угол Вайнберга. Нейтральные токи.

2. Следствия V-A универсального взаимодействия при низких энергиях. Октетная схема Кабиббо.  $\nu e$ -рассеяние и  $\mu$ -распад.  $\beta$ -распад и лептонные распады адронов, двойной  $\beta$ -распад двухнейтринного типа. Процессы  $\mu$ -захвата.

3. Нелептонные распады адронов. Правило  $\Delta T = 1/2$  и его обобщение. Сохранение векторного тока, гипотеза PCAC. Соотношение Гольдбергера-Треймана.

4. Распады нейтральных K-мезонов и нарушение CP-инвариантности. Феноменология распадов K-мезонов: нелептонные, лептонные распады. Несохранение CP и T в распадах нейтральных каонов. Интерференционные эффекты в распадах  $K^0$ -мезонов.

5. Физика нейтрино. Взаимодействие нейтрино с нуклонами и ядрами. Три типа нейтрино. Масса нейтрино. Гипотеза нейтринных осцилляций. Нейтринные эксперименты на ускорителях, реакторах, детектирование солнечных нейтрино и нейтрино от взрывов сверхновых. Безнейтринный двойной  $\beta$ -распад ядер.

6. Слабые взаимодействия при высоких энергиях. Нейтринные реакции. Их описание в партонной модели, приближенная масштабная инвариантность.

7. Поиски выхода за рамки стандартной модели: понятия о суперсимметрии, супергравитации, теории суперструн.

#### **4.5. Сильные взаимодействия при высоких энергиях**

1. Обзор экспериментальных данных о рождении и рассеянии частиц при высоких энергиях, поведение полных сечений, дифференциальных сечений, процессы с перезарядкой. Инклюзивные сечения рождения, спектры, множественность. Приближенная масштабная инвариантность.

2. Строгие ограничения на поведение амплитуд рассеяния при высоких энергиях. Ограничение Фруассара, теорема Померанчука.

3. Дифракционные явления при высоких энергиях. Полюса Редже и резонансы. Реджевская асимптотика и мультипериферические процессы. Померон. Эйконалное приближение и модель квазипотенциала. Реджеонная модель для инклюзивных процессов.

4. Процессы с большими  $P_{\perp}$ . Кварковый счет. Применения кварковой модели. Основные представления квантовой хромодинамики.

## **5. Ядерная физика**

### **5.1. Взаимодействие ядерных излучений с веществом**

1. Прохождение заряженных частиц через вещество. Ионизационные потери и их флуктуации. Однократное и многократное рассеяние. Взаимодействие электронов и фотонов с веществом. Излучение Вавилова-Черенкова.
2. Резонансное рассеяние гамма-лучей. Эффект Мессбауэра.
3. Взаимодействие нейтронов с веществом. Замедление нейтронов. Ультрахолодные нейтроны.

### **5.2. Физика атомного ядра**

1. Общие свойства ядерного вещества. Основные характеристики ядер: плотность, заряд, спины ядер, четность, спектры возбуждения, ядерная нестабильность. Свойства ядерных сил, нуклон - нуклонное взаимодействие. Ядерные оболочки. Энергия связи ядер. Изотопический спин. Аналоговые состояния. Гиперядра и барионные резонансы в ядрах.
2. Модели ядра. Капельная модель ядра. Модель Ферми-газа. Одночастичная оболочечная модель. Средний ядерный потенциал. Спин-орбитальная связь. Остаточное взаимодействие. Обобщенная модель ядра. Ротационные и вибрационные уровни. Коллективные эффекты в ядрах. Гигантские резонансы. Зарядово - обменные резонансы. Правила отбора для электромагнитных и бета-переходов. Квазичастичная модель ядра, парные корреляции сверхпроводящего типа. Плотность низколежащих состояний в ядрах.
3. Бета-распад. Элементарная теория бета - распада. Правила отбора и форма бета - спектра, корреляционные характеристики. Разрешенные и запрещенные бета - переходы. Электронный захват. Нарушение четности в слабых взаимодействиях. Бета - распад нейтрона. Двойной двух- нейтринный и без- нейтринный бета - распад.
4. Испускание ядрами протонов, альфа - распад, деление, кластерные распады
5. ядер. Запаздывающие процессы распада ядер. Нарушение четности при делении.
6. Спонтанно делящиеся изомеры. Трансурановые и сверхтяжелые элементы.
7. Взаимодействие ядер с электромагнитным излучением. Мультипольные переходы и правила отбора для гамма-излучения. Внутренняя конверсия. Фотоядерные реакции. Кулоновское возбуждение ядер. Гигантские мультипольные резонансы.

