

Министерство образования и науки Российской Федерации  
МЕЖДУНАРОДНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПРИРОДЫ, ОБЩЕСТВА И ЧЕЛОВЕКА "ДУБНА"

УТВЕРЖДАЮ

Проректор

Ю. С. Сахаров

" \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2008 г.

ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

**Квантовая теория поля**

---

по магистерской программе 510417 – "Теоретическая и математическая физика"

---

Разработана:

**Кафедрой теоретической физики**

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ А. Н. Сисакян

## 1. Требования к уровню усвоения содержания дисциплины

### 1.1. Аннотация

Квантовая теория поля – один из ключевых разделов современной теоретической физики. Возникнув исторически как теоретический аппарат физики высоких энергий, в настоящее время квантовая теория поля, вместе с теорией струн и интегрируемых систем, образует весьма динамично развивающееся ядро всей современной математической физики. Данный курс задуман как сравнительно элементарное изложение основ квантовой теории поля, к числу которых отнесены: теория возмущений, континуальный интеграл, калибровочные поля, перенормировка, ренормгруппа. Ввиду наличия немалого количества хороших учебников по данной науке, сделана попытка собрать из них всё лучшее (в педагогическом плане), переработав в едином стиле и максимально упростив изложение.

### 1.2. Учебная задача

Базовые знания по квантовой теории поля, приобретенные в рамках данного курса, должны обеспечить студентам возможность: а) чтения современной монографической и журнальной литературы с целью более углубленного изучения предмета; б) изучения (на лекциях и самостоятельно) приложений квантовополевых методов в теории твердого тела, гравитации, струн и т.д.; в) выполнения несложных расчетов в физике высоких энергий на основе диаграммной техники Фейнмана.

## 2. Объем дисциплины и виды учебной работы (в часах)

Вид занятий	Всего часов	9-й семестр	10-й семестр
Общая трудоемкость	200	100	100
Аудиторные занятия	136	68	68
Лекции	68	34	34
Семинары	68	34	34
Самостоятельная работа	64	32	32
Виды итогового контроля		зачет и экзамен	зачет и экзамен

## 3. Содержание дисциплины

### 3.1. Разделы дисциплины и виды занятий

№	Раздел дисциплины	Лекции	Семинары	Самост. работа
1	Квантовые свободные поля	12	12	10
2	Теория возмущений	8	8	8
3	Континуальный интеграл	8	8	8
4	Преобразования полей	6	6	6
5	Калибровочная симметрия	10	10	8
6	Регуляризация и перенормировка	10	10	10
7	Ренормгруппа	6	6	6
8	Дальнейшее развитие теории	8	8	8

Контрольные точки: помимо зачета и экзамена в конце каждого семестра, планируются коллоквиумы после первого и шестого разделов.

### 3.2. Содержание разделов дисциплины

1. Пространство Минковского. Релятивистская инвариантность. Операторы рождения и уничтожения. Пространство Фока. Свободные квантовые поля: скалярное, спинорное и векторное. Лагранжиан и уравнения движения. Коммутаторы полей. Гамильтониан. Каноническое квантование. Спиноры. Свойства  $\gamma$ -матриц. Векторы поляризации фотонов.

2.  $S$ -матрица и амплитуды физических процессов.  $T$ -экспонента. Типы лагранжианов взаимодействия. Теория возмущений. Причинная функция Грина. Теорема Вика. Диаграммы и правила Фейнмана. Связь амплитуды процесса с сечением. Суммирование по поляризациям. Примеры расчетов реальных процессов.

3. Вариационные производные. Источники и производящие функционалы. Связанные и сильносвязанные диаграммы. Многохвостки. Представление  $T$ -экспоненты в виде континуального интеграла. Основные свойства континуальных интегралов. Континуальные детерминанты.

4. Дискретные симметрии. Преобразования тензорных полей и квантовых операторов. Ковариантность билинейных спинорных комбинаций. Теорема Нётер. Сохраняющиеся токи. Нётеровские заряды как генераторы преобразований. Тензор энергии-импульса. Квантовые операторы 4-импульса и электрического заряда. Гайзенберговы поля.

5. Калибровочные преобразования. Ковариантная производная. Квантовая электродинамика. Физические и нефизические степени свободы. Фиксация калибровки и калибровочный параметр. Тождества Уорда. Неабелева калибровочная симметрия. Метод Фаддеева-Попова. Госты. Лагранжиан квантовой хромодинамики. Метод BRST. Спонтанное нарушение симметрии и механизм Хиггса.

6. Ультрафиолетовые расходимости. Параметризация фейнмановских интегралов. Примеры регуляризаций. Техника размерной регуляризации. Идея перенормировки. Перенормируемые и неперенормируемые теории. Вычитания и контрчлены. Минимальные вычитания.  $R$ -операция. Ренормировочные константы и перенормировка заряда. Перенормировка теорий с симметриями. Составные операторы.

7. Ренормализационная инвариантность и ренормгруппа. Эффективный заряд.  $\beta$ -функция и дифференциальные уравнения ренормгруппы. Варианты ультрафиолетового поведения эффективного заряда. Асимптотическая свобода. Улучшенная теория возмущений. Параметр  $\Lambda$  и схемная зависимость. Техника вычисления ренормгрупповых функций. Многозарядные теории.

8. Стандартная модель. Общие принципы построения квантовополевых моделей. Инфракрасные расходимости. Аномалии. Представление Челлена-Лемана. Аналитические свойства амплитуд. Дисперсионные методы. Операторное разложение. Аксиоматика квантовой теории поля. Точно решаемые модели. Монополи, солитоны и инстантоны. Конформная теория поля. Понятие о теории струн.

