

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
ФИЛИАЛ МГУ В Г. ДУБНЕ

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора  
филиала МГУ в г.Дубне  
/ Э.Э. Боос /  
«01» сентября 2024 г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

Наименование дисциплины:

**Введение в квантовую теорию рассеяния**

---

Уровень высшего образования:

**Магистратура**

---

Направление подготовки:

**03.04.02 Физика**

Направленность (профиль)/специализация образовательной программы:

Физика элементарных частиц

---

Форма обучения:

Очная

---

Дубна 2024

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению 03.04.02 «Физика», утвержденным приказом МГУ от 30.12.2020 г. № 1366.

Год (годы) приема на обучение \_\_\_\_\_

**Авторы–составители:**

1. Доктор физ.-мат. наук, доцент Узиков Юрий Николаевич, профессор физического факультета МГУ по совместительству

Руководитель магистерской программы:

Доктор физ.-мат. наук, профессор академик РАН В.А. Матвеев, заведующий кафедрой физического факультета МГУ

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины**

Предметом курса являются принципы и методы теоретического анализа экспериментальных данных о процессах столкновений частиц и ядер в квантовой механике. В рамках курса студенты познакомятся с описанием простейших релятивистских процессов в бесспиновой и спинорной электродинамике на основе формализма функций Грина, с методами решения задачи рассеяния в нерелятивистской потенциальной теории на основе интегральных и дифференциальных уравнений, а также с диаграммной техникой Фейнмана в теории рассеяния и ядерных реакций.

Дисциплина реализуется на 1 курсе во 2 семестре и является обязательной для освоения обучающимися.

Объем дисциплины составляет 3 з.е., в том числе 34 академических часа, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 74 академических часа, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

Промежуточная аттестация по дисциплине (модулю) – экзамен во 2 семестре.

## 1. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина «Введение в квантовую теорию рассеяния» входит в блок «Профессиональный» вариативной части и является обязательной для освоения обучающимися.

## 2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Базовые знания в области общей и теоретической физики в объеме классических университетских курсов

## 3. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)	
ОПК-1	<p><u>Знать</u> основные законы, научные концепции и методы исследований в области современной ядерной физики</p> <p><u>Уметь</u> применять на практике результаты актуальных научных исследований в области современной ядерной физики</p> <p><u>Владеть</u> навыками применения современных научных принципов и методов исследования в области ядерной физики для решения профессиональных задач</p>
МПК-1	<p><u>Знать</u> основные теории и методы, приводящие к квантовой теории столкновений и используемые в ней.</p> <p><u>Уметь</u> применять различные аналитические математические методы для описания и решения задач квантовой теории столкновений.</p> <p><u>Владеть</u> численными методами решения дифференциальных и интегральных уравнений, используемых в квантовой теории столкновений.</p>

4. Объем дисциплины (модуля) составляет 3 з.е., в том числе: 34 академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 74 академических часов, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

Контактная работа включает в себя: занятия лекционного типа и занятия семинарского типа.

5. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),  Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (ак.ч.)	В том числе					Самостоятельная работа обучающегося, академические часы	Форма текущего контроля успеваемости, наименование
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) <i>Виды контактной работы, академические часы<sup>1</sup></i>						
		Занятия лекционного типа (лекции)	Занятия семинарского типа			Всего		
Семинары	Лабораторные занятия*		Практические занятия*					
Эффективное поперечное сечение.	6	1	1			2	4	Опрос
S-матрица и ее связь с сечением.	6	1	1			2	4	Опрос, Проверка домашнего задания
Электродинамика бесспиновых частиц.	6	1	1			2	4	Опрос, Проверка домашнего задания
Простейшие процессы в спиновой электродинамике.	12	2	2			4	8	Опрос, Проверка домашнего задания
Пропагаторы в нерелятивистской квантовой теории.	12	2	2			4	8	Опрос, Проверка домашнего задания

<sup>1</sup>Текущий контроль успеваемости может быть реализован в рамках занятий лекционного и(или) семинарского типа.