### **5.3. Ядерные реакции**

1. Основы теории ядерных реакций. Законы сохранения. Принцип детального равновесия. Каналы реакции. Матрицы рассеяния. Оптическая модель взаимодействия нуклонов с ядрами.
2. Реакции с медленными нейтронами. Резонансный захват нейтронов. Формула Брейта - Вигнера. Рассеяние нейтронов ядрами. Рассеяние нейтронов кристаллами. Отражение и поляризация нейтронов. Дифракционное рассеяние. Нейтронная спектроскопия. Ультрахолодные нейтроны.
3. Прямые ядерные реакции. Неупругое рассеяние. Реакции передачи. Ядерные реакции перезарядки. Зарядово - обменные резонансы.
4. Исследование ядра с помощью быстрых электронов, мезонов, протонов. Мезоатомы. Образование и свойства гиперядер. Кварки в ядрах.

### **5.4. Ядерная астрофизика**

1. Физика элементарных частиц и космология. Ранняя Вселенная.

Происхождение легчайших элементов, барионная асимметрия Вселенной и проблема стабильности протона. Нуклеосинтез элементов в звездах. Основные ядерные реакции - источники энергии Солнца. Ядерные реакции в звездах в процессе эволюции. Модели звезд и эволюция звезд до взрыва сверхновой.

2. Природа сверхновых. Механизм взрыва сверхновой. Роль нейтрино в коллапсе сверхновых. Образование нуклидов в S - и R - процессах. Происхождение средних и тяжелых элементов. Космохронология.

2. Нейтринная астрофизика. Солнечные нейтрино. Современные детекторы солнечных нейтрино, проблема дефицита солнечных нейтрино, масса нейтрино и гипотеза нейтринных осцилляций. Наблюдение нейтрино от сверхновых. Поиски темной материи во Вселенной.

### **5.5. Физика элементарных частиц и их взаимодействий**

1. Массы и квантовые числа элементарных частиц. Правила отбора для слабых, электромагнитных, сильных распадов.

2. Изотопические свойства сильных взаимодействий. SU(3)-симметрия сильных взаимодействий. Массовые формулы. Модель кварков.

3. NN и  $\pi$ N-рассеяние. Фазовый анализ. Рассеяние электронов на нуклонах и ядрах. Электромагнитные формфакторы нуклонов и ядер.

4. Рассеяние быстрых нуклонов на ядрах. Теория Глаубера.

5. Слабое взаимодействие. Модель Вайнберга - Глэшоу-Салама. Нейтральные токи. Сохранение векторного тока, гипотеза частичного сохранения аксиально-векторного тока и их следствия. Наблюдение W- и Z- бозонов.

6. Физика нейтрино. Дираковское и майорановское нейтрино. Масса нейтрино. Гипотеза нейтринных осцилляций. Процессы двойного двух - нейтринного и без - нейтринного бета - распада ядер.

7. Глубоконеупругие процессы. Партоново - кварковая структура адронов. Основные положения квантовой хромодинамики.

## **6. Элементарные частицы**

### **6.1. Сильные взаимодействия**

1. Квантовые числа элементарных частиц и резонансов.

2. Дискретные симметрии. Пространственное отражение, зарядовое сопряжение, обращение времени, CPT-теорема.

3. Свойства внутренней симметрии. Изотопическая инвариантность. Зарядовая симметрия и G-четность. Схема Гелл-Манна - Нишиджимы. Унитарная симметрия и классификация частиц и резонансов по мультиплетам. Массовая формула Гелл-Манна - Окубо. Модель кварков. Квантовая хромодинамика.

4. Столкновения элементарных частиц. Нуклон-нуклонные столкновения при малых энергиях. Дейтрон. Упругое рассеяние  $\pi$  и K-мезонов и нуклонов на нуклонах. Поляризационные явления. Неупругие процессы. Образование резонансных состояний в процессах столкновения. Формула Брейта-Вигнера. Общие свойства рассеяния при высоких энергиях.

