

**Правительство Российской Федерации**  
**Санкт-Петербургский государственный университет**

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**

учебной дисциплины

**Кварковая структура адронов**

Quark structure of hadrons

**Язык обучения**

русский

Трудоёмкость (границы трудоёмкости) в зачетных единицах: 4

Регистрационный номер рабочей программы: \_\_\_\_\_

Санкт-Петербург

2015

## Раздел 1. Характеристики учебных занятий

### 1.1. Цели и задачи учебных занятий

Ознакомление студентов с современными представлениями о кварковой структуре адронной материи.

### 1.2. Требования к подготовленности обучающегося к освоению содержания учебных занятий (пререквизиты)

Для освоения дисциплины необходимо знание ядерной физики и квантовой механики в объеме, типичном для бакалавриата физико-математической направленности.

### 1.3. Перечень результатов обучения (learning outcomes)

- Знание и понимание принципиальных основ кварковых моделей, лежащих в основе современной классификации элементарных частиц и служащих для описания сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий адронов.
- Умение выполнять оценочные расчеты в рамках конституентной, аддитивной и партонной моделях.

### 1.4. Перечень активных и интерактивных форм учебных занятий

Информационная лекция – последовательное изложение материала в дисциплинарной логике, осуществляемое преимущественно вербальными средствами (монолог преподавателя) (30 часов).

## Раздел 2. Организация, структура и содержание учебных занятий

### 2.1. Организация учебных занятий

#### 2.1.1 Основной курс

Трудоёмкость, объёмы учебной работы и наполняемость групп обучающихся																		
Период обучения (модуль)	Контактная работа обучающихся с преподавателем											Самостоятельная работа				Объём активных и интерактивных форм учебных занятий	Трудоёмкость	
	лекции	семинары	консультации	практические занятия	лабораторные работы	контрольные работы	коллоквиумы	текущий контроль	промежуточная аттестация	итоговая аттестация	под руководством преподавателя	в присутствии преподавателя	сам.раб. с использованием методических материалов	текущий контроль (сам.раб.)	промежуточная аттестация (сам.раб.)			итоговая аттестация (сам.раб.)
<b>ОСНОВНАЯ ТРАЕКТОРИЯ</b>																		
<b>очная форма обучения</b>																		
Семестр 2	32		2						2				43		29		108	4
	2-10		2-10						2-10				2-10		2-10			
<b>ИТОГО</b>	<b>32</b>		<b>2</b>						<b>2</b>				<b>43</b>		<b>29</b>		<b>108</b>	<b>4</b>

Формы текущего контроля успеваемости, виды промежуточной и итоговой аттестации			
Период обучения (модуль)	Формы текущего контроля успеваемости	Виды промежуточной аттестации	Виды итоговой аттестации (только для программ итоговой аттестации и дополнительных образовательных программ)
<b>ОСНОВНАЯ ТРАЕКТОРИЯ</b>			
<b>очная форма обучения</b>			
Семестр 2		экзамен	

## 2.2. Структура и содержание учебных занятий

**Основной курс    Основная траектория    Очная форма обучения**

Период обучения (модуль): **Семестр 2**

№ п/п	Наименование темы (раздела, части)	Вид учебных занятий	Количество часов
1	<b>Систематика элементарных частиц.</b>	лекции	6
	<p>1. <i>Классификация элементарных частиц.</i>  Понятие элементарности.  Классификация элементарных частиц в зависимости от типа взаимодействия.</p> <p>2. <i>Симметрии и сохраняющиеся квантовые числа.</i>  Квантовые числа, обусловленные непрерывными симметриями пространства-времени: масса, спин.  Квантовые числа, обусловленные дискретными симметриями.  Пространственная четность. Зарядовая четность. Квантовые числа, обусловленные внутренними симметриями. <math>U(1)</math> - симметрия и сохранение электрического, барионного и лептонного зарядов.  Странность и слабые распады странных адронов. <math>SU(2)</math> - симметрия и изотопический спин. Сохранение изоспина в сильных взаимодействиях. Зарядовые и изоспиновые функции для системы из двух частиц. <math>G</math>-четность. <math>SU(3)</math> - симметрия и унитарный спин.  Унитарные супермультиплеты</p>		

