



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
ФГБОУ ВО «ИГУ»  
физический факультет

УТВЕРЖДАЮ  
Декан факультета

Буднев Н.М.

2018

**Рабочая программа дисциплины (модуля)**

Код дисциплины Б1.В.ОД.5

Наименование дисциплины: Физика высоких энергий

Направление подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

03.06.01 – Физика и астрономия

Направленность (научная специальность) Физика высоких энергий

Форма обучения очная

Согласовано с УМК физического факультета

Программа рассмотрена на заседании  
кафедры теоретической физики

Протокол № 12 от «29» 03 2018  
г.

«29» 03 2018 г. Протокол № 7

Председатель УМК [подпись] /Буднев Н.М./

И.о. зав. кафедрой [подпись] /Ловцов С.В./

Иркутск 2018 г.

## Содержание

1. Цели и задачи дисциплины.....	3
2. Место дисциплины в структуре ОПОП.....	3
3. Требования к результатам освоения дисциплины.....	3
4. Объем дисциплины и виды учебной работы.....	4
5. Содержание дисциплины.....	4
6. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ.....	8
7. Примерная тематика курсовых работ (при наличии).....	8
8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.....	9
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины.....	9
10. Образовательные технологии.....	9
11. Оценочные средства (ОС).....	9

## 1. Цели и задачи дисциплины

Курс «Физика высоких энергий» является важной частью универсальной базы для изучения специальных дисциплин, вооружает аспирантов необходимыми знаниями для решения теоретических и прикладных аспектов научных задач, знакомит с синтезом первоначально несвязанных идей и подходов и формированием фундаментального направления в физике мягких адронных процессов, остающихся и на сегодняшний день за пределами применимости теории возмущений квантовой хромодинамики.

**Цель курса** «Физика высоких энергий» - изучение слабых, электромагнитных и сильных (адронных) процессов взаимодействия частиц при высоких энергиях, поведение сечений рассеяния нейтрино, заряженных лептонов с ростом энергий, описание характеристик инклюзивных реакций с участием нуклонов и мезонов в рамках феноменологических моделей, которые используются для расчета и моделирования широких атмосферных ливней, генерируемых космическими лучами в атмосфере Земли и в астрофизических объектах, представляющих интерес как источники космического излучения высокой и сверхвысокой энергии. В результате изучения курса аспирант приобретает знания о фундаментальных процессах, составляющих основу механизмов генерации космического излучения высокой энергии - космических лучей, гамма-квантов и нейтрино.

**Задачи курса** - изучить основные закономерности процессов, играющих ключевую роль в механизмах ускорения частиц в астрофизических объектах и генерации гамма-излучения, нейтрино высоких и сверхвысоких энергий, роль мягких адронных процессов при очень высоких энергиях, исследование которых лежит за пределами применимости теории возмущений квантовой хромодинамики; адронные взаимодействия с небольшими передачами импульса играющие важную роль в развитии широких атмосферных ливней, регистрация которых и измерение характеристик является важным звеном изучения спектра космических лучей и исследования механизма генерации потоков мюонов и нейтрино в атмосфере Земли; феноменологические модели адронных процессов (QGSJET, SIBYLL, DPM, EPOS и др.), служащие инструментом для моделирования развития широких атмосферных ливней и подвергающиеся в настоящее время всесторонней проверке на Большом адронном коллайдере в экспериментах с космическими лучами на крупномасштабных установках.

## 2. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Физика высоких энергий» относится к базовой части математического и естественнонаучного цикла дисциплин и опирается на такие дисциплины, как «Стандартная модель», «Астрофизика и космология», «Нейтринная астрономия и астрофизика». Изучение данной дисциплины является неотъемлемой частью образовательного цикла по кафедре теоретической физики.

Изучение данной дисциплины опирается на знания, полученные при изучении дисциплин: «Теория рассеяния», «Релятивистская квантовая теория», «Феноменологические модели адронных взаимодействий при высоких энергиях».