Нерелятивистские фейнмановские диаграммы.	12	2	2			4	8	Опрос, Проверка домашнего задания
Операторный формализм нерелятивистской теории рассеяния.	12	2	2			4	8	Опрос, Проверка домашнего задания
Методы стационарной теории рассеяния.	12	2	2			4	8	Опрос, Проверка домашнего задания
Поляризациянные наблюдаемые	12	2	2			4	8	Опрос, Проверка домашнего задания
Киральная эффективная теория нуклонных сил.	12	2	2			4	8	Опрос
Промежуточная аттестация							6	Экзамен
<b>Итого</b>	<b>108</b>	<b>34</b>					<b>74</b>	

\*Лабораторные занятия, практические занятия относятся к практической подготовке обучающихся.

### *Тема 1. Эффективное поперечное сечение.*

Эффективное поперечное сечение рассеяния в классической механике.

Рассеяние на абсолютно твердой сфере. Радужное рассеяние, сияние, орбитирование.

Неприменимость классической механики при больших прицельных параметрах.

Инвариантное сечение. Относительная скорость. Относительный импульс. Диаграмма импульсов для бинарного процесса  $1+2 \rightarrow 3+4$ . Преобразование дифференциального сечения из одной инерциальной системы отсчета в другую. Элементы релятивистской кинематики. Инвариантная амплитуда, ее связь с сечением, фазовые объемы.

### *Тема 2. S-матрица и ее связь с сечением.*

S-матрица рассеяния. Унитарность S-матрицы. Формула Дайсона для S-матрицы в первом порядке теории возмущений. Уравнение Клейна-Гордона-Фока, его решения, нормировка состояний свободных бесспиновых частиц, сохраняющийся ток. Инвариантная амплитуда и ее связь с сечением в релятивистском формализме (вывод формулы). Вывод формулы для инвариантного дифференциального фазового объема в системе центра масс в произвольной ИСО.

Двух- и трех-частичные фазовые объемы (вывод формул). Рекуррентное соотношение для фазовых объемов. Дифференциальные сечения реакций  $1+2 \rightarrow 3+4$  и  $1+2 \rightarrow 3+4+5$ . Оптическая теорема (вывод формулы в релятивистском формализме).

### *Тема 3. Электродинамика бесспиновых частиц.*

Интерпретация состояний с отрицательной энергией по Фейнману-Штюкельбергу. Электродинамика бесспиновых частиц. Бесспиновый электрон во внешнем поле. Амплитуда рассеяния в бесспиновой электродинамике в первом порядке по взаимодействию. Ток перехода в теории К-Г-Ф. Бесспиновое рассеяние  $e\mu \rightarrow e\mu$ . Симметризация амплитуд для тождественных частиц,  $e^-e^-$ -рассеяние.  $e^+e^-$ -рассеяние. Кроссинг-симметрия. Происхождение фейнмановского пропагатора в упорядоченной по времени (старой) теории возмущений на примере  $e\mu$ -рассеяния, комптоновского рассеяния, аннигиляции  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ . Система бесконечного импульса (динамика светового фронта).

### *Тема 4. Простейшие процессы в спинорной электродинамике.*

Уравнение Дирака. Решения свободного уравнения Дирака. Нормировка, условие полноты. Сохраняющийся ток. Левые и правые фермионы. Киральность и спиральность дираковского фермиона в пределе высоких энергий. Операция зарядового сопряжения. Сохранение спиральности при высоких энергиях. Угловые распределения продуктов реакций (рассеяния), получаемые из требования сохранения спиральности и полного углового момента в электрослабых процессах. Рассеяние  $e\mu \rightarrow e\mu$  в спинорной электродинамике. Вывод формулы для дифференциального сечения процесса  $\bar{q}q \rightarrow \bar{l}l$  в первом порядке по взаимодействию и анализ его угловой зависимости в терминах D-функций Вигнера. Упругое NN рассеяние в приближении однопионного обмена в псевдоскалярной и псевдовекторной связи  $\pi NN$ .