	элементарных частиц.		
2	<p><b>Конституентная кварковая модель и унитарная симметрия.</b></p> <p>SU(n) - симметрия как максимально возможная симметрия системы из n барионов. Размерность неприводимых представлений SU(3)-группы и их связь с размерностями унитарных мультиплетов адронов. Кварки как состояния фундаментального триплета SU(3)-группы. Основные постулаты кварковой модели. Кварковый состав мезонов и барионов. Нарушение SU(3)-симметрии и смешивание синглетных и октетных состояний. Экспериментальные доказательства дробности зарядов кварков. Дальнейшее развитие кварковой модели: SU(6)-симметрии. Кварки с цветом и ароматом. Цветовая симметрия. Экспериментальные подтверждения существования цвета. Цветные кварки и квантовая хромодинамика. Глюоны. SU(3)-симметрия и цветная кварковая структура барионов и мезонов. Асимптотическая свобода и конфаймент кварков в адронах.</p>	лекции	6
3	<p><b>Массы и магнитные моменты адронов.</b></p> <p>Вывод массовых формул для мезонов и барионов. Тяжелые кварконии. Масса возбужденных состояний кваркониев в рамках потенциальной модели. Кварковая модель и магнитные моменты адронов. Вычисление магнитных моментов барионов из основного октета.</p>	лекции	4
4	<p><b>Лептон-нуклонные взаимодействия и партонная модель Фейнмана.</b></p>	лекции	8

	<p>1. <i>Упругое рассеяние электронов на нуклонах.</i></p> <p>Кинематика упругого рассеяния при высоких энергиях. Вычисление дифференциального сечения рассеяния электрона на точечном протоне в первом порядке теории возмущений. Дифференциальное сечение расеяния электронов на протоне с распределенным зарядом. Форм-факторы нуклонов. Рассеяние электронов на реальном протоне. Формула Розенблюта. Закон скейлинга для электрического и магнитного форм-факторов нуклонов.</p> <p>2. <i>Глубоко неупругое рассеяние лептонов на нуклонах.</i></p> <p>Кинематика неупругого рассеяния. Вывод инклюзивного сечения глубоко неупругого сечения <math>IN</math>-рассеяния. Построение адронного тензора. Структурные функции нуклонов. Скейлинг Бьеркена. Партонная модель Фейнмана. Связь структурных функций нуклона с партонной структурой нуклона. Соотношение Каллана-Гросса. Валентные и морские кварки. Правила сумм. Импульсные распределения кварков и глюонов в адронах.</p>		
5	<p><b>Адрон-адронные взаимодействия и аддитивная кварковая модель.</b></p> <p>1. <i>Описание адронных процессов при высоких энергиях.</i></p> <p>Эксклюзивное и инклюзивное описание процессов множественного рождения. Инвариантные инклюзивные сечения. Структурные функции, функции плотности, корреляционные функции. Инклюзивные правила сумм. Кинематические переменные для описания множественных процессов.</p> <p>2. <i>Аддитивная кварковая модель (АКМ) и мягкие адрон-адронные взаимодействия.</i></p>	лекции	6

	<p>Основные постулаты АКМ. Интерпретация мягких адрон-адронных взаимодействий в рамках АКМ. Состав и импульсные распределения адронов, рождаемых в адрон-адронных взаимодействиях при высоких энергиях. Правила кварковой статистики и отношения множественности вторичных мезонов и барионов в центральной и фрагментационной областях спектра.</p> <p><i>3. Адрон-адронные взаимодействия и партонная модель.</i></p> <p>Мягкие взаимодействия и их интерпретация в рамках партонной модели. Пространственно-временная структура адронов. Жесткие адрон-адронные взаимодействия. Струйное рождение адронов. Угловое распределение струй и партон-партонное взаимодействие. Определение структурных функций адронов в экспериментах по струйному рождению адронов.</p>		
6	<p><b>Проявление кварковой структуры адронов в адрон-ядерных взаимодействиях.</b></p> <p>Классификация адрон-ядерных взаимодействий. Общие закономерности адрон-ядерных взаимодействий и их интерпретация в рамках АКМ. Отношение выходов барионов в протон-ядерных и протон-протонных взаимодействиях в центральной и фрагментационной областях спектра.</p>	лекции	2