5. Основные представления теории комплексных моментов. Теорема Померанчука.

6. Инклюзивные процессы. Процессы на встречных протон - протонных и протон - антипротонных пучках.

### **6.2. Электромагнитные взаимодействия**

1. Принцип минимальности электромагнитного взаимодействия. Правила отбора по изотопическому спину. Процессы фоторождения и электророждения.
2. Рассеяние электронов и мю-мезонов нуклонами и ядрами. Электромагнитные формфакторы. Магнитные моменты элементарных частиц.
3. Проверка применимости квантовой электродинамики при высоких энергиях.
4. Мезоатомы.
5. Процессы на встречных  $e^- - e^-$  и  $e^+ - e^+$  пучках.

### **6.3. Слабые взаимодействия**

1. Бета-распад. Форма спектров. Корреляционные эксперименты в бета - распаде. Бета - распад нейтрона. К-захват. Мю-захват. Разрешенные и запрещенные переходы. Правила отбора Ферми и Гамова-Теллера. Несохранение пространственной четности в слабых взаимодействиях.
2. Универсальная теория слабых взаимодействий. Гипотеза о сохранении векторного тока. Двухкомпонентное нейтрино. Электронное, мюонное и тау - нейтрино. Сохранение лептонного заряда.
3. Распады с изменением странности. Правила  $T=1/2$  и  $\Delta Q=\Delta S$ .
4. Унитарная симметрия в слабых взаимодействиях и угол Кабиббо.
5. Физика  $K^0$ -мезонов. Интерференционные явления с нарушением CP- инвариантности в распадах  $K^0$ -мезонов.
6. Нейтринные эксперименты на ускорителях при высоких и низких энергиях, реакторах, детектирование солнечных, атмосферных нейтрино и нейтрино от взрывов сверхновых, эксперименты по поискам нейтринных осцилляций.
7. Модель Глэшоу - Салама - Вайнберга и нейтральные токи в слабых взаимодействиях. Механизм Хиггса и массы частиц. Наблюдение Z- и W - бозонов в экспериментах на ускорителях.

### **6.4. Физика атомного ядра**

1. Ядерные силы и общие свойства ядерного вещества. Энергия связи. Модели ядра. Одночастичная оболочечная модель. Обобщенная модель ядра. Ротационные и вибрационные уровни. Модель Ферми-газа. Квазичастичная модель ядра. Квазичастичные и низколежащие возбужденные состояния ядер.
2. Взаимодействия лептонов и адронов высокой энергии с ядрами. Электромагнитные формфакторы ядер. Теория Глаубера для взаимодействий адронов с ядрами.
3. Фотоядерные процессы. Гигантские мультипольные резонансы. Реакции перезарядки. Бета - распад ядер. Аналоговый и гамов - теллеровский резонансы.
4. Особенности рождения пионов и каонов при взаимодействии протонов с ядрами. Гиперядра. Пи - и K - мезоатомы

## **7. Методика экспериментальных исследований**

### **7.1. Методы получения**

1. Ускорители заряженных частиц. Линейные ускорители. Циклические ускорители. Принцип автофазировки. Жесткая фокусировка. Накопительные кольца и ускорители на

встречных пучках. Коллективный метод ускорения. Методы фокусировки пучков и сепарация частиц.

2. Ядерные реакторы и их типы. Получение тепловых и ультрахолодных нейтронов.

### **7.2. Детекторы элементарных частиц**

1. Газоразрядные детекторы. Счетчики Гейгера-Троста, пропорциональные счетчики, ионизационные камеры. Сцинтилляционные счетчики.

2. Черенковские счетчики. Полупроводниковые счетчики.

3. Трековые детекторы с пленочным съемом информации. Камера Вильсона, пузырьковые камеры, искровые и стримерные камеры. Метод ядерных фотоэмульсий.

4. Беспленочные камеры. Пропорциональные и дрейфовые камеры. Годоскопические системы из сцинтилляционных и черенковских счетчиков.