### *Тема 5. Пропагаторы в нерелятивистской квантовой теории.*

Нерелятивистская квантовая теория. Нормировка, условие полноты и ортогональности состояний, описываемых плоскими волнами. Функция распространения (пропагатор) свободной нерелятивистской частицы и ее четырехмерное представление. Расплывание волновых пакетов.

Функция Грина для оператора  $(ih \frac{\partial}{\partial t} - H_0)$ .

Формальное решение зависящего от времени уравнения Шредингера с полным гамильтонианом  $H = H_0 + V$ .

T-матричный элемент перехода. Амплитуда двухступенчатого процесса  $AB \rightarrow CD$   
Полюсная фейнмановская диаграмма.

Амплитуда трехступенчатого процесса  $AB \rightarrow CD$ , треугольная диаграмма.

### *Тема 6. Нерелятивистские фейнмановские диаграммы.*

Дисперсионная теория ядерных реакций И.С. Шапиро.

Правила нерелятивистской диаграммной техники для реакций с участием ядер и частиц. Связь нерелятивистской фейнмановской амплитуды с S-матрицей и сечением. Классификация особенностей фейнмановских диаграмм по Л.Д. Ландау. Собственные особенности нерелятивистских фейнмановских диаграмм (полос, нормальный порог, треугольная особенность). Критерий Треймана-Янга для выделения полюсных диаграмм. Вершинная функция виртуального процесса  $12 \rightarrow 1+2$ . Расчет сечения процесса  $pd \rightarrow pd$  на примере треугольной диаграммы однократного pN-рассеяния.

### *Тема 7. Операторный формализм нерелятивистской теории рассеяния.*

Асимптотическое условие в нестационарной квантовой теории рассеяния.

Стационарная задача рассеяния на силовом центре в квантовой механике. Граничное условие. Амплитуда рассеяния и ее связь с сечением. Сохранение вероятности с учетом интерференции падающей и рассеянной волн. Интегральное уравнение для волновой функции рассеяния (уравнение Липпмана-Швингера). Вывод формулы для свободной функции Грина  $G_0^\pm(E; \mathbf{r}, \mathbf{r}')$ . Выражение для амплитуды рассеяния через потенциал взаимодействия и волновую функцию рассеяния  $\Psi_k^{(+)}$ .

Оператор Грина  $G(z)$ , его аналитические свойства, спектральное представление, уравнения для  $G(z)$ -оператора. Оператор перехода  $T(z)$ : определение, интегральное уравнение. Связь матричных элементов оператора перехода  $T(z)$  с амплитудой рассеяния. Вывод формулы для амплитуды виртуального распада (синтеза) ядра  $A$  на два фрагмента  $A \leftrightarrow B+C$  на основе T-операторного формализма.

Борновское приближение. Условия применимости. Угловая и энергетическая зависимость сечения рассеяния быстрых частиц на потенциале конечного радиуса. Примеры: рассеяние на потенциале Юкавы, резерфордовское рассеяние.

### *Тема 8. Методы стационарной теории рассеяния.*

Метод парциальных волн для решения уравнения Шредингера в задаче рассеяния на сферически-симметричном потенциале. Фазовые сдвиги.

Длина рассеяния и приближение эффективного радиуса. Резонансное рассеяние. Формула Брейта-Вигнера. Связанное состояние и виртуальный уровень. Эйкональное приближение. Рассеяние на абсолютно черной сфере. Основные особенности дифракционного рассеяния. Теория многократного рассеяния Глаубера-Ситенко. Пример: упругое и неупругое рассеяние протона на дейтроне.