### Раздел 3. Обеспечение учебных занятий

#### 3.1. Методическое обеспечение

##### 3.1.1 Методические указания по освоению дисциплины.

Для освоения дисциплины студенту предоставляется список задач, предлагаемых преподавателем по каждому разделу дисциплины, обязательное решение которых является условием допуска к экзамену.

### 3.1.2 Методическое обеспечение самостоятельной работы.

Для самостоятельной работы студенты должны обеспечиваться перечнем заданий для самостоятельной работы и контрольными вопросами.

Контрольные вопросы по каждому разделу дисциплины:

1. Квантовые числа адронов, обусловленные непрерывными симметриями. Квантовые числа адронов, обусловленные дискретными симметриями. Квантовые числа адронов, обусловленные внутренними  $U(1)$ ,  $SU(2)$  и  $SU(3)$  симметриями.
2. Кварки как состояния фундаментального триплета  $SU(3)$ -группы. Основные постулаты кварковой модели. Кварковый состав мезонов и барионов. Цветные кварки и квантовая хромодинамика. Глюоны.  $SU(3)$ -симметрия и цветная кварковая структура барионов и мезонов. Асимптотическая свобода и конфаймент кварков в адронах.
3. Массовые формулы для мезонов и барионов. Тяжелые кварконии. Масса возбужденных состояний кваркониев в рамках потенциальной модели. Вычисление магнитных моментов барионов из основного октета.
4. Дифференциальное сечение рассеяния электрона на точечном протоне. Дифференциальное сечение рассеяния электронов на протоне с распределенным зарядом. Форм-факторы нуклонов. Рассеяние электронов на реальном протоне. Формула Розенблюта. Закон скейлинга для электрического и магнитного форм-факторов нуклонов. Скейлинг Бьеркена. Партоновая модель Фейнмана. Валентные и морские кварки. Правила сумм.
5. Эксклюзивное и инклюзивное описание процессов множественного рождения. Инвариантные инклюзивные сечения. Структурные функции. Инклюзивные правила сумм. Основные постулаты аддитивной кварковой модели. Интерпретация мягких адрон-адронных взаимодействий в рамках аддитивной кварковой модели. Правила кварковой статистики.
6. Общие закономерности адрон-ядерных взаимодействий и их интерпретация в рамках аддитивной кварковой модели.

### 3.1.3 Методика проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации и критерии оценивания.

Проведение промежуточной аттестации будет осуществляться в виде устного экзамена и оцениваться на основании балльно-рейтинговой системы. Целями введения балльно-рейтинговой системы являются стимулирование систематической учебной работы студентов в течение всего периода обучения, повышение объективности оценки знаний студентов и мотивация их к систематической самостоятельной работе по изучению дисциплины в течение семестра.

Экзаменационный билет содержит два вопроса и задачу. На каждый вопрос и задачу студент должен привести развернутый конспект с планом ответа, необходимыми определениями, иллюстрациями, формулами и зависимостями. В устной форме студент, пользуясь конспектом, должен связно и исчерпывающе изложить содержание ответа на вопросы и логику решения предложенной задачи.

В ходе ответа преподавателем могут быть заданы студенту уточняющие вопросы по билету. На подготовку конспекта ответа по билету отводится не более 1 часа, на обдумывание ответа на дополнительные вопросы не более 10 минут на каждый. В общей сложности ответ студента не должен превышать 40 минут без учета времени на обдумывание дополнительных вопросов.

