

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:
Декан
С.Н. Филимонов

Рабочая программа дисциплины

Основы квантовой электродинамики

по направлению подготовки

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки:
Фундаментальная и прикладная физика

Форма обучения
Очная

Квалификация
Магистр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
О.Н. Чайковская

Председатель УМК
О.М. Сюсина

Томск – 2025

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ПК-1 Способен самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИПК-1.1 Знает основные стратегии исследований в выбранной области физики, критерии эффективности, ограничения применимости

ИПК-1.2 Умеет выделять и систематизировать основные цели исследований в выбранной области физики, извлекать информацию из различных источников, включая периодическую печать и электронные коммуникации, представлять её в понятном виде и эффективно использовать

ИПК-1.3 Владеет навыками аналитической переработки информации, проведения исследований с помощью современной аппаратуры и информационных технологий, обобщения и представления результатов, полученных в процессе решения задач исследования

2. Задачи освоения дисциплины

– Освоить аппарат и методы квантовой электродинамики.

– Научиться применять понятийный аппарат и методы квантовой электродинамики для решения практических задач профессиональной деятельности.

3. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к Блоку 1 «Дисциплины (модули)».

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор.

4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине

Третий семестр, зачет с оценкой

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: Классическая механика, Классическая электродинамика, Квантовая механика, Методы математической физики

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 часов, из которых:

-лекции: 16 ч.

-практические занятия: 16 ч.

в том числе практическая подготовка: 16 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины, структурированное по темам

Тема 1. Общие принципы построения квантовой электродинамики (КЭД)

Стандартные обозначения. Система единиц. Закон Кулона и уравнения Максвелла в новой системе единиц. Типичная постановка задачи в квантовой теории поля (КТП): сечения рассеяния и ширины распадов. Примеры некоторых интуитивно ясных диаграмм Фейнмана.

Тема 2. Основы лагранжева формализма в КЭД

Принцип наименьшего действия. Лагранжиан и плотность лагранжиана. Уравнения Лагранжа. Гамильтониан, импульс, момент количества движения. Пример лагранжева подхода для уравнений Максвелла. Тензор напряженности электромагнитного поля.

Тема 3. Электромагнитное поле

Решение уравнений Максвелла для свободного электромагнитного поля в калибровке Лоренца. Квантование электромагнитного поля как набора гармонических осцилляторов. Операторы рождения и уничтожения. Коммутационные соотношения между операторами рождения и уничтожения. 4-потенциал, энергия и импульс квантованного электромагнитного поля. Калибровка Лоренца для квантованного электромагнитного поля.

Тема 4. Дираковское поле.

Уравнение Паули. Алгебра матриц Паули. Уравнение Клейна-Гордона. Естественное возникновение биспиноров. Явный вид γ -матриц в стандартном представлении (представлении Паули-Дирака). Решение уравнения Дирака для свободной частицы с положительной энергией в стандартном представлении. Нормировка решения.

Тема 5. S-матрица и правила Фейнмана.

Гамильтониан взаимодействия в КЭД. Представления Шредингера и Гейзенберга. Представление взаимодействия. Матрица рассеяния (S-матрица) и ее запись в виде ряда. Теорема Вика. Правила Фейнмана для вычисления петлевых диаграмм.

Тема 6. Сечения, ширины распадов и кинематика.

Выражение для вероятности перехода в единицу времени. Плотность конечных состояний и фазовый объем. Выражение для ширины распадов. Выражение для сечения реакции $2 \rightarrow n$. Выражение для сечения реакции $2 \rightarrow 2$. Мандельштамовские переменные. Кросс-каналы и физические области.

Тема 7. Вычисление процессов в КЭД: эффект Комптона, электрон-позитронная аннигиляция, рассеяние электрона на электроном.

Применение методов квантовой электродинамики для однопетлевых процессов. Вычисления для эффекта Комптона. Рассеяние электрона на электроном. Аннигиляция электрон-позитронной пары.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, проведения контрольной работы и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

Оценочные материалы текущего контроля размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» – <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Зачет с оценкой в третьем семестре проводится в устной форме по билетам. Билет состоит из двух теоретических вопросов. Продолжительность зачета 1 час.

Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» – <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>.

11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» – <https://moodle.tsu.ru>.

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

в) Контрольные вопросы для самостоятельной работы студентов.

1. Лагранжев подход для уравнений Максвелла.
2. Тензор напряженности электромагнитного поля
3. Квантование магнитного поля как набора гармонических осцилляторов.
4. Калибровка Лоренца для квантового электромагнитного поля.
5. Калибровочные преобразования и вектора поляризации.
6. Коммутационные соотношения для операторов электромагнитного поля.
7. Пропагатор фотонного поля.
8. Уравнение Клейна-Гордона.
9. Уравнение Дирака.
10. Алгебра матриц Дирака.
11. Преобразование Фолди-Вутхайзера.
12. Лагранжиан свободного дираковского поля. Введение взаимодействия с электромагнитным полем.
13. Теорема Фарри.
14. S-матрица.
15. Теорема Вика.
16. Правила Фейнмана.
17. Мандельштамовские переменные.
18. Кросс-каналы.
19. Вычисления для эффекта Комптона $e^- \gamma \rightarrow e^- \gamma$
20. Рассеяние электрона на электроном.
21. Аннигиляция электрон-позитронной пары.

