

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы физики
и исследований им. Ландау
А.В. Рогачев**

| | |
|----------------------------|--|
| | Рабочая программа дисциплины (модуля) |
| по дисциплине: | Квантовая электродинамика |
| по направлению: | Прикладные математика и физика |
| профиль подготовки: | Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики высоких энергий |
| курс: | 4 |
| квалификация: | бакалавр |

Семестры, формы промежуточной аттестации:

7 (осенний) - Дифференцированный зачет
8 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 120 всего, в том числе:

лекции: 60 час.
семинары: 60 час.
лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 225, всего зач. ед.: 5

Программу составил: А.К. Лиходед, д-р физ.-мат. наук, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры физики высоких энергий 03.02.2022

Аннотация

Курс знакомит слушателей с теорией электрослабых взаимодействий – естественной частью подготовки любого специалиста в области современной физики частиц. В результате освоения дисциплины студенты овладеют математическим аппаратом квантовой теории поля, научатся вычислять времена жизни частиц, освоят теорию Вайнберга-Салама.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

ознакомить слушателей с теорией электрослабых взаимодействий – естественной частью подготовки любого специалиста в области современной физики частиц.

Задачи дисциплины

- формирование у обучающихся базовых знаний по электрослабым взаимодействиям;
- формирование навыков для решения задач.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|---|---|
| ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности | ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения |
| | ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки |
| | ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов |
| ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности | ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности |
| ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов | ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области |
| | ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов |
| | ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей |

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

Теорию Вайнберга-Салама.

уметь:

Вычислять времена жизни частиц.

владеть:

Математическим аппаратом квантовой теории поля.

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

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

| | |
|--|---|
| | Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час. |
|--|---|

| № | Тема (раздел) дисциплины | Лекции | Семинары | Лаборат. работы | Самост. работа |
|-----------------------|--|---------------------|----------|-----------------|----------------|
| 1 | Частицы и их взаимодействие в релятивистской квантовой механике. Скалярные частицы. Примеры простейших процессов. Частицы со спином $\frac{1}{2}$. Простейшие процессы электродинамики. | 10 | 10 | | 10 |
| 2 | Электрон во внешнем поле. Перенормировки. Радиационные поправки. Трудности квантовой электродинамики. Структура слабых токов. | 10 | 10 | | 10 |
| 3 | Распад мюона. Лептонные распады адронов с сохранением странности. Лептонные распады пионов и нуклонов. Лептонные распады К-мезонов и гиперонов. Нелептонное взаимодействие, изменяющее странность. Феноменология нелептонных распадов гиперонов. | 10 | 10 | | 10 |
| 4 | Динамика нелептонных распадов гиперонов. Кварковые диаграммы. Осцилляции странности. Регенерация. | 10 | 10 | | 15 |
| 5 | Распады очарованных адронов. Кварки третьего поколения. Взаимодействие нейтрино с электронами. Взаимодействие нейтрино с нуклонами. Калибровочная инвариантность. | 10 | 10 | | 15 |
| 6 | Спонтанное нарушение симметрии. Стандартная модель электрослабого взаимодействия. Нейтральные токи. Свойства промежуточных бозонов. Свойства хиггсовских бозонов. | 10 | 10 | | 15 |
| Итого часов | | 60 | 60 | | 75 |
| Подготовка к экзамену | | 30 час. | | | |
| Общая трудоёмкость | | 225 час., 5 зач.ед. | | | |

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 7 (Осенний)

1. Частицы и их взаимодействие в релятивистской квантовой механике. Скалярные частицы. Примеры простейших процессов. Частицы со спином $\frac{1}{2}$. Простейшие процессы электродинамики.

Функция распространения. Вычисление наблюдаемых величин. Электромагнитное поле. Свободные релятивистские частицы с массой. Взаимодействие бесспиновых частиц. Взаимодействие бесспиновых частиц с электромагнитным полем.

Диаграммы и амплитуды в импульсном представлении. Амплитуды реально наблюдаемых процессов. Манделштамовская плоскость. Комптон-эффект для π -мезона.

Свободная частица со спином $\frac{1}{2}$. Функция Грина электрона. Матричные элементы амплитуд рассеяния для электронов. Взаимодействие электрона с фотоном.

Рассеяние электронов. Связь спина со статистикой. Рассеяние электрона фотоном (Комптон-эффект). Аннигиляция электрон-позитронной пары в два фотона.

2. Электрон во внешнем поле. Перенормировки. Радиационные поправки. Трудности квантовой электродинамики. Структура слабых токов.

Рассеяние электронов во внешнем поле. Тормозное излучение во внешнем поле. Формула Вайцекера-Вильямса.

Симметрии в квантовой электродинамике. Причинность и унитарность. Перенормировка массы электрона. Перенормировка функции Грина фотона. Перенормировка вершинной части. Обобщенное тождество Уорда.