### **7.3. Методы измерений и математической обработки данных**

1. Методы спектрометрических измерений. Магнитные спектрометры. Спектрометрические тракты измерений с полупроводниковыми и сцинтилляционными счетчиками с выводом данных на ЭВМ. Методы изображения многомерных спектров.

2. Дозиметрические измерения. Допустимые потоки излучений. Способы защиты.

3. Методы автоматической обработки фотографий трековых приборов. Механико-оптические и электронные системы сканирования с выводом данных на ЭВМ.

4. Физические установки с автоматическим выводом данных на ЭВМ. Типы накопительных устройств. Использование разных классов ЭВМ для приема, предварительной обработки и накопления информации, а также для контроля и управления.

### **7.4. Методы обработки экспериментальных данных**

1. Основные понятия математической статистики. Теория статистических оценок и проверки гипотез. Метод максимального правдоподобия. Планирование эксперимента.

2. Системы математических программ обработки и анализа физических результатов. Геометрическая реконструкция пучков частиц. Система распознавания определенного класса событий. Анализ физических результатов.

## **8. Основные сведения по экспериментальной ядерной физике**

### **8.1. Основные свойства элементарных частиц**

1. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях; уравнения движения.

2. Взаимодействие заряженных частиц с веществом. Ионизационные потери и пробег тяжелых заряженных частиц; прохождение бета-частиц через вещество. Взаимодействие нейтральных частиц с веществом.

3. Элементарные частицы и ядра. Основные характеристики ядер. Физические свойства частиц: заряды, масса, спин, четность, изоспин. Времена жизни частиц.

### **8.2. Методы регистрации элементарных частиц**

1. Методы регистрации заряженных и нейтральных частиц.

2. Газонаполненные счетчики и их типы. Ионизационные камеры. Газонаполненные камеры с оптическим методом съема информации. Искровые и стримерные камеры.

3. Газонаполненные камеры с электронными методами съема информации. Многопроволочные искровые, пропорциональные и дрейфовые камеры.
4. Сцинтилляционные и черенковские детекторы. Фотоумножители.
5. Полупроводниковые детекторы. Позиционно-чувствительные детекторы.
6. Регистрация частиц с помощью пузырьковых камер.

### **8.3. Статистическая обработка результатов измерений**

1. Основы теории вероятностей. Случайные величины. Основные законы распределения случайных величин: биномиальное распределение Пуассона, распределение Гаусса.
2. Основы теории ошибок измерений.
3. Основы теории просчетов регистрирующих систем.

## **9. Общая радиоэлектроника и вычислительная техника**

### **9.1. Методы расчета электрических цепей и схем**

1. Анализ линейных электрических цепей. Эквивалентные схемы. Законы Кирхгофа, теорема об эквивалентном генераторе, метод узловых потенциалов, метод контурных токов. Четырехполюсники.
2. Анализ электрических сигналов. Дельта-функция и ступенчатая функция. Преобразование Фурье.
3. Передача сигналов через линейные системы. Дифференциальные уравнения, описывающие процессы в электрических цепях. Импульсная характеристика линейной системы. Интеграл суперпозиции. Формула свертывания. Передаточная функция. Переходные процессы в длинных цепях.
4. Основы операционного исчисления. Преобразование Лапласа.
5. Основы алгебры логики. Составление логических электронных схем.

### **9.2. Полупроводниковые приборы**

1. Физические принципы работы полупроводниковых приборов. Их классификация.
2. Полупроводниковые диоды. Принцип действия, основные характеристики, параметры и режимы работы. Разновидности диодов: импульсные диоды, диоды с накоплением заряда, туннельные диоды, стабилитроны, светоизлучающие диоды и др. Примеры применения.
3. Биполярные транзисторы. Принцип действия, основные характеристики, параметры и режимы работы. Схемы включения, эквивалентные схемы, работа в линейном и ключевом режимах. Разновидности триодов. Примеры их применения.
4. Полевые транзисторы. Принцип действия, разновидности полевых транзисторов. Основные характеристики, параметры и режимы работы. Примеры применения.
5. Другие разновидности полупроводниковых приборов: динистор, тиристор, однопереходный транзистор и др. Их основные характеристики и параметры. Примеры применения.

