



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

УТВЕРЖДАЮ
Декан физического факультета

/Н.М. Буднев

“13” СЕНТЯБРЯ 2022



Рабочая программа дисциплины (модуля)

Наименование дисциплины: **Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика 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.....	3
3. Объем дисциплины и виды учебной работы.....	3
4. Содержание дисциплины.....	4
4.1. Содержание разделов и тем дисциплины.....	4
4.2. Разделы и темы дисциплин и виды занятий.....	5
5. Примерная тематика курсовых работ (при наличии).....	6
6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.....	7
7. Материально-техническое обеспечение дисциплины.....	7
8. Образовательные технологии.....	7
9. Фонды оценочных средств для проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации.....	7

1. Цели и задачи дисциплины

Курс «Физика атомных ядер и элементарных частиц, 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 атомных ядер и элементарных частиц, 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. Требования к результатам освоения дисциплины

В результате изучения курса «Физика атомных ядер и элементарных частиц, 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.

3. Объем дисциплины и виды учебной работы

Вид учебной работы	Всего академических часов	Курсы			
		1	2	3	4
Аудиторные занятия (всего)	2				2
В том числе:					
Лекции	2				2

Практические занятия (ПЗ)					
Самостоятельная работа (всего)	70				70
В том числе:					
Реферат (при наличии)					
Контактная работа					
<i>Другие виды самостоятельной работы</i>					
Промежуточная аттестация (всего)	36				36
В том числе:					
Контактная работа во время промежуточной аттестации	4				4
Самостоятельная работа	32				32
Форма промежуточной аттестации (зачет, экзамен)	экзамен				эк- за- мен
Общая трудоемкость	часы	108			108
	зачетные единицы	3			3

4. Содержание дисциплины

4.1. 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 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. 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 ЛНС.

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 γ -излучения высокой энергии в астрофизических объектах. Синхотронное излучение, комптоновское рассеяние, обратный комптон-эффект.

Тема 11. Рассеяние нейтрино на электронах, нуклонах. Структурные функции нуклона. Рассеяние нейтрино на кварках. Сечение νN -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.

4.2. Разделы и темы дисциплин 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	0,2		7	7,2
2	Раздел I	Дисперсионные соотношения для амплитуды рассеяния, представление Мандельштама для двойных дисперсионных соотношений. Три теоремы адронных взаимодействий: оптическая теорема, ограничение Фруассара и теорема Померанчука	0,2		7	7,2
3	Раздел I	Аналитическое продолжение амплитуды рассеяния в комплексную плоскость углового момента. Преобразование Зоммерфельда-Ватсона. Модель полюсов	0,2		7	7,2

		Редже в нерелятивистском потенциальном рассеянии				
4	Раздел I	Релятивистская теория полюсов Редже, свойства траектории Редже, асимптотика амплитуды рассеяния	0,2		6	6,2
5	Раздел I	Множественные процессы, кинематика, инклюзивные реакции, инварианты инклюзивных распределений. Гипотеза фейнмановского скейлинга.	0,2		6	6,2
6	Раздел II	Мультипериферическая модель множественного рождения, кинематика, реджевская асимптотика МР амплитуды	0,2		6	6,2
7	Раздел II	Модель кварк-глюонных струн (МКГС), образование струн, их разрыв, и механизм фрагментации кварков в адроны. Сравнение предсказаний МКГС с экспериментом, предсказания для эксперимента LHC.	0,1		6	6,1
8	Раздел II	Глубоко-неупругое рассеяние лептонов на нуклоне, структурные функции нуклона, кинематика, бьерке-новский скейлинг. Расчет сечения ГНР в кварк-партонной модели и экспериментальные данные.	0,2		7	7,2
9	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	0,1		6	6,1
10	Раздел II	Электромагнитные взаимодействия при высоких энергиях. Основные механизмы генерации γ -излучения высокой энергии в астрофизических объектах. Синхотронное излуче-	0,2		6	6,2

		ние, комптоновское рассеяние, обратный комптон-эффект				
11	Раздел II	Рассеяние нейтрино на электронах, нуклонах. Структурные функции нуклона. Рассеяние нейтрино на кварках. Сечение νN - рассеяния в кварк-партонной модели. Взаимодействие нейтрино с ядрами, когерентное рассеяние и его роль в процессах захвата нейтрино в коллапсирующих звездах	0,2		6	6,2

5. Примерная тематика курсовых работ (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. 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 глюоны. 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/>.

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.

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

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 допуская 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 π -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.

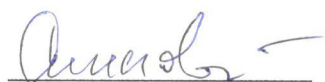
Задача 4. Покажите, что в комптоновском рассеянии на электроны высокой энергии (лаб. Система) $E_e = mc_e^2$ фотон с энергией ω может приобрести энергию $\Delta\omega \approx E_e / (1 - \cos \theta) - \omega$, где θ – угол рассеяния фотона.

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 π -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. Дифракционная 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 LHC.
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 γ -излучения высокой энергии в астрофизических объектах. Синхротронное излучение, комптоновское рассеяние, обратный комптон-эффект.
12. Рассеяние нейтрино на электронах, нуклонах. Сечение νN -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:



профессор, д.ф.-м.н. С.И. Синеговский

**Лист согласования, дополнений и изменений
на 2025/2026 учебный год**

К рабочей программе дисциплины «Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика 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 факультета/института, протокол № 50 от 22 апреля 2025 г.

Зав. кафедрой _____  С.В. Ловцов