### 3.1.4 Методические материалы для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации (контрольно-измерительные материалы, оценочные средства)

Предполагается одна из следующих методик оценки:

	Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Отлично	Превосходно
Буквенная система	<b>F    FX</b>	<b>E    D</b>	<b>C</b>	<b>B</b>	<b>A</b>
Балльная система (100 баллов максимум)	< 30    31-49	50-59    60-70	71-80	81-90	91-100
Болонская система	1    2	3    4	5-7	8-9	10
Балльная система (5 баллов максимум)	2	3	4	5	5 с отличием

**A - “Превосходно”** – теоретическое содержание дисциплины освоено полностью, без пробелов, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество их выполнения оценено числом баллов, близким к максимальному.

**B - “Отлично”** – теоретическое содержание дисциплины освоено полностью, без пробелов, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения большинства из них оценено числом баллов, близким к максимальному, однако есть несколько незначительных ошибок.

**C - “Хорошо”** – теоретическое содержание дисциплины освоено полностью, без пробелов, некоторые практические навыки работы с освоенным материалом сформированы недостаточно, все предусмотренные программой обучения учебные задания выполнены, качество выполнения ни одного из них не оценено минимальным числом баллов, некоторые виды заданий выполнены с ошибками.

**D - “Удовлетворительно”** – теоретическое содержание дисциплины освоено частично, но пробелы не носят существенного характера, необходимые практические навыки работы с освоенным материалом в основном сформированы, большинство предусмотренных программой обучения учебных заданий выполнено, некоторые из выполненных заданий, возможно, содержат ошибки.

**E - “Посредственно”** – теоретическое содержание дисциплины освоено частично, некоторые практические навыки работы не сформированы, многие предусмотренные программой обучения учебные задания не выполнены, либо качество выполнения некоторых из них оценено числом баллов, близким к минимальному.

**FX - “Условно неудовлетворительно”** – теоретическое содержание дисциплины освоено частично, необходимые практические навыки работы не сформированы, большинство



предусмотренных программой обучения учебных заданий не выполнено, либо качество их выполнения оценено числом баллов, близким к минимальному; при дополнительной самостоятельной работе над материалом дисциплины возможно повышение качества выполнения учебных заданий.

**Г - “Безусловно неудовлетворительно”** – теоретическое содержание дисциплины не освоено, необходимые практические навыки работы не сформированы, все выполненные учебные задания содержат грубые ошибки, дополнительная самостоятельная работа над материалом дисциплины не приведет к какому-либо значимому повышению качества выполнения учебных заданий.

### **Перечень билетов для проведения промежуточной аттестации студентов.**

Билет № 1.

1. Пространственная четность адронов. Связь пространственной четности с угловым моментом. Определение пространственной четности  $\pi$ -мезона.
2. Дифференциальное сечение упругого рассеяния электронов на протонах с распределенным зарядом. Форм-факторы нуклонов.
3. Вычислить в нулевом порядке теории возмущений массы  $\Lambda$ ,  $\Sigma^0$  и  $\Sigma^{0*}$ , имеющих одинаковый кварковый состав  $\{uds\}$ .

Билет № 2.

1. SU(2)-симметрия и изоспин адронов. Сохранение изоспина в сильных взаимодействиях. Связь между электрическим зарядом и третьей проекцией изоспина.
2. Упругое рассеяние электронов на протоне. Формула Резенблута. Закон скейлинга для электрического и магнитного форм-факторов нуклона.
3. Вычислить магнитный момент  $\Lambda$ -гиперона, предполагая, что магнитный момент бариона есть векторная сумма магнитных моментов кварков.

Билет № 3.

1. Зарядовая четность. Зарядовая четность нейтральной системы, состоящей из частицы и античастицы. G-четность.
2. Инклюзивное сечение глубоко неупругого лептон-нуклонного рассеяния. Построение адронного тензора. Структурные функции нуклонов. Скейлинг Бьеркена.
3. Доказать, что в спектре упругой дифракционной диссоциации барионов на нуклонах  $\frac{d^2\sigma}{dM^2 dt}$  должен наблюдаться максимум при  $M^2 = M_0^2 + 2|t|$  для фиксированного  $t$ , где  $M^2$  - квадрат эффективной массы конечной адронной системы,  $M_0^2$  – квадрат массы системы диссоциировавших кварков,  $t$  - переданный импульс.