Радиационные поправки к рассеянию электрона во внешнем поле. Уравнение Дирака во внешнем поле. Радиационные поправки к уровням водородоподобных атомов.

Перенормировки и расходимости. Проблема нуля заряда в КЭД.

Левые заряженные токи. Нарушение Р- и С-инвариантности. Универсальность заряженного тока. Нейтральный ток.

3. Распад мюона. Лептонные распады адронов с сохранением странности. Лептонные распады пионов и нуклонов. Лептонные распады К-мезонов и гиперонов. Нелептонное взаимодействие, изменяющее странность. Феноменология нелептонных распадов гиперонов.

Амплитуда и вероятность распада. Распад поляризованного мюона.

Изотопические свойства ud -тока. Связь векторного ud с изовекторным электромагнитным током. Слабый заряд. Киральная инвариантность.

Распады \rightarrow Распад $+ \rightarrow 0 e^+$. -распад нейтрона. Векторные и аксиальные формфакторы. Вероятность распада и угловые корреляции. Распады $\rightarrow e$.

Правило $|S|=1$ и $S=Q$. $SU(3)$ - и $SU(2)$ -свойства us -тока. Лептонные распады К-мезонов и гиперонов.

Свойства затравочного нелептонного лагранжиана. Учет жестких глюонов. Эффективный нелептонный лагранжиан.

Семестр: 8 (Весенний)

4. Динамика нелептонных распадов гиперонов. Кварковые диаграммы. Осцилляции странности. Регенерация.

Кварковые диаграммы. Факторизация внешних диаграмм для распада $\rightarrow p$. Усиление вклада правых кварков. Распад $\rightarrow n$. Распады -гиперона.

K_1 - и K_2 -мезоны. Изотопические соотношения и диаграммы для распадов $K \rightarrow 2$. Распады $K \rightarrow 3$

Переходы $K_1 \leftrightarrow K_2$ и разность масс $K_1 - K_2$. Механизм Глешоу-Иллиопулоса-Майани. Осцилляции странности. Регенерация.

Распад $KL \rightarrow$ Другие наблюдавшиеся СР-неинвариантные эффекты. Сверхслабое перемешивание. Нарушение Т-инвариантности и дипольный момент нейтрона.

Нейтрино Полулептонные и адронные распады.

5. Распады очарованных адронов. Кварки третьего поколения. Взаимодействие нейтрино с электронами. Взаимодействие нейтрино с нуклонами. Калибровочная инвариантность.

Распады с-кварка. Сравнение D^+ и D^0 мезонов. Роль виртуальных глюонов и «спектаторных» кварков. Двухчастичные лептонные распады D-мезонов. Переходы $D^0 \leftrightarrow D^0$.

Унитарная матрицы pp , матрица девяти кварковых токов. Распады b-кварка. Вклады b и t кварков в смешивание K, B, Bs и D мезонов. О нарушении СР-инвариантности в смешивании K-мезонов.

Кинематика и сечение реакции e. Упругое e-рассеяние под действием заряженного тока. Общий вид сечений. Другие проявления e-взаимодействия. Рождение мюонной пары под действием нейтрино в кулоновском поле ядра.

Партонны. Кинематика и сечения взаимодействия лептонов с партонами. Распределения партонов. Феноменология глубоко неупругих процессов. Партонная модель и квантовая хромодинамика.

Глобальная абелева симметрия $U(1)$. Глобальная неабелева симметрия $SU(2)$. Локальные симметрии. Как учесть массы?

6. Спонтанное нарушение симметрии. Стандартная модель электрослабого взаимодействия. Нейтральные токи. Свойства промежуточных бозонов. Свойства хиггсовских бозонов.

Спонтанное нарушение калибровочной абелевой симметрии. О сохранении электрического заряда. Спонтанное нарушение локальной $SU(2)$ -симметрии.

Основные черты модели. Массы W - и Z -бозонов. Связь между электрическим зарядом и константами g , g' . Связь между вакуумным средним и константой Ферми. Масса электрона, других лептонов и кварков.

Рассеяние электронного нейтрино на электроны. Рассеяние электронного нейтрино на мюоне. Аннигиляция $e^+e^- \rightarrow \gamma$. Нейтральные токи и взаимодействие нейтрино с нуклонами.

Распады W - и Z -бозонов. Рождение Z -бозонов в электрон-позитронной аннигиляции. Рождение W - и Z -бозонов в pp -столкновениях.