При изучении дисциплины «Физика высоких энергий» аспиранты осваивают необходимые понятия и методы физики высоких энергий, способы теоретического описания, количественного анализа процессов взаимодействия частиц в экстремальных условиях плотности и давления вещества, на катастрофических этапах эволюции астрофизических объектов и образования компактных релятивистских структур (нейтронных звезд, черных дыр, аккреционных дисков), представляющих интерес как источники космического излучения высокой и сверхвысокой энергии.

Программа курса ориентирована на тематику научных исследований Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, базовой кафедрой которого является кафедра теоретической физики ИГУ и Научно-исследовательского института прикладной физики ИГУ.

## 3. Требования к результатам освоения дисциплины

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование профессиональных компетенций:

- способностью самостоятельно ставить задачи научных исследований в области физики высоких энергий, решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего отечественного и зарубежного опыта (ПК-1);
- владеть разделами физики, необходимыми для решения научных задач в области физики высоких энергий (ПК-2);
- владение новыми методами и методологическими подходами необходимыми для участия в научно-инновационных исследованиях и инженерно-технологической деятельности (ПК-3).

В результате изучения курса «Физика высоких энергий» аспиранты должны:

**Знать:** основные закономерности процессов, играющих ключевую роль в механизмах ускорения частиц в астрофизических объектах и генерации гамма-излучения, нейтрино высоких и сверхвысоких энергий, основные методы описания взаимодействия в физике лептонов и адронов и феноменологические модели, принципы и методы детектирования частиц высоких энергий.

**Уметь:** применять эти принципы и методы для решения конкретных задач физики высоких энергий.

**Владеть:** методами аналитического и численного расчета ключевых характеристик взаимодействий частиц при высоких энергиях.

#### 4. Объем дисциплины и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего часов / зачетных единиц	Курсы			
		1	2	3	4
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	48/1,3				48
В том числе:					
Лекции	24/0,7				24
Практические занятия (ПЗ)	24/0,7				24
<b>Самостоятельная работа (всего)</b>	168/4,7				168
Вид промежуточной аттестации (экзамен)	36/1				36
Общая трудоемкость	часы				252
	зачетные единицы				7

#### 5. Содержание дисциплины

##### 5.1. Содержание разделов и тем дисциплины

**Тема 1.** Постулаты аналитической теории S-матрицы: лоренц-инвариантность, унитарность, аналитичность. Амплитуда рассеяния частиц при высоких энергиях, кинематика четырех-хвостки, переменные Манделъстама. Кроссинг-симметрия двухчастичных реакций,  $s$ -,  $t$ -,  $u$ -каналы, плоскость Манделъстама. Связь между амплитудой рассеяния и измеряемыми величинами.

**Тема 2.** Физические области в пространстве  $s$ -,  $t$ -,  $u$ -инвариантов. Характер сингулярностей амплитуды рассеяния на физическом и нефизических листах. Дисперсионные соотношения для амплитуды рассеяния, представление Манделъстама для двойных дисперсионных соотношений. Строго доказанные аналитические свойства в аксиоматической квантовой теории поля.

**Тема 3.** Три теоремы адронных взаимодействий: оптическая теорема, ограничение Фруассара и теорема Померанчука.

**Тема 4.** Релятивистская теория полюсов Редже, свойства траектории Редже. Связь рождения резонансов ( $s$ -канал) и процессов обмена реджеоном ( $t$ -канал). Вычет в полюсе Редже, асимптотика амплитуды рассеяния, правая особенность. Свойство дуальности высокоэнергетической амплитуды, амплитуда Венециано. Полюс Померанчука и его свойства. Множественный обмен реджеонами и помероннами, движущиеся точки ветвления в комплексной  $J$ -плоскости и разрезы.