г) Задачи для самостоятельной работы студентов.

1. Зная явный вид тензора напряженности электромагнитного поля $F^{\mu\nu}(x)$ получить явный вид $F_{\mu\nu}(x)$.

2. Предполагая, что движение электрона в атоме водорода можно описать при помощи уравнения Клейна-Гордона-Фока с кулоновским взаимодействием, получить выражение для тонкой структуры спектра. Совпадает ли полученная формула с экспериментальными данными?

3. Доказать, что операция взятия следа двух матриц удовлетворяет всем аксиомам скалярного произведения. Самостоятельно сформулируйте, каким свойствам при этом должны удовлетворять указанные матрицы.

4. Почему не имеет никакого физического смысла калибровочное преобразование электромагнитного поля вида $\tilde{A}^\mu = A^\mu e^{i\alpha(x)}$?

5. Доказать, что распад $\rho^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$ запрещен. Воспользоваться тем, что π^0 – мезоны являются бозонами.

6. Найти угловые распределения электронов и фотонов для эффекта Комптона: а) в системе центра масс сталкивающихся частиц; б) в системе покоя начального электрона

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

– Вайнберг С. Квантовая теория поля: пер. с англ. Т. 2 / С. Вайнберг; под ред. В. Ч. Жуковского. – М.: Физматлит, 2015. – 527 с.

2. Пескин М. Е. Введение в квантовую теорию поля / М. Пескин, Д. Шредер; Пер. с англ. под ред. А. А. Белафина, А. В. Беркова. – М. Ижевск: РХД, 2001. – 784 с.

3. Берестецкий В. Б. Квантовая электродинамика / В. Б. Берестецкий, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский. – М.: Физматлит, 2006. – 719 с.
4. Петрина Д. Я. Квантовая теория поля: [учебное пособие для студентов физических специальностей университетов] / Д. Я. Петрина. – М.: ЛИБРОКОМ, 2014. – 246 с.
5. Ахиезер А. И. Квантовая электродинамика / А. И. Ахиезер, В. Б. Берестецкий. – М.: Наука, 1981. – 432 с.
6. Боголюбов Н. Н. Введение в теорию квантованных полей / Н. Н. Боголюбов, Д. В. Ширков. – М.: Наука, 1984. – 597 с.
7. Мессиа А. Квантовая механика: В 2 т. Т. 2 / Альберт Мессиа; Пер. с фр. П. П. Кулиша; под ред. Л. Д. Фаддеева. – М.: Наука. Физматлит, 1979. – 583 с.
8. Ициксон К. Квантовая теория поля: В 2-х т. Т. 1 / К. Ициксон, Ж.-Б. Зюбер; Пер. с англ. под ред. Р. М. Мир-Касимова. – М.: Мир, 1984. – 448 с.

б) дополнительная литература:

- Соколов А. А. Релятивистский электрон / А. А. Соколов, И. М. Тернов. – 2-е изд., перераб. – М.: Наука, 1983. – 303 с.
- Боголюбов Н. Квантовые поля / Н. Н. Боголюбов, Д. В. Ширков. – М.: Физматлит, 2005. – 382 с.
- Квантовая электродинамика явлений в интенсивном поле / Отв. ред. В. Л. Гинзбург; Акад. наук СССР, Физ. ин-т им. П. Н. Лебедева. – М.: Наука, 1979. – 278 с.
- Radovanović V. Problem Book in Quantum Field Theory / Springer eBooks. – URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-77014-5>.
- 5. Greiner W. Quantum Electrodynamics / W. Greiner, J. Reinhardt. – Springer eBooks. – URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-87561-1>.

в) ресурсы сети Интернет:

- открытые онлайн-курсы
- база электронных препринтов (разделы hep-th, hep-ph) – <http://arxiv.org>
- Никитин Н.В. (МГУ) «Квантовая электродинамика» – <http://nuclphys.sinp.msu.ru/qel/index.html>

Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

- Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office OneNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook); системы компьютерной верстки LaTeX;
- публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

- Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ – <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>
- Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ – <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>
- ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>
- ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>
- Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>
- ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>
- ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

Аудитории для проведения занятий лекционного и семинарского типа индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешенном формате («Актру»).

15. Информация о разработчиках

Богданов Олег Викторович, доктор физико-математических наук, доцент, лаборатория анализа данных физики высоких энергий, ведущий научный сотрудник