### **9.3. Интегральные схемы**

1. Гибридные и монолитные интегральные схемы. Монолитные интегральные схемы на основе биполярных и МДП-транзисторов, их особенности. Технология изготовления интегральных схем различных типов.



2. Аналоговые интегральные схемы: дифференциальные и операционные усилители, регуляторы напряжения, преобразователи код-аналог и аналог-код. Их основные параметры, примеры применения.
3. Логические интегральные схемы. Их классификация по схемотехническому исполнению. Основные параметры. Быстродействие схем. Система логических элементов. Типы триггеров. Примеры применения.
4. Интегральные схемы со средней степенью интеграции: счетчики, регистры, коммутаторы, дешифраторы, сумматоры и др.
5. Интегральные схемы с большой степенью интеграции: сложные логические устройства, запоминающие устройства, микропроцессоры и др. Пути дальнейшего повышения степени интеграции.

#### ***9.4. Электронные измерительные приборы***

1. Классификация измерительных приборов; их классы точности.
2. Электронно-лучевые осциллографы. Их основные блоки. Скоростные осциллографы, стробоскопические осциллографы, осциллографы на запоминающих трубках.
3. Измерительные генераторы, их типы и характеристики.
4. Цифровые приборы для измерения аналоговых величин (напряжения, тока, частоты и др.). Их принцип действия и устройство.

#### ***9.5. Основные сведения по электронным цифровым вычислительным машинам***

1. Принципы построения и работы электронных цифровых вычислительных машин. Процессоры. Их состав и функции.
2. Запоминающие устройства. Их функции. Оперативные и внешние запоминающие устройства. Устройства ввода и вывода информации.
3. Непосредственная связь ЭВМ с измерительным оборудованием.
4. Устройства для оперативного взаимодействия оператора и ЭВМ. Дисплей.
5. Большие, малые и микро-ЭВМ. Состав и характеристики ЭВМ.
6. Основы программного обеспечения ЭВМ. Операционные системы. Их функции. Машинно-ориентированные и проблемно-ориентированные языки программирования.

#### ***9.6. Надежность радиоэлектронных устройств***

1. Основные понятия теории надежности.
2. Причины отказов аппаратуры.
3. Оценка надежности разрабатываемых устройств.
4. Методы повышения надежности.

### **10. Приборы ядерной электроники**

#### ***10.1. Задачи электронной аппаратуры в экспериментальной ядерной физике***

1. Обобщенная блок-схема ядерно-физического эксперимента.
2. Специфика экспериментов в области физики атомного ядра (низкие энергии) и элементарных частиц (высокие энергии).
3. Логическая и спектрометрическая информация, получаемая с детекторов.
4. Количество информации, получаемой в экспериментах различных типов. Методы предварительного отбора поступающей информации.

### **10.2. Устройства для измерения интервалов времени**

1. Характеристика детекторов с точки зрения получения временной информации.
2. Разброс импульсов по времени возникновения. Схемы временной привязки.
3. Способы измерения интервалов времени. Точность, разрешающая способность и диапазон измерения.

### **10.3. Устройства для измерения амплитуд импульсов**

1. Характеристики детекторов с точки зрения получения амплитудной информации.
2. Шумы и методы борьбы с ними.
3. Спектрометрические усилители, их характеристики. Формирование импульсов для получения оптимального отношения сигнал/шум. Борьба с наложениями импульсов.
4. Способы измерения амплитуд импульсов. Методы повышения точности и скорости преобразования. Методы стабилизации спектрометрического тракта. Амплитудные анализаторы, их характеристики.

### **10.4. Логические схемы регистрации и отбора данных**

1. Счетные схемы. Типы схем, их быстродействие.
2. Схемы совпадений. Принцип работы, кратность совпадений, разрешающее время, эффективность. Случайные совпадения. Антисовпадения, их эффективность.
3. Другие типы логических схем: формирователи, линии задержки, дискриминаторы, схемы пропускания, разветвители и др. Их характеристики и примеры применения.
4. Быстрые процессоры для предварительного отбора событий.

### **10.5. Электронные устройства для регистрации координат частиц**

1. Годоскопические системы и методы регистрации информации в них.
2. Электронные методы считывания информации с искровых камер со сплошными электродами (телевизионный, акустический и т.д.).
3. Методы считывания информации с искровых камер с проволочными электродами, с пропорциональных камер и с дрейфовых камер.

