

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов»

*Факультет физико-математических и естественных наук
Институт физических исследований и технологий*

Рекомендовано МССН

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Классическая и квантовая теория поля

**Рекомендуется для направления подготовки/специальности
03.04.02 «Физика»**

Направленность программы (профиль)

«Фундаментальная и прикладная физика»

1. Цели и задачи дисциплины:

Курс предназначен для формирования у будущих физиков – теоретиков широких представлений о направлении развития современной теоретической физики. В первую очередь это касается таких научных направлений, как физика элементарных частиц и атомного ядра.

Содержание курса посвящено изложению фундаментальных сведений по методам квантовой теории поля в применении к задачам физики элементарных частиц. В курсе квантовой теории поля даются основные представления о методах описания элементарных частиц и их взаимодействий в области высоких энергий. Курс опирается на квантовую механику, релятивистскую механику и электродинамику. Предполагается знание основ теории групп.

2. Место дисциплины в структуре ОП ВО:

Дисциплина «Классическая и квантовая теория поля» относится к *элективной* части блока Б.1 учебного плана.

В таблице № 1 приведены предшествующие и последующие дисциплины, направленные на формирование компетенций дисциплины в соответствии с матрицей компетенций ОП ВО.

Таблица № 1

Предшествующие и последующие дисциплины, направленные на формирование компетенций

№ п/п	Шифр и наименование компетенции	Предшествующие дисциплины	Последующие дисциплины (группы дисциплин)
1	ПК-1: способность 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		Вычислительный эксперимент в физике сложных систем, Специальный физический практикум, Производственная (преддипломная) практика

3. Требования к результатам освоения дисциплины:

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих способностей: способность оперировать углубленными знаниями в области математики и естественных наук; способность выдвигать новые идеи; способность к свободному владению знаниями фундаментальных разделов физики и радиофизики, необходимыми для решения научно-исследовательских задач (в соответствии со своим профилем подготовки); способность внедрять результаты прикладных научных исследований в перспективные приборы, устройства и системы, основанные на колебательно-волновых принципах функционирования; способность описывать новые методики инженерно-технологической деятельности.

4. Объем дисциплины и виды учебной работы

Общая трудоемкость дисциплины составляет 6 зачетных единиц.

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры			
		1	2	3	4
Аудиторные занятия (всего)	136	36	34	36	34
В том числе:					
<i>Лекции</i>	68	18	16	18	16
<i>Практические занятия (ПЗ)</i>	68	18	16	18	16
<i>Семинары (С)</i>					

<i>Лабораторные работы (ЛР)</i>					
Самостоятельная работа (всего)		80		40	40
Общая трудоемкость	час	216	36	72	36
	зач. ед.	6	1	2	1

5. Содержание дисциплины

5.1. Содержание разделов дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела (темы)
1	Основы классической теории поля	Вариационный принцип в теории поля. Действие как аддитивный функционал. Формула Адамара для вариации действия. Теоремы Нетер и законы сохранения в классической теории поля. Внешние и внутренние группы симметрии. Релятивистский центр тяжести. Вариационная производная Томонаги и канонический формализм в теории поля. Лагранжев и гамильтонов формализмы. Скобка Пуассона в теории поля. Уравнения Гамильтона и Гамильтона–Якоби. Классические теоремы смещения, вращения и заряда. Интегральный инвариант Пуанкаре–Картана
2	Групповые методы в теории частиц (нерелятивистская физика)	Инфинитезимальный метод построения неприводимых представлений групп Ли. Операторы Казимира и наблюдаемые. Неприводимые представления группы вращений $SO(3)$ и ее универсальной накрывающей $SU(2)$. Отображение Картана и реализация представлений в пространстве однородных полиномов.
3	Групповые методы в теории частиц (релятивистская физика)	Неприводимые представления группы Лоренца и ее универсальной накрывающей $SL(2, C)$. Бесконечность унитарных представлений группы Лоренца. Алгебра Ли группы Пуанкаре. Вектор Паули–Баргмана–Любанского–Широкова и операторы Казимира группы Пуанкаре. Малые группы и метод индуцированных представлений.
4	Уравнение Дирака	Уравнение Дирака и свойства его решений, оператор Вигнера. Решение задачи Коши для уравнения Дирака. Структура наблюдаемых и канонический формализм для поля Дирака. Разложение по спинорному базису (каноническому и спиральному).
5	Внутренние группы симметрии	Основные типы взаимодействий элементарных частиц. Трехчастичные взаимодействия Юкавы и четырехфермионные взаимодействия. Теорема переместительности Фирца. Кварки и лептоны, проблема поколений. Унитарные
6	Принцип калибровочной симметрии	Локализация внутренних групп симметрии и векторные калибровочные поля. Теория Янга–Миллса. Кварки и глюоны как калибровочные партнеры, носители цвета в квантовой хромодинамике.
7	«Наивный» подход к квантованию полей	Основные принципы квантовой механики систем с конечным числом степеней свободы. Правило квантования Дирака как соответствие «скобка Пуассона \rightarrow коммутатор». Функциональный метод квантования бозонных полей (конфигурационное представление).
8	Метод вторичного квантования	Метод вторичного квантования как обобщение задачи о гармоническом осцилляторе: поле как совокупность осцилляторов. Представление чисел заполнения. Пространство