Стационарная теория рассеяния на силовом центре: граничные условия, свободная функция Грина, амплитуда рассеяния. Метод парциальных волн. S-матрица, фазовые сдвиги. Оптическая теорема. Уравнение Липпмана-Швингера в задаче двух тел. Разложение интегрального уравнения по парциальным волнам. Рассеяние на короткодействующем потенциале. Длина рассеяния. Приближение эффективного радиуса. Резонансное рассеяние. Временная задержка. Формулы Брейта и Вигнера.

Интерференция резонанса с фоном. Пример: дельта-резонансная модель пион-нуклонного рассеяния.

#### Тема 9. Поляризационные наблюдаемые.

Чистые и смешанные спиновые состояния. Спиновая матрица плотности. Свойства спин-тензорных операторов. Спиновая структура амплитуд реакций  $\frac{1}{2}+0 \rightarrow \frac{1}{2}+0$ ,  $\frac{1}{2}+1 \rightarrow c+d$ ,  $\frac{1}{2}+\frac{1}{2} \rightarrow 0+0$ ,  $\frac{1}{2}+1 \rightarrow \frac{1}{2}+0$  при сохранении четности и углового момента. Матрица плотности конечного состояния, образующегося в реакции, вычисление наблюдаемых. Спиновые функции и поляризационная матрица плотности для спина  $S=1$ . Спиновые наблюдаемые реакции  $\frac{1}{2}+1 \rightarrow \frac{1}{2}+1$ . Формализм независимых спиновых амплитуд. P- и T-инвариантность. Проверка T-инвариантности в  $pd$  рассеянии с двойной поляризацией, нуль-сигнал T-нарушения при сохранении P-инвариантности. D-функции Вигнера. Полный поляризационный эксперимент.

#### Тема 10. Киральная эффективная теория нуклонных сил.

Малые параметры в теории сильных взаимодействий. Киральная симметрия классического лагранжиана КХД, спонтанное нарушение киральной инвариантности (СНКИ). Теорема Голдстоуна-Намбу. Пион как голдстоуновский бозон. Понятие о современной киральной пертурбативной теории нуклонных сил, низкоэнергетические константы, многонуклонные силы.

### 6. Фонд оценочных средств для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)

6.1. Типовые задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения:

Типовые вопросы для проведения текущей проверки успеваемости:

1. Условия неприменимости классической механики
2. Примеры поляризационных наблюдаемых
3. Какова связь инвариантного сечения  $d\sigma$  с числом событий  $dN$ , происходящих в элементе объема  $dV$  за время  $dt$
4. Привести формулу для амплитуды перехода свободной нерелятивистской частицы из одной точки пространства  $x_0$ , в которой она находится в начальный момент времени  $t_0$ , в другую точку  $x$  в момент времени  $t > t_0$ .
5. Чему равно сечение рассеяния в квантовой механике на абсолютно твердой сфере радиуса  $R$  в пределе низких энергий  $E \rightarrow 0$ ?
6. Оптическая теорема приводит к следующему соотношению между мнимой частью амплитуды упругого рассеяния вперед  $F(0^\circ)$  и полным сечением взаимодействия в бинарной системе  $a+b$ :

$$\text{Im}F(0^\circ) = \frac{k}{4\pi}\sigma$$

Какой смысл имеет сечение  $\sigma$ ?

7. Рассеяние электрона на мюоне в однофотонном приближении описывается одной фейнмановской диаграммой, содержащей обмен фотоном между электроном и мюоном. В каком направлении движется этот фотон — к электрону или к мюону?
8. Нерелятивистская фейнмановская треугольная диаграмма упругого  $pd$ -рассеяния позволяет выразить амплитуду процесса  $pd \rightarrow pd$  в виде произведения амплитуды упругого  $pN$ -рассеяния на упругий формфактор дейтрона  $S_d(\vec{\Delta}/2)$ , где  $\Delta$  – переданный дейтрону 3-импульс. Какой физический смысл формфактора  $S_d(\Delta/2)$ ?