### **10.6. Накопление и обработка информации во время эксперимента**

1. Типы накопительных устройств, используемых в ядерной физике. Накопление многомерной информации. Методы увеличения эффективного числа каналов. Наблюдение зарегистрированной информации. Методы изображения многомерных спектров.
2. Непосредственное использование ЭВМ разных классов в процессе эксперимента для приема, предварительной обработки и накопления информации, а также для контроля и управления ходом эксперимента.

### **10.7. Автоматизация обработки информации, зарегистрированной на фотопленке**

1. Методы обработки информации, полученной с фильмовых камер. Полуавтоматические системы обработки. Принцип действия. Функции оператора в системах различных типов.
2. Системы с автоматическим сканированием по кадру. Механико-оптические и электронные системы сканирования. Функции ЭВМ при автоматической обработке информации, зарегистрированной на фотопленке.

3. Стандарт КАМАК. Назначение и принципы стандарта КАМАК. Исполнительные блоки. Однокаркасная система. Организация работы. Назначение и устройство контроллера. Организация работы каркаса при наличии в нем нескольких управляющих блоков (контроллеров). Многокаркасная ветвевая система. Устройство контроллеров. Основы программного обеспечения аппаратуры в стандарте КАМАК. Другие стандарты (NIM и т.д.).

## VII. Вопросы дополнительной программы

1. Атомная система единиц, шкала расстояний и энергий, роль соотношения неопределенностей, примеры объектов в физике высоких энергий, эффективное сечение и связь с длиной пробега. Фундаментальные константы и размерности.
2. Точечные частицы – кварки, массы, ароматы, квантовые числа, цвет, конфайнмент.
3. Точечные частицы – лептоны, сохранение лептонного числа, роль нейтрино. Поколения кварков и лептонов. Значение первого поколения. Реликтовые нейтрино.
4. Векторные бозоны – переносчики взаимодействий. Свойства фотона. Роль  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$  - бозонов в слабых взаимодействиях. Глюоны и их свойства.
5. Составные частицы – мезоны. Мезонные мультиплеты. Псевдоскалярные и векторные мезоны. Изотопическая инвариантность.  $SU(3)$  – симметрия. Смешивание кварков и мезонов. Матрица СКМ.
6. Векторные кварконии. Особая роль векторных мезонов на встречных  $e^+e^-$  пучках.
7. Хиггсовский бозон. Его роль. Квантовые числа. Экспериментальное изучение.
8. Виды взаимодействия элементарных частиц. Квантовая электродинамика. диаграммы Фейнмана, постоянная тонкой структуры, теория возмущений, поляризация вакуума, дальное действие.
9. Слабое взаимодействие, константа Ферми, бета-распад.  $W^-$  бозон, слабые процессы при высокой энергии,  $Z$  – бозон, число поколений нейтрино, смешивание нейтрино, диаграммы слабых процессов, заряженные и нейтральные токи.
10. Сильное взаимодействие, КХД, константа сильного взаимодействия, экзотические адроны, правило Цвейга. Рождение адронов на  $e^+e^-$  пучках. Великое объединение. Поиск распада протона.
11. Стандартная модель. Основные достижения. Существующие проблемы – несимметрия вещества и антивещества во Вселенной. Природа тёмной материи. Роль гравитации в физике частиц. Гипотеза большого взрыва, связь космологии и физики частиц.
12. Основные процессы на встречных электрон-позитронных пучках. Квантовые числа. Что даёт поляризация пучков. Значение полных адронных сечений. Рождение и  $D$ ,  $B$  – мезонов.  $e^+e^-$  фабрики.
13. Физика тау-лептона, лептонная универсальность, распады тау-лептона, гипотеза CVC.
14. Кварковый состав и квантовые числа барионов. Барионные мультиплеты. Рождение нуклонов и барионов на встречных пучках. Нуклонные формфакторы. Рассеяние электронов на ядрах.
15. Основные дискретные симметрии –  $P$ ,  $C$ ,  $T$ ,  $CP$ ,  $CPT$ . Нарушение  $CP$ -инвариантности в  $K$  и  $B$  мезонах.  $CPT$  теорема.
16. Взаимодействие заряженных частиц с веществом, ионизационные потери, многократное рассеяние, ядерное поглощение, электромагнитные ливни.
17. Взаимодействие гамма-квантов с веществом. Фотоэффект, комптон-эффект, рождение пар, ливни. Радиационная длина. Взаимодействие нейтральных адронов – нейтрона,  $K_L$  – мезона с веществом.