		Гильберта для поля как бесконечное тензорное произведение пространств $L_2(\mathbb{R})$, его несепарабельность.
9	Элементы теории обобщенных функций	Плоские волны и необходимость рассмотрения ненормированных (топологических) функциональных пространств. Задание топологии с помощью счетной системы полунорм. Полные метризуемые локально выпуклые пространства (пространства Фреше) и их элементы – основные функции.
10	Тензорное представление операторов в пространстве Фока	Пространство Фока как прямая сумма n -частичных пространств. Элементарные операторы в пространстве Фока: оператор числа частиц, операторы тензорного умножения и свертки и операторы симметризации и антисимметризации.
11	Общие принципы квантования полей	Правило квантования Дирака и необходимость его обобщения в теории поля. Динамический принцип Швингера–Фейнмана как квантовый принцип стационарного действия. Отождествление канонических и унитарных преобразований, генераторами которых служат вариации квантового действия.
12	Квантование скалярного поля	Структура решений однородного и неоднородного уравнений Клейна–Гордона–Фока. Функция Паули–Иордана и решение задачи Коши. Запаздывающая и причинная функции Грина.
13	Квантование массивного векторного поля	Уравнения Прока как обобщение уравнений Максвелла, условие Лоренца. Решение задачи Коши для уравнений Прока. Фурье-представление решений и структура наблюдаемых: энергия, импульс, спин. Перестановочные соотношения для полей и фурье-амплитуд. Круговой (циклический) базис. Структура пропагатора.
14	Квантование электромагнитного поля	Поперечность реальных фотонов и нековариантность кулоновской калибровки. Лагранжиан Ферми и независимое квантование 4-потенциалов. Противоречивость перестановочных соотношений и определения вакуума.
15	Квантование спинорного поля	Лагранжиан и гамильтониан Дирака. Канонический формализм для уравнения Дирака. Разложение решения уравнения Дирака по базисным спинорам. Структура наблюдаемых и скалярного произведения. Антиперестановочные соотношения. Структура пропагатора.
16	Матрица рассеяния в квантовой теории поля	Различные квантовые схемы (картины): Гейзенберга, Шредингера, Дирака (взаимодействия). Учет взаимодействия в представлении Гейзенберга, фермионные и бозонные квантовые токи. Уравнения Янга–Фельдмана для интерполирующих полей.
17	Правила Фейнмана в квантовой электродинамике	Представление S -матрицы в виде функционального степенного ряда относительно функции включения взаимодействия. Теорема Вика для нормального и T -произведений.
18	Учет радиационных поправок (теория возмущений)	Петлевые диаграммы и расходимости S -матрицы. Регуляризация причинных функций по Паули–Вилларсу. Учет размерных соображений и теорема Гейзенберга о ренормируемых и неренормируемых взаимодействиях.
19	Метод полных функций Грина	Сильно- и слабо-связные графы, скелетные диаграммы и их суммирование по Дайсону. Полные функции Грина электрона и фотона и уравнения Дайсона. Спектральное представление Челлена–Лемана для полных функций Грина.
20	Аксиоматическая теория S -матрицы	Теория рассеяния Хаага–Рюэля и требование асимптотической полноты. Редукционные формулы Лемана–Симанчика–

		Циммермана для элементов S-матрицы и схемы Боголюбова–Медведева–Поливанова и Вайтмана в аксиоматической локальной теории поля
--	--	---