**Тема 5.** Топологическое  $1/N$ -разложение амплитуды адронного взаимодействия и связь с теорией Редже. Пространственно-временная картина взаимодействия, топологическая структура полюса Померанчука, планарные и цилиндрические диаграммы, динамический характер топологического разложения. Глубокие и динамическая природа померона в квантовой хромодинамике. Померон и физика малых бьеркеновских  $x$  в глубоко-неупругом рассеянии.

**Тема 6.** Множественные процессы, кинематика, инклюзивные реакции, инварианты инклюзивных распределений. Кинематические области множественных процессов - фрагментации пучка и мишени, пионизация. Гипотеза предельной фрагментации и гипотеза фейнмановского скейлинга (масштабная инвариантность). Закономерности множественных реакций, наблюдаемые экспериментально.

**Тема 7.** Мультипериферическая модель множественного рождения, кинематика, реджевская асимптотика мультипериферической амплитуды. Реджевский анализ инклюзивных процессов,

обобщенная оптическая теорема Мюллера, реджезация б-хвостки в различных кинематических областях. Диффракционная диссоциация, тройной реджевский предел.

**Тема 8.** Модель кварк-глюонных струн (МКГС), образование струн, их разрыв, и механизм фрагментации кварков в адроны. Сравнение предсказаний МКГС с экспериментом, предсказания для эксперимента LHC.

**Тема 9.** Глубоко-неупругое рассеяние лептонов на нуклоне, структурные функции нуклона, кинематика, бьеркеновский скейлинг. Расчет сечения ГНР в кварк-партонной модели и экспериментальные данные. Методы КХД применительно к ГНР, эволюция кварковых и глюонных распределений в нуклоне.

**Тема 10.** Электромагнитные взаимодействия при высоких энергиях. Основные механизмы генерации  $\gamma$ -излучения высокой энергии в астрофизических объектах. Синхротронное излучение, комптоновское рассеяние, обратный комптон-эффект.

**Тема 11.** Рассеяние нейтрино на электронах, нуклонах. Структурные функции нуклона. Рассеяние нейтрино на кварках. Сечение  $\nu N$ -рассеяния в кварк-партонной модели. Поведение сечений с ростом энергии нейтрино, оценки пробега нейтрино до взаимодействия, процессы с заряженными и нейтральными токами. Взаимодействие нейтрино с ядрами, когерентное рассеяние и его роль в процессах захвата нейтрино в коллапсирующих звездах.

**5.2 Разделы дисциплины и междисциплинарные связи с обеспечиваемыми дисциплинами «Физика высоких энергий» является завершающей дисциплиной специальности.**

### 5.3. Разделы и темы дисциплин и виды занятий

№ п/п	Наименование раздела	Наименование темы	Виды занятий в часах					
			Лекц.	Практ. зан.	Семина	Лаб. зан.	СРС	Всего
1	Раздел I	Постулаты аналитической теории S-матрицы. Амплитуда рассеяния частиц при высоких энергиях, переменные Манделъстама. Кроссинг-симметрия двухчастичных реакций, s-, t-, u-каналы. Связь между амплитудой рассеяния и измеряемыми величинами	2	2			15	19
2		Дисперсионные соотношения для амплитуды рассеяния, представление Манделъстама для двойных дисперсионных соотношений. Три теоремы адронных взаимодействий: оптическая теорема, ограничение Фруассара и теорема Померанчука	2	2			15	19
3		Аналитическое продолжение амплитуды рассеяния в комплексную плоскость углового момента. Преобразование Зоммерфельда-Ватсона. Модель полюсов Редже в нерелятивистском потенциальном рассеянии	2	2			15	19
4		Релятивистская теория полюсов Редже, свойства траектории Редже, асимптотика амплитуды рассеяния	2	2			15	19
5		Множественные процессы, кинематика, инклюзивные реакции, инварианты инклюзивных распределений. Гипотеза фейнмановского скейлинга.	2	2			15	19
6	Раздел II	Мультипериферическая модель множественного рождения, кинематика, реджевская асимптотика МР амплитуды	2	2			15	19
7		Модель кварк-глюонных струн (МКГС), образование струн, их разрыв, и механизм фрагментации кварков в адроны. Сравнение предсказаний МКГС с экспериментом, предсказания для эксперимента LHC.	2	2			15	19