18. Основные экспериментальные методики. Сцинтилляторы, калориметры криогенные и на тяжёлых кристаллах. Трековые, полупроводниковые, фотонные детекторы, методы идентификации частиц, двухфазные детекторы.
19. Тёмная материя и тёмная энергия. Возможная природа. Экспериментальные методы изучения проблемы.
20. Космические лучи как метод изучения физики частиц. Происхождение и состав. Спектр частиц. Крупнейшие в мире детекторы космических лучей.

#### **5. Образовательные технологии**

Основным методом обучения по курсу является самостоятельная подготовка аспирантов по вопросам, изложенным в программе, с регулярным обсуждением изученных вопросов на индивидуальных консультациях с преподавателем.

#### **6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов и аспирантов**

Самостоятельная работа аспирантов поддерживается учебниками и учебно-методическими пособиями, приведенными в списке основной и дополнительной литературы, а также обзорными статьями в научных журналах

Текущий контроль успеваемости происходит на индивидуальных консультациях.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра в рамках сдачи кандидатского экзамена по специальности 01.04.16 “Физика атомного ядра и элементарных частиц”.

#### **7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины:**

**Образцы вопросов для подготовки к экзамену** – вопросы формулируются идентично названиям подразделов программы курса. В экзаменационные билеты включается по два вопроса из основной и дополнительной программы кандидатского экзамена.

#### **8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

##### **Основная литература**

1. О. Бор, Б. Моттelson. Структура атомного ядра. Т.1- 2. Мир, М.1971, 1977.
2. И. Айзенберг, В.Грайнер. Микроскопическая теория ядра. Атомиздат, М., 1976.
3. А.Б. Мигдал. Теория конечных ферми-систем и свойства атомных ядер. Наука, М., 1983.
4. В.Г. Соловьев. Теория сложных ядер. Наука, М., 1971.
5. Ж.П. Блейзо, Ж. Рипка, Квантовая теория конечных систем. Феникс. Киев. 1998.
6. Дж. Тейлор, Теория рассеяния. Мир, М., 1976.
7. А.И. Базь, Я.Б. Зельдович, А.М. Переломов. Рассеяние, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике. Наука, М., 1971.
8. Ф. Клоуз. Кварки и партонны. Мир, М., 1982.
9. В.Б. Беляев. Лекции по теории малочастичных систем. Энергоатомиздат. М., 1986.
10. С.Г. Кадменский, В.И. Фурман. Альфа - распад и родственные ядерные реакции. Энергоатомиздат. М., 1985.

11. Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. Релятивистская квантовая теория. Часть 2. Наука, М., 1971, Гл.14 - 15.
12. Л.Б. Окунь. Слабые взаимодействия элементарных частиц. Физматгиз, М., 1963; Лептоны и кварки. Наука. М., 1983.
13. Г. Челлен. Физика элементарных частиц. Наука. М., 1966, Гл.4-5.
14. С. Вайнберг. УФН, 1976, т.118, с.505.
15. Р. Блин-Стойл. Фундаментальные взаимодействия и атомное ядро. Мир. М., 1976, Гл.3-4.
16. И.В. Андреев. Хромодинамика и жесткие процессы при высоких энергиях. Наука, М., 1981.
17. Р. Фейнман. Взаимодействие фотонов с адронами. Мир, М., 1975.
18. Ф. Боум, П. Фогель. Физика массивных нейтрино. Мир, М., 1990.
19. "Ядерная астрофизика", сборник статей под ред. Ч. Барнса, Д. Клейтона, Д. Шрамма, Мир, М., 1986.
20. Т. Эрикссон, В. Вайзе. Пионы и ядра. Наука. М., 1986.

#### ***9. Материально-техническое обеспечение дисциплины***

Специальное материально-техническое оборудование для изучения дисциплины не требуется.