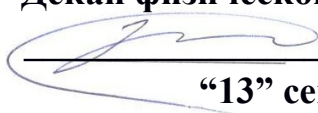




МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Иркутский государственный университет»
(ФГБОУ ВО «ИГУ»)
Физический факультет

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

Рабочая программа дисциплины (модуля)

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

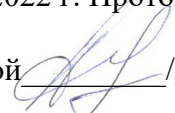
Научная специальность: **1.3.15 Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий**

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		
Самостоятельная работа (всего)	18		18		
В том числе:					
Реферат (при наличии)					
Контактная работа					
Подготовка к зачету	18		18		
Промежуточная аттестация (всего)	2		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. Глюболы 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 "Библиотек". - 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.*

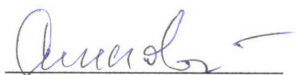
9.2. Оценочные средства для промежуточной аттестации

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, квазиэйконоальное приближение для амплитуды рассеяния.
3. Аналитическое продолжение амплитуды рассеяния в комплексную плоскость углового момента, сходимости 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