8	Глубоко-неупругое рассеяние лептонов на нуклоне, структурные функции нуклона, кинематика, бьеркеновский скейлинг. Расчет сечения ГНР в кварк-партонной модели и экспериментальные данные.	2	2			15	19
9	Топологическое разложение амплитуды адронного взаимодействия и связь с теорией Редже. Пространственно-временная картина взаимодействия, топологическая структура полюса Померанчука, планарные и цилиндрические диаграммы, динамический характер топологического разложения	2	2			15	19
10	Электромагнитные взаимодействия при высоких энергиях. Основные механизмы генерации $\gamma$ -излучения высокой энергии в астрофизических объектах. Синхротронное излучение, комптоновское рассеяние, обратный комптон-эффект	2	2			15	19
11	Рассеяние нейтрино на электронах, нуклонах. Структурные функции нуклона. Рассеяние нейтрино на кварках. Сечение $\nu N$ -рассеяния в кварк-партонной модели. Взаимодействие нейтрино с ядрами, когерентное рассеяние и его роль в процессах захвата нейтрино в коллапсирующих звездах	4	4			18	26

## 6. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ

№ п/п	№ раздела и темы дисциплины (модуля)	Наименование семинаров, практических и лабораторных работ	Трудоемкость (часы)	Оценочные средства	Формируемые компетенции
1	2	3	4	5	6
1	Тема 1	Амплитуда рассеяния частиц при высоких энергиях, кинематика двух-частичной реакции, кроссинг-симметрия, связь между амплитудой рассеяния и сечениями	4	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1, ПК-2, ПК-3
2	Тема 3, 4	Разложение амплитуды по парциальным волнам, асимптотическое поведение, преобразование Ватсона-Зоммерфельда. Модель полюсов Редже для рассеяния частицы на юкавском потенциале	4	Задание на семинаре в виде задачи	
3	Тема 6	Множественные процессы, кинематика, инклюзивные реакции. Кинематические области множественных процессов	4	Задание на семинаре в виде задачи	
4	Тема 7	Мультипериферическая модель множественного рождения, кинематика, реджевское поведение мультипериферической амплитуды	4	Задание на семинаре в виде задачи	
5	Тема 8	Реджевский анализ инклюзивных процессов, обобщенная оптическая теорема Мюллера, реджезация б-хвостки в различных кинематических областях.	4	Задание на семинаре в виде задачи	
6	Тема 10	Расчет инклюзивных распределений и полных неупругих сечений в модели кварк-глюонных струн, предсказания для эксперимента LHC	4	Задание на семинаре в виде задачи	

## 7. Примерная тематика курсовых работ (при наличии)

Курсовые работы не планируются.

## 8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### Основная литература

1. Петрина Д. Я.. Квантовая теория поля : учеб. пособие для студ. физ. спец. ун-тов. М. : Либроком, 2015. - 247 с.
2. Высоцкий М. И. Лекции по теории электрослабых взаимодействий [Электронный ресурс] / М. И. Высоцкий. - Москва : Физматлит, 2011. Режим доступа: ЭБС "Издательство "Лань". - Неогранич. доступ.

### Дополнительная литература

1. Ландау Л.Д. и Лифшиц Е.М. Теоретическая физика в десяти томах. Т. 6. Гидродинамика. 4-е изд., стереотип. М.: Наука, 1988. 730 с.
2. Окунь, Л. Б. Лептоны и кварки. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1990. 345 с
3. Перкинс Д. Введение в физику высоких энергий. М. : Мир, 1975. - 416 с
4. Никитин Ю.П. Теория множественных процессов. М.: Атомиздат, 1976. - 232 с
5. Клоуз Ф. Кварки и партоны. Введение в теорию . М. : Мир, 1982. - 438 с.
6. Новожилов, Ю.В. Введение в теорию элементарных частиц [Текст] : моногр. / Ю. В. Новожилов. - М. : Наука, 1972. - 472 с. (1).
7. Коллинз П., Сквайрс Ю. Полюса Редже в физике частиц М. : Мир, 1971. - 351 с.
8. Р. Иден. Соударения частиц высоких энергий. М.: Наука, 1970. 391 с.

### Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

Научная библиотека ИГУ <http://library.isu.ru/>, поисковая система INSPIRE журнальных статей и материалов конференций <http://inspirehep.net/>, базы данных и электронных препринтов по физике и астрофизике высоких энергий <http://arxiv.org/>.

## 9. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Методическим оформлением курса является использование современных образовательных технологий: информационных (лекции и презентации в Power Point), проектных (мультимедиа, видео, документальные фильмы). Внедрение глобальной компьютерной сети в образовательный процесс позволяет обеспечить доступность Интернет-ресурсов.

Материалы: научные статьи и монографии из рецензируемых журналов, рассматривающие современные подходы и исследования в феноменологической физике.

## 10. Образовательные технологии

Задачи изложения и изучения дисциплины реализуются в следующих формах деятельности:

- **лекции**, нацеленные на получение необходимой информации, и ее использование при решении задач;
- **практические занятия**, направленные на активизацию познавательной деятельности студентов и приобретения ими навыков решения задач;
- **консультации** – еженедельно для всех желающих студентов;
- **самостоятельная внеаудиторная работа** направлена на приобретение навыков самостоятельного решения задач по дисциплине.

## 11. Оценочные средства (ОС)

11.1. Оценочные средства для входного контроля:

Для изучения данного курса студент должен владеть основами физики и теоретической физики, уметь пользоваться стандартными поисковыми сервисами сети Интернет. Входной контроль умений и знаний не проводится.

11.2. Оценочные средства текущего контроля: *текущий контроль не планируется.*

11.3. Оценочные средства для промежуточной аттестации

Промежуточная аттестация направлена на проверку сформированности компетенций ПК-1, ПК-2, ПК-3 и проводится в форме экзамена – устного по билетам или письменного по билетам. Экзамены проводятся во время экзаменационных сессий в соответствии с расписанием. Экзаменационный билет включает теоретический вопрос и задачу.

Критерии оценки на экзамене:

Критерии	Оценка			
	Отлично	Хорошо	Удовлетв.	Неудовлетв.
Знание	Всесторонние глубокие знания	Хорошее знание курса, допускает некоторые неточности в ответах	Пробелы в усвоении программного материала	Не знает основное содержание дисциплины
Понимание	Полное понимание материала, приводит примеры, отвечает на дополнительные вопросы	Понимает материал, приводит примеры, но испытывает затруднения с выводами, недостаточно полно отвечает на дополнительные вопросы	Суждения поверхностны, содержат ошибки, примеры не приводит, ответы на дополнительные вопросы неуверенные	Неполный и маловнятный ответ на экзаменационные вопросы, теряет важные детали. Не приводит примеры, не дает ответа на дополнительные вопросы
Применение проф. терминологии	Дает емкие определения основных понятий, корректно использует профессиональную терминологию	Допускает неточности в определении понятий, не в полном объеме использует профессиональную терминологию	Путает понятия, редко использует профессиональную терминологию	Затрудняется дать определение основных понятий, не знает профессиональных терминов
Соблюдение норм литературного языка	Соблюдает нормы литературного языка, преобладает научный стиль изложения	Соблюдает нормы литературного языка, изредка допускает ошибки	Допускает много речевых ошибок в изложении материала	Сбивчивая речь, смысловая путаница искажает суть вопроса

Примеры задач к экзамену:

**Задача 1.** Показать, что выход нейтральных пионов в реакции фоторождения в два раза выше выхода заряженных  $\pi$ -мезонов  $p + \gamma \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \begin{cases} \pi^0 + p, & 2/3 \text{ событий} \\ \pi^+ + n, & 1/3 \text{ событий} \end{cases}$

**Задача 2.** Используя закон сохранения энергии-импульса для реакции  $p + \gamma \rightarrow \pi^+ + n$ , получите выражение для пороговой энергии этой реакции на реликтовом излучении.