### 3.3. Методические рекомендации преподавателю

Отбор материала (как и выбор стиля изложения) для данного курса диктовался следующими соображениями: не перегружая курс техническими деталями и длинными доказательствами, попытаться изложить только самые необходимые основы, и по возможности – элементарно. Квантовая теория поля к настоящему времени прошла достаточную апробацию, и гораздо важнее *объяснить* студенту тот или иной результат, чем *строго вывести* его. Поэтому в данном курсе часто намечена лишь основная идея, или дан перечень основных этапов доказательства (за исключением случаев, когда оно само по себе поучительно). Кроме того, некоторые утверждения сознательно оставлены без доказательства, поскольку их удобнее принять в качестве постулатов. К таковым относятся, например, (анти)коммутационные соотношения операторов рождения и уничтожения, а также представление  $S$ -матрицы в форме  $T$ -экспоненты. Квантовые (свободные) поля тоже считаются первичными объектами теории и ниоткуда не выводятся.

В данном курсе не ставилась задача подробного изложения конкретных моделей теории поля, таких как квантовая хромодинамика или стандартная модель, а для иллюстрации общих методов брались более простые модели. Вообще, вводя новое понятие, надо стараться рассмотреть его как можно подробнее на самом простом из возможных нетривиальных примеров. Тогда при переходе к более сложным реализациям или обобщениям данного понятия останется лишь указать и обсудить отличия.

### 3.4. Методические указания студентам

Конспект лекций, составляющих данный курс, находится в процессе подготовки. Его первая версия к началу осеннего семестра 2008 года появится на сайте

`theor.jinr.ru/~alvladim/qft.ps`

и будет в дальнейшем пополняться. В итоге, конспект будет включать весь лекционный материал курса, а также ряд задач, предлагавшихся на семинарах.

Следует предупредить, что этот конспект не является полноценным учебником. Скорее, он представляет собой набор базовых формул квантовой теории поля, снабженный необходимыми пояснениями. В качестве полезного упражнения (повышенной сложности) можно было бы рекомендовать сравнение логики изложения конкретного вопроса в данном конспекте и в (любом) стандартном учебнике.

### 3.5. Примерный перечень экзаменационных вопросов

1. Свободное скалярное поле.
2. Свободное фермионное поле.
3. Свойства спиноров и  $\gamma$ -матриц.
4. Электромагнитное поле и свойства векторов поляризации.
5. Коммутаторы полей и нормальное упорядочение.
6.  $T$ -упорядочение и причинная функция Грина.
7. Теорема Вика и диаграммы Фейнмана.
8. Техника вычислений по теории возмущений (правила Фейнмана).
9. Связь амплитуды процесса с сечением.
10. Вариационные производные и производящие функционалы.
11. Связные и сильносвязные диаграммы.
12. Определение и свойства континуальных интегралов.
13. Теория возмущений на языке континуальных интегралов.
14. Преобразования тензорных полей и квантовых операторов.
15. Теорема Нётер, сохраняющиеся токи и заряды.
16. Тензор энергии-импульса.
17. Калибровочная симметрия и фиксация калибровки.
18. Тождества Уорда квантовой электродинамики.
19. Неабелевы калибровочные преобразования.
20. Метод Фаддеева-Попова и госты.
21. Метод BRST.
22. Спонтанное нарушение симметрии и механизм Хиггса.
23. Расходимости и регуляризация.
24. Техника размерной регуляризации.
25. Перенормировка: вычитания и контрчлены.
26. Перенормируемые и неперенормируемые теории.
27. Перенормировка заряда.
28. Ренормализационная инвариантность и ренормгруппа.
29. Эффективный заряд и  $\beta$ -функция.
30. Асимптотическая свобода.
31. Параметр  $\Lambda$  и схемная зависимость.
32. Техника вычисления ренормгрупповых функций.
33. Инфракрасные расходимости.
34. Аномалии.
35. Представление Челлена-Лемана.

Для получения зачета по итогам 9-го семестра студентам будет предложено выполнить расчеты конкретных процессов в низшем порядке теории возмущений, а в 10-м семестре – исследовать структуру расходимостей диаграмм и произвести необходимые вычитания в рамках формализма размерной регуляризации.

## Основная литература

1. Пескин М.Е., Шрёдер Д.В. Введение в квантовую теорию поля. Ижевск: РХД, 2001.
2. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. Квантовые поля. М.: Физматлит, 2005.

## Дополнительная литература

1. Вайнберг С. Квантовая теория поля. М.: ФМЛ, 2003.
2. Коллинз Дж. Перенормировка. М.: Мир, 1988.
3. Славнов А.А., Фаддеев Л.Д. Введение в квантовую теорию калибровочных полей. М.: Наука, 1988.
4. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Квантовая электродинамика. М.: ФМЛ, 2001.
5. Ициксон К., Зюбер Ж.-Б. Квантовая теория поля. М.: Мир, 1984.
6. Райдер Л. Квантовая теория поля. М.: Мир, 1987.
7. Биленький С.М. Введение в диаграммы Фейнмана и физику электрослабого взаимодействия. М.: Энергоатомиздат, 1990.
8. Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б. Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1969.

Программа составлена в соответствии с Государственными требованиями к обязательному минимуму содержания основной образовательной программы подготовки магистра по программе 510417 – “Теоретическая и математическая физика”.

Программу составил:

\_\_\_\_\_ Владимиров А. А., к. ф.-м. н., доцент