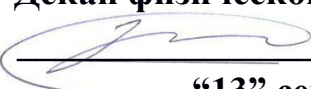




**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Иркутский государственный университет»**  
(ФГБОУ ВО «ИГУ»)  
**Физический факультет**

**УТВЕРЖДАЮ**  
**Декан физического факультета**  
 / Буднев Н.М.  
“13” сентября 2022 г.

**Рабочая программа дисциплины (модуля)**

Наименование дисциплины: **Феноменологические модели физики высоких энергий**

Научная специальность: **1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий**

Форма обучения очная

Согласовано с УМК физического факультета  
протокол №35 от «13» сентября 2022 г.

Председатель УМК  / Буднев Н.М./

Программа рассмотрена на заседании  
кафедры теоретической физики  
«13» сентября 2022 г. Протокол №2

И.о. зав.кафедрой  /Ловцов С.В./

**Иркутск 2022 г.**

## Содержание

1. Цели и задачи дисциплины.....	3
2. Требования к результатам освоения дисциплины (модуля).....	3
3. Объем дисциплины (модуля) и виды учебной работы.....	3
4. Содержание дисциплины (модуля).....	4
4.1. Содержание разделов и тем дисциплины (модуля).....	4
4.2. Разделы и темы дисциплины (модуля) и виды занятий.....	5
4.3. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ.....	7
5. Примерная тематика курсовых работ (проектов) (при наличии).....	7
6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.....	7
7. Материально-техническое обеспечение дисциплины.....	8
8. Образовательные технологии.....	8
9. Фонды оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации.....	8

## 1. Цели и задачи дисциплины

Курс «Феноменологические модели физики 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** «Феноменологические модели физики высоких энергий» – изучение процессов сильного взаимодействия при высоких энергиях, описание характеристик инклюзивных реакций с участием нуклонов и мезонов в рамках 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 фундаментальные знания об адронных взаимодействиях, составляющих основу механизмов генерации космических лучей, гамма-квантов и нейтрино.

**Задачи курса:** изучить основные феноменологические подходы к описанию характеристик мягких адронных процессов при очень высоких энергиях, исследование которых лежит за пределами применимости теории возмущений квантовой хромодинамики. Адронные взаимодействия с небольшими передачами импульса играют 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. Детально проработанные феноменологические модели адронных процессов (QGSJET, SIBYLL, DPM, EPOS и др.) служат инструментом для моделирования развития ШАЛ и в настоящее время подвергаются всесторонним проверкам в экспериментах с космическими лучами и на Большом адронном коллайдере.

## 2. Требования к результатам освоения дисциплины (модуля)

В результате изучения курса «Феноменологические модели физики высоких энергий» аспиранты должны

### **знать:**

- основные закономерности и характеристики адронных процессов при высоких энергиях;
- общие теоремы адронных взаимодействий: оптическую, Фруассара, Померанчука;
- теорию Грибова-Редже;
- обобщенную оптическую теорему Мюллера;
- подход, основанный на топологическом разложении амплитуды адронного взаимодействия;
- основные модели адронных взаимодействий, зашитых в коды моделирования ШАЛ.

### **уметь:**

- получать оценки характеристик процессов множественных рождения частиц в рамках мультипериферической модели,
- находить асимптотику поведения полных и упругих сечений адронных взаимодействий;
- проводить реджевский анализ инклюзивных процессов в различных кинематических областях.

**владеть:** математическим аппаратом описания упругих и неупругих процессов, навыками расчета характеристик множественных процессов при высоких энергиях в рамках основных феноменологических моделей.

## 3. Объем дисциплины (модуля) и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего академических часов	Курсы			
			2		
Аудиторные занятия (всего)	16		16		
В том числе:					
Лекции			8		

Практические занятия (ПЗ)			8		
<b>Самостоятельная работа (всего)</b>	<b>18</b>		18		
В том числе:					
Реферат (при наличии)					
Контактная работа					
Подготовка к зачету	<b>18</b>		18		
<b>Промежуточная аттестация (всего)</b>	<b>2</b>		2		
В том числе:					
Контактная работа во время промежуточной аттестации	2		2		
Форма промежуточной аттестации (зачет, эк-замен)	зачет		зачет		
Общая трудоемкость	часы	36	36		
	зачетные единицы	1	1		

#### 4. Содержание дисциплины (модуля)

##### 4.1. Содержание разделов и тем дисциплины (модуля)

**Тема 1.** Постулаты аналитической теории S-матрицы: лоренц-инвариантность, унитарность, аналитичность. Амплитуда рассеяния частиц при высоких энергиях, кинематика четырех-хвостки, переменные Мандельштама. Кроссинг-симметрия двухчастичных реакций,  $s$ -,  $t$ -,  $u$ -каналы, плоскость Мандельштама. 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 Мандельштама 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.** Разложение амплитуды по парциальным волнам, асимптотическое поведение, представление Грибова-Фруассара. Полиномиальная ограниченность роста амплитуды, граница Фруассара. Аналитическое продолжение амплитуды рассеяния в комплексную плоскость углового момента, теорема Карлсона, преобразование Зоммерфельда-Ватсона. Потенциальное рассеяние, модель полюсов Редже.