Билет № 4.

1. SU(3)-симметрия и унитарный спин. Унитарные супермультиплеты элементарных частиц. Размерности неприводимых представлений SU(3)-группы и их связь с размерностями унитарных мультиплетов адронов.
2. Партонная модель Фейнмана. Связь структурных функций нуклона с партонной структурой.
3. Найти отношение множественности адронов с  $x < 0.1$  в протон-ядерных и пион-ядерных взаимодействиях.

Билет № 5.

1. Кварковый состав мезонов и барионов. Построение волновых функций адронов из основных мультиплетов.

2. Валентные и морские кварки. Импульсные распределения кварков и глюонов в адронах. Правила сумм.

3. Рассмотреть возможные моды распада  $\Omega^-$ -гиперона, разрешенные законами сохранения в сильных взаимодействиях и показать, что возможен только его слабый распад.

Билет № 6.

1. Нарушение SU(3)-симметрии и смешивание синглетных и октетных состояний.

2. Эксклюзивное и инклюзивное описание процессов множественного рождения.

Инвариантные инклюзивные сечения. Корреляционные функции. Кинематические переменные.

3. Вычислить магнитный момент  $\Sigma^0$ -гиперона, предполагая, что магнитный момент бариона есть векторная сумма магнитных моментов кварков.

Билет № 7.

1. Тяжелые кварконии. Вычисление массы возбужденных состояний кваркониев в рамках потенциальной модели.

2. Основные постулаты аддитивной кварковой модели. Интерпретация мягких адрон-адронных взаимодействий в рамках АКМ.

3. Определить, в каких изоспиновых каналах могут проходить следующие реакции  $K^- + p \rightarrow \Sigma^0 + \pi^0$ ,  $K^- + p \rightarrow \Sigma^+ + \pi^-$ , и найти отношение поперечных сечений этих реакций в каждом разрешенном изоспиновом канале.

Билет № 8.

1. Массовые формулы для мезонов и барионов.

2. Общие закономерности адрон-ядерных взаимодействий и их интерпретация в рамках АКМ.

3. Показать, что отношение структурных функций для глубоко неупругого рассеяния электронов на нуклонах имеет следующие пределы:

$$\frac{F_2^{en}(x)}{F_2^{ep}(x)} \xrightarrow{x \rightarrow 0} 1 \quad ; \quad \frac{F_2^{en}(x)}{F_2^{ep}(x)} \xrightarrow{x \rightarrow 1} 0.25$$

при условии, что функции распределения валентных кварков удовлетворяют предельному условию:  $u_v(x) \gg d_v(x)$  при  $x \rightarrow 1$ .

Билет № 9.

1. Кварковая модель и магнитные моменты адронов. Магнитные моменты нуклонов.

2. Оценка средней множественности адронов в адрон-адронных и адрон-ядерных взаимодействиях в рамках АКМ.

3. Определить относительный орбитальный момент  $p$  и  $\pi^+$ , образующихся при распаде:  $\Delta^{++} \rightarrow p + \pi^+$ .

3.1.5 Методические материалы для оценки обучающимися содержания и качества учебного процесса.

**Анкета-отзыв** на дисциплину «Кварковая структура адронов» .

Просим Вас заполнить анкету-отзыв по прочитанной дисциплине. Обобщенные данные анкет будут использованы для ее совершенствования. По каждому вопросу проставьте соответствующие оценки по шкале от 1 до 10 баллов (**обведите** выбранный Вами балл). В случае необходимости впишите свои комментарии.

1. Насколько Вы удовлетворены содержанием дисциплины в целом?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Комментарий \_\_\_\_\_

2. Насколько Вы удовлетворены общим стилем преподавания?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Комментарий \_\_\_\_\_

3. Какой из модулей (разделов) дисциплины Вы считаете наиболее полезным, ценным с точки зрения дальнейшего обучения и/или применения в последующей практической деятельности?