5.2. Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Лекц.	Практ. зан.	Лаб. зан.	Семина	СРС	Всего час.
1	Основы классической теории поля	2			2	4	8
2	Групповые методы в теории частиц (нерелятивистская физика)	4			4	4	12
3	Групповые методы в теории частиц (релятивистская физика)	4			4	4	12
4	Уравнение Дирака	2			2	4	8
5	Внутренние группы симметрии	4			4	4	12
6	Принцип калибровочной симметрии	4			4	4	12
7	«Наивный» подход к квантованию полей	4			4	4	12
8	Метод вторичного квантования	2			2	4	8
9	Элементы теории обобщенных функций	4			4	4	12
10	Тензорное представление операторов в пространстве Фока	4			4	4	12
11	Общие принципы квантования полей	2			2	4	8
12	Квантование скалярного поля	4			4	4	12
13	Квантование массивного векторного поля	4			4	4	12
14	Квантование электромагнитного поля	2			2	4	8
15	Квантование спинорного поля	4			4	4	12
16	Матрица рассеяния в квантовой теории поля	4			4	4	12
17	Правила Фейнмана в квантовой электродинамике	4			4	4	12
18	Учет радиационных поправок (теория возмущений)	4			4	4	12
19	Метод полных функций Грина	4			4	4	12
20	Аксиоматическая теория S-матрицы	2			2	4	8

6. Лабораторный практикум не предусмотрен

7. Практические занятия (семинары)

№ п/п	№ раздела дисциплины	Тематика практических занятий (семинаров)	Трудо-емкость (час.)
1	1	Основы классической теории поля	2
2	2	Групповые методы в теории частиц (нерелятивистская физика)	4
3	3	Групповые методы в теории частиц (релятивистская физика)	4
4	4	Уравнение Дирака	2
5	5	Внутренние группы симметрии	4
6	6	Принцип калибровочной симметрии	4
7	7	«Наивный» подход к квантованию полей	4
8	8	Метод вторичного квантования	2

9	9	Элементы теории обобщенных функций	4
10	10	Тензорное представление операторов в пространстве Фока	4
11	11	Общие принципы квантования полей	2
12	12	Квантование скалярного поля	4
13	13	Квантование массивного векторного поля	4
14	14	Квантование электромагнитного поля	2
15	15	Квантование спинорного поля	4
16	16	Матрица рассеяния в квантовой теории поля	4
17	17	Правила Фейнмана в квантовой электродинамике	4
18	18	Учет радиационных поправок (теория возмущений)	4
19	19	Метод полных функций Грина	4
20	20	Аксиоматическая теория S-матрицы	2

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Лекционный компьютер, компьютерный проектор, аудитория для компьютерного тестирования, кабинет лекционных демонстраций.

9. Информационное обеспечение дисциплины

(а) программное обеспечение:

МЕНТОР

б) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы:

телекоммуникационная учебно-информационная система (ТУИС)

Учебный портал РУДН

Научная электронная библиотека РУДН

<http://www.edu.ru/> – федеральный образовательный портал.

10. Учебно-методическое обеспечение дисциплины:

а) основная литература:

1. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. Введение в теорию квантованных полей. М.: Наука, 1973. 416 с.
2. Дж.Д. Бьёркен, С.Д. Дрелл. Релятивистская квантовая теория поля. Т. 1, 2. М.: Наука, 1978. 296 с., 408 с.
3. К. Ициксон, Ж.-Б. Зюбер. Квантовая теория поля. Т. 1, 2. М.: Мир, 1984. 448 с., 400 с.
4. С. Швебер. Введение в релятивистскую квантовую теорию поля. М.: ИЛ, 1963. 842 с.
5. А.И. Ахиезер, В.Б. Берестецкий. Квантовая электродинамика. М.: «Наука», 1969. 624 с.

б) дополнительная литература:

1. Н.Н. Боголюбов, А.А. Логунов, И.Т. Тодоров. Основы аксиоматического подхода в квантовой теории поля. М.: «Наука», 1969. 424 с.
2. Н.Н. Боголюбов, А.А. Логунов, А.И. Оксак, И.Т. Тодоров. Общие принципы квантовой теории поля. М.: «Наука», 1987. 616 с.
3. П. Рамон. Теория поля: Современный вводный курс. М.: Мир, 1984. 332 с.
4. Э. Хенли, В. Тирринг. Элементарная квантовая теория поля. М.: ИЛ, 1963. 316 с.
5. Ж. Эмх.. Алгебраические методы в статистической механике и квантовой теории поля. М.: Мир, 1976. 424 с.
6. В.Е. Тирринг. Принципы квантовой электродинамики. М.: Высшая школа, 1964. 228 с.
7. Л. Райдер. Квантовая теория поля. М.: Мир, 1987. 512 с.
8. А.С. Шварц. Элементы квантовой теории поля: Бозонные взаимодействия. М.: Атомиздат, 1975. 192 с.
9. А.С. Шварц. Математические основы квантовой теории поля. М.: Атомиздат, 1975. 368 с.
10. Ф.А. Березин. Метод вторичного квантования. М.: Наука, 1986. 320 с.
11. Р. Йост. Общая теория квантованных полей. М.: Мир, 1967. 236 с.
12. Р. Стритер, А. Вайтман. РСТ, спин и статистика и всё такое. М.: Наука, 1966. 252 с.
13. Ю.Б. Румер, А.И. Фет. Теория групп и квантованные поля. М.: Наука, 1977. 248 с.
14. Ю.В. Новожилков. Введение в теорию элементарных частиц. М.: Наука, 1972. 472 с.