**Тема 5.** 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.

**Тема 6.** Полюс Померанчука и его свойства. Множественный обмен реджеонами и помероннами, движущиеся точки ветвления в комплексной  $J$ -плоскости и разрезы. Свойство дуальности высокоэнергетической амплитуды, амплитуда Венециано.

**Тема 7.** Множественные процессы, кинематика, инклюзивные реакции, инварианты инклюзивных распределений. Три кинематические области множественных процессов - область фрагментации пучка, область фрагментации мишени и область пионизации (центральная область). Гипотеза предельной фрагментации и гипотеза фейнмановского скейлинга (масштабная инвариантность). Закономерности множественных реакций, наблюдаемые экспериментально.

**Тема 8.** Мультипериферическая модель множественного рождения, кинематика, реджевская асимптотика мультипериферической амплитуды.

**Тема 9.** Реджевский анализ инклюзивных процессов, обобщенная оптическая теорема Мюллера, реджезация б-хвостки в различных кинематических областях. Диффракционная диссоциация, тройной реджевский предел. Различная постановка эксперимента, данные и их описание.

**Тема 10.** 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. Связь  $s$ -канального топологического разложения амплитуды бинарного процесса с  $t$ -канальным разложением по полюсам Редже. Глоболы и динамическая природа померона в квантовой хромодинамике. Померон и физика малых бьеркеновских  $x$  в глубоко-неупругом рассеянии.

**Тема 11.** Модель кварк-глюонных струн (МКГС), образование струн, их разрыв, и механизм фрагментации кварков в адроны. Сравнение предсказаний МКГС с экспериментом, предсказания для эксперимента ЛНС.

**Тема 12.** 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.

#### 4.2. Разделы и темы дисциплины (модуля) и виды занятий

№ п/п	Наименование раздела	Наименование темы	Виды занятий в часах			
			Лекц.	Практ. зан.	СР	Всего
1	Раздел I	Постулаты аналитической теории $S$ -матрицы. Амплитуда рассеяния частиц при высоких энергиях, переменные Мандельштама. Кроссинг-симметрия двухчастичных реакций, $s$ -, $t$ -, $u$ -каналы. Связь между амплитудой рассеяния и измеряемыми величинами	0,5	0,5	1	2
2	Раздел I	Дисперсионные соотношения для амплитуды рассеяния, представление Мандельштама для двойных дисперсионных соотношений	0,5	0,5	1	2
3	Раздел I	Три теоремы адронных взаимодействий: оптическая теорема, ограничение Фруассара и теорема Померанчука	1,5	1,5	3	6
4	Раздел I	Аналитическое продолжение амплитуды рассеяния в комплексную плоскость углового момента. Преобразование Зоммерфельда-Ватсона. Модель полюсов Редже в нерелятивистском	0,5	0,5	1	2

		потенциальном рассеянии				
5		Релятивистская теория полюсов Редже, свойства траектории Редже, асимптотика амплитуды рассеяния	0,5	0,5	1	2
6	Раздел I	Вакуумная траектория Редже, свойства померона. Множественный обмен реджеонами и померонами, движущиеся точки ветвления в комплексной $J$ -плоскости и разрезы. Свойство дуальности высокоэнергетической амплитуды, амплитуда Венециано	0,5	0,5	1	2
7	Раздел II	Множественные процессы, кинематика, инклюзивные реакции, инварианты инклюзивных распределений. Гипотеза фейнмановского скейлинга. Закономерности множественных процессов, наблюдаемые на эксперименте	0,5	0,5	1	2
8	Раздел II	Мультипериферическая модель множественного рождения, кинематика, реджевская асимптотика МР амплитуды	0,5	0,5	1	2
9	Раздел II	Реджевский анализ инклюзивных процессов, обобщенная оптическая теорема Мюллера, реджезация б-хвостки в различных кинематических областях. Диффракционная диссоциация, тройной реджевский предел	0,5	0,5	1	2
10	Раздел II	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. Глюболы и динамическая природа померона в КХД.	0,5	0,5	1	2
11	Раздел II	Модель кварк-глюонных струн, образование струн,	0,5	0,5	1	4

		их разрыв, и механизм фрагментации кварков в адроны. Сравнение предсказаний МКГС с экспериментом, предсказания для эксперимента LHC				
12		Глубоко-неупругое рассеяние лептонов на нуклоне, структурные функции нуклона, кинематика, бьеркеновский скейлинг. Расчет сечения ГНР в кварк-партонной модели и экспериментальные данные. Померон и физика малых бьеркеновских $x$ в процессах ГНР.	1,5	1,5	3	6

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

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

#### 5. Примерная тематика курсовых работ (проектов) (при наличии)

Курсовые работы не планируются.