Комментарий \_\_\_\_\_

4. Что бы Вы предложили изменить в методическом и содержательном плане для совершенствования преподавания данной дисциплины?

Комментарий \_\_\_\_\_

### **3.2. Кадровое обеспечение**

3.2.1 Образование и (или) квалификация преподавателей и иных лиц, допущенных к проведению учебных занятий

Реализация курса обеспечивается преподавателями, имеющими базовое образование в области ядерной физики, ученую степень не ниже кандидата физико-математических наук и систематически занимающимися научной деятельностью.

3.2.2 Обеспечение учебно-вспомогательным и (или) иным персоналом

Привлечение дополнительного персонала не предусмотрено.

### **3.3. Материально-техническое обеспечение**

3.3.1 Характеристики аудиторий (помещений, мест) для проведения занятий.

Стандартно оборудованные лекционные аудитории, удовлетворяющие действующим санитарным и противопожарным нормам.

3.3.2 Характеристики аудиторного оборудования, в том числе неспециализированного компьютерного оборудования и программного обеспечения общего пользования.

Нет.

3.3.3 Характеристики специализированного оборудования.

Нет.

3.3.4 Характеристики специализированного программного обеспечения.

Нет.

3.3.5 Перечень и объёмы требуемых расходных материалов.

Мел, авторучки, фломастеры цветные, губки, бумага формата А4, канцелярские товары, картриджи принтеров, диски, флеш-накопители и др. в объёме, необходимом для организации и проведения занятий, по заявкам преподавателей, подаваемым в установленные сроки.

### 3.4. Информационное обеспечение

#### 3.4.1 Список обязательной литературы.

1. Гончарова Н.Г., Ишханов Б.С., Капитонов И.М. Частицы и атомные ядра. Задачи с решениями и комментариями. М: Физматлит, 2013.

#### 3.4.2 Список дополнительной литературы.

1. Капитонов И.М. Введение в физику ядра и частиц. М: Физматлит, 2010.
2. Окунь Л. Б. Элементарное введение в физику элементарных частиц. М.: Физматлит, 2009.
3. Кондратьев В.П. Кварковая структура адронов. Учебное пособие. 2008.
4. Перкинс Д. Введение в физику высоких энергий. Москва. Мир. 1991.
5. Готфрид К., Вайскопф В. Концепции физики элементарных частиц. Москва. Мир. 1988.
6. Окунь Л.Б. Физика элементарных частиц. Москва. Наука. 1988.
7. Гришин В.Г. Кварки и адроны во взаимодействиях частиц высоких энергий. Москва. Энергоатомиздат, 1988.
8. Хелзен Ф., Мартин А.. Кварки и лептоны. Москва. Мир, 1987.
9. Мурзин В.С., Сарычева Л.И. Физика адронных процессов. Москва. Энергоатомиздат, 1986.

### Раздел 4. Разработчики программы

Фамилия, имя, отчество	Учёная степень	Учёное звание	Должность	Контактная информация
Кондратьев Валерий Петрович	д.ф.-м.н.	старший научный сотрудник	профессор	Тел: 8-904-645-45-01 kondrat_vp@mail.ru

В соответствии с порядком организации внутренней и внешней экспертизы образовательных программ проведена двухуровневая экспертиза:

первый уровень (оценка качества содержания рабочей программы и применяемых педагогических технологий)		
Наименование кафедры	Дата заседания	№ протокола
второй уровень (соответствие целям подготовки и учебному плану образовательной программы)		
Экспертиза второго уровня выполнена в порядке, установленном приказом		
<i>должностное лицо</i>	<i>дата приказа</i>	<i>№ приказа</i>

Уполномоченный орган (должностное лицо)	Дата принятия решения	№ документа

Иные документы об оценке качества рабочей программы

Документ об оценке качества	Дата документа	№ документа

Утверждение рабочей программы

Уполномоченный орган (должностное лицо)	Дата принятия решения	№ документа

Внесение изменений в рабочую программу

Уполномоченный орган (должностное лицо)	Дата принятия решения	№ документа