15. П.А.М. Дирак. К созданию квантовой теории поля: Основные статьи 1925 – 1958 годов. М.: Наука, 1990. 308 с.
16. П.А.М. Дирак. Лекции по квантовой теории поля. М.: Мир, 1971. 244 с.
17. Р. Фейнман. Квантовая электродинамика. М.: Мир, 1964. 220 с.
18. Р. Фейнман. Теория фундаментальных процессов. М.: Наука, 1978. 200 с.
19. А. Вайтман. Проблемы в релятивистской динамике квантованных полей. М.: Наука, 1968. 184 с.
20. В.Н. Грибов. Квантовая электродинамика. Москва – Ижевск: РХД, 2001. 288 с.
21. М.В. Терентьев. Введение в теорию элементарных частиц. М.: ИТЭФ, 1998. 236 с.

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

Необходимо обеспечить себя рекомендованными учебными материалами. Для более глубокого усвоения содержания каждого раздела необходимо решать задачи. Набор соответствующих задач предоставляется (кроме имеющихся в задачнике).

Самостоятельная работа нужна как для усвоения теоретического материала, так и для подготовки к семинарам и выполнения домашнего занятия. Самостоятельная работа необходима и при подготовке к контрольным мероприятиям (подготовка к контрольным работам и коллоквиумам, решение задач домашнего задания).

12. Особенности реализации дисциплины для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья

Реализация дисциплины, текущий контроль и промежуточная аттестация для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов осуществляются с учетом специфики освоения и дидактических требований, исходя из индивидуальных психофизических особенностей и в соответствии с индивидуальной программой реабилитации по личному заявлению обучающегося. В процессе обучения предусматриваются различные формы предоставления необходимой учебной и учебно-методической информации (визуально, в том числе с укрупненным шрифтом, аудиально и т. п.), допускаются использование студентом технических средств фиксации информации (аудио-, фото- или видеотехника) и присутствие на аудиторных занятиях ассистента (помощника, сопровождающего, сурдо- или тифлосурдопереводчика и т. п.), осуществляющего техническое сопровождение учебного процесса для студента. Допускается частично дистанционное обучение с предоставлением необходимой учебной и учебно-методической информации средствами телекоммуникационной сети Интернет. Предусматриваются различные формы текущего контроля качества освоения дисциплины, достижения запланированных результатов обучения и уровня сформированности заявленных в ООП компетенций: устно, в том числе практические задания и контрольные работы с пояснением хода выполнения; письменно, в том числе конспекты ответов на вопросы практических занятий по разделам дисциплины; устно дистанционно; письменно дистанционно. Во всех формах текущего контроля используются общие критерии оценивания. Процедура промежуточной аттестации проводится с учетом психофизических особенностей и состояния здоровья студента: допускается присутствие ассистента, осуществляющего техническое сопровождение процедуры; используются адаптированные оценочные средства; допускаются различные формы ответа (устно, письменно, с использованием необходимых технических средств и т. п.); допускается дистанционная форма проведения зачета или экзамена (например, с использованием программы Skype в предварительно согласованное время); при необходимости предоставляется дополнительное время для подготовки к ответу. Независимо от формы организации процедуры промежуточной аттестации используются общие критерии оценивания.

13. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине (модулю)

Шкала оценок

Соответствие систем оценок (согласно Приказу Ректора № 996 от 27.12.2006 г.)