## 6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### Основная литература

1. Петрина, Д. Я. Квантовая теория поля : учеб. пособие для студ. физ. спец. ун-тов / Д. Я. Петрина. - Изд. стер. - М. : Либроком, 2015. - 247 с. ; 21 см. - ISBN 978-5-397-04802-6 (3)
2. Высоцкий, Михаил Иосифович. Лекции по теории электрослабых взаимодействий [Электронный ресурс] / М. И. Высоцкий. - Москва : Физматлит, 2011. - 150, [1] с. [1] с. : ил. ; 22. - Режим доступа: ЭБС "Издательство "Лань". - Неогранич. доступ.

### Дополнительная литература

1. Клоуз, Ф. Кварки и партоны. Введение в теорию [Текст] : научное издание / Ф. Клоуз ; пер. с англ. П. Б. Вигман ; ред. Н. Н. Николаев. - М. : Мир, 1982. - 438 с. (2)
2. Коллинз, П. Полюса Редже в физике частиц [Текст] / П. Коллинз, Ю. Сквайрс ; пер. с англ. А. И. Наумов ; ред. А. М. Бродский. - М. : Мир, 1971. - 351 с. (1)
3. Новожилов, Юрий Викторович. Введение в теорию элементарных частиц [Текст] : моногр. / Ю. В. Новожилов. - М. : Наука, 1972. - 472 с. (1)
4. Синеговский, С. И. Космические нейтрино высоких энергий [Электронный ресурс] : учеб. пособие / С. И. Синеговский. - ЭВК. - Иркутск : Изд-во ИГУ, 2009. - Режим доступа: ЭЧЗ "Библиотех". - Неогранич. доступ.
5. Лебедев Н.Н. «Специальные функции и их приложения». [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Н. Н. Лебедев. - Москва: Лань, 2010. - 358 с. - Режим доступа: ЭБС "Издательство "Лань". Неогранич. доступ. - ISBN 978-5-8114-1023-1

## 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/>.

## 7. 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.

## 8. 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;
- **текущий контроль** работы студентов осуществляется осуществляется на лекционных и практических занятиях в виде выполнения ими самостоятельных заданий.

## 9. Фонды оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации



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.

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

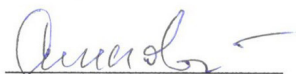
9.2. Оценочные средства для промежуточной аттестации

Примерный список вопросов и задач к зачету

1. Кинематика рассеяния частиц при высоких энергиях,  $s$ -,  $t$ -,  $u$ -каналы. Кроссинг-симметрия двухчастичных реакций. Связь амплитуды рассеяния и измеряемых величин.
2. Упругое рассеяние, разложение амплитуды по парциальным волнам, представление прицельного параметра при высоких энергиях, условие унитарности для упругого рассеяния и его обобщение на неупругие процессы, квазиэikonальное приближение для амплитуды рассеяния.
3. Аналитическое продолжение амплитуды рассеяния в комплексную плоскость углового момента, сходимостъ фонового интеграла. Релятивистская теория полюсов Редже, траектории Редже, диаграммы Чью-Фраучи.
4. Проблема высоких спинов в процессах при высоких энергиях, необходимость реджеонов и вакуумного полюса с высоким интерсептом, свойства померона.
5. Доказать три теоремы адронных взаимодействий при высоких энергиях - оптическую, Фруассара и Померанчука .
6. Множественные процессы, инклюзивные реакции, инварианты инклюзивных распределений. Кинематические области фрагментации, пионизации. Гипотеза фейнмановского скейлинга.
7. Мультипериферическая модель множественного рождения, реджевская асимптотика МР-амплитуды, вычисление характеристик множественных процессов в рамках МР модели.
8. Реджевский анализ инклюзивных процессов в различных кинематических областях. Диффракционная диссоциация, тройной реджевский предел.
9. Топологическое разложение амплитуды адронного взаимодействия, связь с теорией Редже-Грибова. Топологическая структура полюса Померанчука, планарные и цилиндрические диаграммы. Динамическая природа померона в квантовой хромодинамике.
10. Модель кварк-глюонных струн и ее предсказания для эксперимента LHC.

Зачет считается сданным, если студент дает правильный ответ на теоретический вопрос и успешно справляется с решением задачи (упражнения).

**Разработчик:**



профессор, д.ф.-м.н. С.И. Синеговский

**Лист согласования, дополнений и изменений  
на 2024/2025 учебный год**

К рабочей программе дисциплины «Феноменологические модели физики высоких энергий» по научной специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

1. В рабочую программу дисциплины вносятся следующие дополнения:  
Нет дополнений

2. В рабочую программу дисциплины вносятся следующие изменения:  
Нет изменений

Изменения одобрены УМК физического факультета,  
протокол №42 от 15 апреля 2024 г.

И.о. зав. кафедрой \_\_\_\_\_ /  / Ловцов С.В./