**Задача 3.** Оценить критическую энергию электрона в электрон-фотонном каскаде, индуцированном в веществе частицей высокой энергии.

**Задача 4.** Покажите, что в комптоновском рассеянии на электроны высокой энергии (лаб. системе)  $E_e = mc_e^2$  фотон с энергией  $\omega$  может приобрести энергию  $\Delta\omega \approx E_e / (1 - \cos \theta) - \omega$ , где  $\theta$  - угол рассеяния фотона.

**Задача 5.** Найти приближенное выражение для спектра  $\pi^\pm$ -мезонов на малой глубине атмосферы  $h \ll \beta_\pi \lambda_\pi^0$ , предполагая: 1) степенной спектр космических лучей; 2) независимые от энергии полные сечения неупругих нуклон-ядерных соударений; 3) энергия  $\pi$ -мезонов достаточно высока, чтобы пренебречь их распадами.

Примерный список вопросов к экзамену:

1. Кинематика рассеяния частиц при высоких энергиях,  $s$ -,  $t$ -,  $u$ -каналы. Кроссинг-симметрия двухчастичных реакций. Связь амплитуды рассеяния и измеряемых величин.
2. Аналитическое продолжение амплитуды рассеяния в комплексную плоскость углового момента, сходимости фонового интеграла. Релятивистская теория полюсов Редже, траектории Редже, диаграммы Чью-Фраучи.
3. Проблема высоких спинов в процессах при высоких энергиях, необходимость реджеонов и вакуумного полюса с высоким интерсептом, свойства померона.
4. Доказать три теоремы адронных взаимодействий при высоких энергиях - оптическую, Фруассара и Померанчука.
5. Множественные процессы при высоких энергиях, инклюзивные реакции, инварианты инклюзивных распределений. Кинематические области фрагментации, пионизации. Гипотеза фейнмановского скейлинга.
6. Мультипериферическая модель множественного рождения, реджевская асимптотика МР-амплитуды, вычисление характеристик множественных процессов в рамках МР модели.
7. Реджевский анализ инклюзивных процессов в различных кинематических областях. Диффракционная диссоциация, тройной реджевский предел.
8. Топологическое разложение амплитуды адронного взаимодействия, связь с теорией Редже-Грибова. Топологическая структура полюса Померанчука, планарные и цилиндрические диаграммы. Динамическая природа померона в квантовой хромодинамике.
9. Модель кварк-глюонных струн и ее предсказания для эксперимента ЛНС.
10. Глубоко-неупругое рассеяние лептонов на нуклоне, структурные функции нуклона, кинематика, бьеркеновский скейлинг. Расчет сечения ГНР в кварк-партонной модели и экспериментальные данные.
11. Электромагнитные взаимодействия при высоких энергиях. Основные механизмы генерации  $\gamma$ -излучения высокой энергии в астрофизических объектах. Синхотронное излучение, комптоновское рассеяние, обратный комптон-эффект.
12. Рассеяние нейтрино на электронах, нуклонах. Сечение  $\nu N$ -рассеяния в кварк-партонной модели. Поведение сечений с ростом энергии нейтрино, оценки пробега нейтрино до взаимодействия, процессы с заряженными и нейтральными токами. Взаимодействие нейтрино с ядрами, когерентное рассеяние и его роль в процессах захвата нейтрино в коллапсирующих звездах.

Разработчик:

Александр

профессор, д.ф.-м.н. С.И. Синеговский

Программа рассмотрена на заседании кафедры теоретической физики «29» 03 2018 г.

Протокол № 7

И.о. зав. кафедрой С.В. Ловцов