О массе бозона Хиггса. Роль H -бозона при высоких энергиях. Взаимодействие H -бозона с тяжелыми кварками и глюонами. Взаимодействие H -бозона с W - и Z -бозонами. Общие замечания о хиггсовских бозонах.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, доска, медиапроектор, экран.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Лептоны и кварки [Текст] / Л. Б. Окунь. — 7-е изд. — [Научное изд.] — М. : ЛЕНАНД, 2015. — 352 с.
2. Введение в физику высоких энергий [Текст] / Д. Перкинс ; пер. с англ. А. В. Беркова ; под ред. Б. А. Долгошеина - М. Энергоатомиздат, 1991
3. Кварки и партонны [Текст], введение в теорию /Ф. Клоуз; пер. с англ. П. Б. Вигмана; под ред. Н. Н. Николаева, An introduction to quarks and partons. -М., Мир, 1982
4. Кварки и лептоны. Введение в физику частиц [Текст] = Quarks and leptons: an introductory course in modern particle physics : [учеб. пособие для вузов] / Ф. Хелзен, А. Мартин ; пер. с англ. А. П. Горячки [и др.] ; под ред. А. Ц. Амадуни. — М. : Мир, 1987. — 455 с.
1. В.Н. Грибов, Квантовая электродинамика
2. Фейнман Р., Взаимодействие фотонов с адронами, Наука, М., 1975

Дополнительная литература

1. Л.Б.Окунь. Физика элементарных частиц. М.: Наука, 1988

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Не используются

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

Не предусмотрено.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента в соответствии с данными в рабочей программе. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях;
- при необходимости подготовку к практическим занятиям, коллоквиумам, дифференцированному зачету и экзамену.

Показателем владения материалом служит умение решать задачи. Для формирования умения применять знания на практике студенту необходимо решать, как можно больше задач.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору или преподавателю, ведущему практические занятия.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

| | |
|---|---|
| по направлению: | Прикладные математика и физика |
| профиль подготовки: | Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики высоких энергий |
| курс: | <u>4</u> |
| квалификация: | бакалавр |
| Семестры, формы промежуточной аттестации: | |
| 7 (осенний) - Дифференцированный зачет | |
| 8 (весенний) - Экзамен | |
| Разработчик: | А.К. Лиходед, д-р физ.-мат. наук, профессор |

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

| Код и наименование компетенции | Индикаторы достижения компетенции |
|---|---|
| ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности | ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения |
| | ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки |
| | ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов |
| ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности | ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности |
| ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов | ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области |
| | ПК-4.2 Знает источники происхождения и умеет производить оценку погрешности измерений и достоверности экспериментальных результатов |
| | ПК-4.3 Способен обосновать причинно-следственные отношения используемых понятий и моделей |

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Квантовая электродинамика» обучающийся должен:

знать:

Теорию Вайнберга-Салама.

уметь:

Вычислять времена жизни частиц.

владеть:

Математическим аппаратом квантовой теории поля.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлого занятия.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

1. Частицы и их взаимодействие в релятивистской квантовой механике.
2. Скалярные частицы.
3. Примеры простейших процессов.
4. Частицы со спином $\frac{1}{2}$.
5. Простейшие процессы электродинамики.
6. Электрон во внешнем поле.
7. Перенормировки.
8. Радиационные поправки.
9. Трудности квантовой электродинамики.
10. Структура слабых токов.
10. Распад мюона.
11. Лептонные распады адронов с сохранением странности.
12. Лептонные распады пионов и нуклонов.

13. Лептонные распады К-мезонов и гиперонов.
14. Нелептонное взаимодействие, изменяющее странность.
15. Феноменология нелептонных распадов гиперонов.
16. Динамика нелептонных распадов гиперонов.
17. Нелептонные распады К-мезонов.
18. Нейтральные К-мезоны в вакууме и среде.
19. Нарушения СР-инвариантности.
20. Распады -лептона
21. Распады очарованных адронов.
22. Кварки третьего поколения.
23. Взаимодействие нейтрино с электронами.
24. Взаимодействие нейтрино с нуклонами.
25. Калибровочная инвариантность.
26. Спонтанное нарушение симметрии.
27. Стандартная модель электрослабого взаимодействия.
28. Нейтральные токи.
29. Свойства промежуточных бозонов.
30. Свойства хиггсовских бозонов.

Примеры экзаменационных билетов в 8-ом семестре:

Билет 1.

1. Динамика нелептонных распадов гиперонов. Кварковые диаграммы.
2. Распады с-кварка. Сравнение D^+ и D^0 мезонов. Роль виртуальных глюонов и «зрительных» кварков.

Билет 2.

1. Взаимодействие нейтрино с электронами.
2. Унитарная матрица $\nu\nu$, матрица девяти кварковых токов. Распады b-кварка. Вклады b и t кварков в смешивание К, В, B_s и D мезонов. Нарушение СР-инвариантности в смешивании К-мезонов.

Критерии оценивания

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Прием экзамена и дифференцированного зачета проводится по билетам. В каждом билете представлено два задания. Обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.