Баллы БРС	Традиционные оценки в РФ	Баллы для перевода оценок	Оценки	Оценки
86-100	5	95-100	5+	A
		86-94	5	B
69-85	4	69-85	4	C
51-68	3	61-68	3+	D
		51-60	3	E
0-50	2	31-50	2+	FX
		0-30	2	F
51-60	Зачет		Зачет	Passed

Паспорт фонда оценочных средств по дисциплине Классическая и квантовая теория поля

Направление/Специальность: 03.04.02 «ФИЗИКА», специализация «Фундаментальная и прикладная физика»

Код контролируемой компетенции или ее части	Контролируемый раздел дисциплины	Контролируемая тема дисциплины	Наименование оценочного средства													Баллы темы	Баллы раздела		
			Текущий контроль										Промежуточная аттестация						
			Опрос	Тест	Коллоквиум	Контрольная работа	Посещение							Экзамен/Зачет					
ПК-1	Раздел 1:	Предмет квантовой теории поля. Функциональный метод квантования		4	4	4	4								4			20	100
		Метод вторичного квантования		4	4	4	4								4			20	
ПК-1	Раздел 2:	Структура пространства Гильберта в квантовой теории поля		4	4	4	4								4			20	
		Пространство Фока.		4	4	4	4								4			20	
ПК-1	Раздел 3:	Квантование свободных полей		4	4	4	4								4			20	
		Реферат																	
		ИТОГО:		20	20	20	20								20			100	

ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ
К РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕМУ КОНТРОЛЬНОМУ ОПРОСУ
по курсу лекций «Классическая и квантовая теория поля»

Часть I. РЕЛЯТИВИСТСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Тема 1. Основы классической теории поля

Вариационный принцип в теории поля. Действие как аддитивный функционал. Формула Адамара для вариации действия. Теоремы Нетер и законы сохранения в классической теории поля. Внешние и внутренние группы симметрии. Релятивистский центр тяжести. Вариационная производная Томонаги и канонический формализм в теории поля. Лагранжев и гамильтонов формализмы. Скобка Пуассона в теории поля. Уравнения Гамильтона и Гамильтона–Якоби. Классические теоремы смещения, вращения и заряда. Интегральный инвариант Пуанкаре–Картана. Уравнение Клейна–Гордона–Фока и свойства его решений. Разбиение полей на частотные части и условие его лоренц-инвариантности. Решение задачи Коши для простейших полей – скалярного, массивного векторного и электромагнитного. Структура сохраняющихся величин для этих полей: энергия, импульс и спин поля.

Тема 2. Групповые методы в теории частиц (нерелятивистская физика)

Инфинитезимальный метод построения неприводимых представлений групп Ли. Операторы Казимира и наблюдаемые. Неприводимые представления группы вращений $SO(3)$ и ее универсальной накрывающей $SU(2)$. Отображение Картана и реализация представлений в пространстве однородных полиномов. Классификация состояний по четности по Янгу–Тiomно и ряд Клебша–Гордана для группы вращений. Коэффициенты Клебша–Гордана. Теорема Вигнера–Экарта и расчет бранчингов (относительных вероятностей каналов реакций). Правило Шмушкевича как следствие принципа симметрии Кюри и зарядовой независимости ядерных сил

Тема 3. Групповые методы в теории частиц (релятивистская физика)

Неприводимые представления группы Лоренца и ее универсальной накрывающей $SL(2, C)$. Бесконечность унитарных представлений группы Лоренца. Алгебра Ли группы Пуанкаре. Вектор Паули–Баргмана–Любанского–Широкова и операторы Казимира группы Пуанкаре. Малые группы и метод индуцированных представлений. Массивные и безмассовые неприводимые представления группы Пуанкаре в канонической и спинорной реализациях (схема Баргмана–Вигнера). Реализация Рариты–Швингера неприводимых представлений группы Пуанкаре. Алгебраическая реализация Хариш Чандры и алгебра Петтио–Дуффина–Кеммера. Постулат редукции и теорема Умедзавы–Висконти о дивизоре. Структура дивизора для уравнений Дирака и Фирца–Паули (спин $3/2$). Теоремы Бернсайда и матрицы Дирака как неприводимые представления алгебры Клиффорда.

Тема 4. Уравнение Дирака

Уравнение Дирака и свойства его решений, оператор Вигнера. Решение задачи Коши для уравнения Дирака. Структура наблюдаемых и канонический формализм для поля Дирака. Разложение по спинорному базису (каноническому и спиральному). Представления Фолди–Ваутхайзена и Чини – Тушека. Переменные Мандельстама и структура спинорной амплитуды для процессов $2 \rightarrow 2$. Проекционные операторы в формализме Баргмана–Вигнера (для частиц с высшими спинами) и поляризация матрица плотности.