Типовые вопросы, задания для проведения промежуточной аттестации (экзамена):

1. Инвариантная амплитуда и ее связь с сечением взаимодействия - вывод формулы.
2. Вывод формулы для инвариантного дифференциального двухчастичного фазового объема в произвольной инерциальной системе отсчета
3. Унитарность  $S$ -матрицы и оптическая теорема - вывод формулы в релятивистском формализме.
4. Происхождение фейнмановского пропагатора в упорядоченной по времени (старой) теории возмущений.
5. Угловые распределения продуктов реакций (рассеяния), получаемые из требования сохранения спиральности и полного углового момента в электрослабых процессах. Рассеяние  $e\mu \rightarrow e\mu$  в спинорной электродинамике.
6. Функция распространения (пропагатор) свободной нерелятивистской частицы и ее четырехмерное представление. Расплывание волновых пакетов.
7. Расчет сечения процесса  $pd \rightarrow pd$  в (бесспиновом) приближении однократного  $pN$ -рассеяния
8. Оператор Грина  $G(z)$ , его аналитические свойства, уравнения для  $G(z)$ -оператора. Оператор перехода  $T(z)$ : определение, интегральное уравнение.
9. Собственные особенности нерелятивистских фейнмановских диаграмм (полюс, нормальный порог, треугольная особенность). Критерий Треймана-Янга для выделения полюсной диаграммы.

## 6.2. Шкала и критерии оценивания

Результат освоения дисциплины	Критерии оценивания знаний, умений и навыков			
	2/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено
Знания	Отсутствие знаний	В целом успешные, но не систематические знания	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы	Успешные и систематические знания

			знания	
Умения	Отсутствие умения применять знания фундаментальных и актуальных проблем.	В целом успешное, но не систематическое умение применять знания	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение применять знания	Успешное и систематическое умение применять знания
Навыки	Отсутствие/фрагментарные навыки в решении задач	В целом успешные, но не систематические навыки в решении задач	В целом успешные, но содержащее отдельные пробелы навыки в решении задач	Успешные и систематические навыки в решении задач

## 7. Ресурсное обеспечение

Перечень основной и дополнительной учебной литературы:

1. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теория поля. Курс теоретической физики т.2, М. Наука, 1980.
2. Дж. Тейлор, Теория рассеяния. Квантовая теория нерелятивистских столкновений. М. Мир, 1975.
3. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Квантовая механика. Нерелятивистская теория, М. Наука, 1974.
4. В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский, Квантовая электродинамика, М. Наука, 1989.
5. В.В. Балашов, Квантовая теория столкновений, МГУ, 1985.
6. А.Г. Ситенко, Лекции по теории рассеяния, Киев, 1971.
7. Г.Д. Алхазов, В.В. Анисович, П.Э. Волковицкий. Дифракционное взаимодействие адронов с ядрами при высоких энергиях, Л. Наука, Ленинградское отд, 1991.
8. А.Г. Ситенко. Теория ядерных реакций, М. Энергоатомиздат, 1983.
9. С. Сунакава. Квантовая теория рассеяния. Перевод с японского, М. Мир, 1979.
10. А.Б. Мигдал, Качественные методы в квантовой теории, М. Наука, 1975.
11. Ch.J. Joachain, Quantum Collision theory, North-Holland Publ.Comp. Amsterdam, 1975.
12. К. Блум, Теория матрицы плотности и ее приложения. Перевод с английского, М. Мир, 1983.
13. Т. Ерикссон, В. Вайзе. Пионы и ядра. Перевод с английского. М. Наука, 1991.

14. Ю.Н. Узиков, Избранные главы квантовой теории столкновений, М., МГУ им. М.В. Ломоносова, 2017

Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

1. База данных РИНЦ (российский индекс научного цитирования)  
<http://www.elibrary.ru>

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»:

1. Сайт филиала: <http://dubna.msu.ru>

Описание материально-технической: курс может быть прочитан в поточной аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски

**8. Язык преподавания:** русский