Тема 5. Внутренние группы симметрии

Основные типы взаимодействий элементарных частиц. Трехчастичные взаимодействия Юкавы и четырехфермионные взаимодействия. Теорема переместительности Фирца. Кварки и лептоны, проблема поколений. Унитарные симметрии сильных взаимодействий (цвет и аромат). Классификация полупростых комплексных алгебр Ли. Базис Картана–Вейля. Схемы Дынкина и корневые диаграммы. Формула Рака. Неприводимые представления группы $SU(3)$, весовые диаграммы. Теорема Клебша–Гордана для $SU(3)$ (метод Шпейзера).

Тема 6. Принцип калибровочной симметрии

Локализация внутренних групп симметрии и векторные калибровочные поля. Теория Янга–Миллса. Кварки и глюоны как калибровочные партнеры, носители цвета в квантовой хромодинамике. Симметрия (вырождение) вакуума и симметрия лагранжиана. Спонтанное

нарушение глобальной симметрии и теорема Голдстоуна. Спонтанное нарушение локальной симметрии и эффект Хиггса. Единые калибровочные модели электромагнитного и слабого взаимодействий. Стандартная модель Вайнберга–Салама. Большое объединение сильных, электромагнитных и слабых взаимодействий. Суперсимметричное объединение фермионов и бозонов. Супергравитация как локальная суперсимметрия.

Часть II. ТЕОРИЯ КВАНТОВЫХ ПОЛЕЙ

Тема 1. «Наивный» подход к квантованию полей

Основные принципы квантовой механики систем с конечным числом степеней свободы. Правило квантования Дирака как соответствие «скобка Пуассона \rightarrow коммутатор». Функциональный метод квантования бозонных полей (конфигурационное представление). Канонические перестановочные соотношения. Гамильтониан для вещественного скалярного поля Клейна–Гордона–Фока. Вакуумное состояние как гауссовский функционал. Бесконечность вакуумной плотности энергии. Построение возбужденных состояний как полилинейных функционалов с гауссовским весом.

Тема 2. Метод вторичного квантования

Метод вторичного квантования как обобщение задачи о гармоническом осцилляторе: поле как совокупность осцилляторов. Представление чисел заполнения. Пространство Гильберта для поля как бесконечное тензорное произведение пространств $L_2(\mathbb{R})$, его несепарабельность. Теория фон Неймана бесконечных тензорных произведений: $\mathcal{S}(\mathcal{S}_0)$ -последовательности, разбиение на ортогональные классы эквивалентности. Выделенность пространства Фока как содержащего циклический вектор вакуума. Единственность тензорного (фоковского) представления коммутационных соотношений. Странные (нефоковские) представления. Конденсат как нефоковский вакуум.

Тема 3. Элементы теории обобщенных функций

Плоские волны и необходимость рассмотрения ненормированных (топологических) функциональных пространств. Задание топологии с помощью счетной системы полуномр. Полные метризуемые локально выпуклые пространства (пространства Фреше) и их элементы – основные функции. Обобщенные функции как линейные непрерывные функционалы над пространством основных функций. Пространство Шварца и функционалы над ним – обобщенные функции умеренного (медленного) роста. Распределения как функционалы над бесконечно гладкими функциями с компактным носителем. Оснащенные гильбертовы пространства. Непрерывность и унитарность преобразования Фурье в пространстве Шварца. Теорема Шварца о ядре.

Тема 4. Тензорное представление операторов в пространстве Фока

Пространство Фока как прямая сумма n -частичных пространств. Элементарные операторы в пространстве Фока: оператор числа частиц, операторы тензорного умножения и свертки и операторы симметризации и антисимметризации. Операторы рождения и уничтожения фермионного и бозонного типов как операторнозначные обобщенные функции умеренного роста. Коммутационные и антикоммутационные соотношения. Когерентные секторы в пространстве Гильберта. Правила суперотбора и операторы, их порождающие: унивалентность, электрический, барионный и лептонный заряды.

Тема 5. Общие принципы квантования полей

Правило квантования Дирака и необходимость его обобщения в теории поля. Динамический принцип Швингера – Фейнмана как квантовый принцип стационарного действия. Отождествление канонических и унитарных преобразований, генераторами которых служат вариации квантового действия. Полнота алгебры операторов поля в пространственно-подобной области и алгебраические свойства вариаций формы полевых операторов (микропричинность). Основные следствия динамического принципа Швингера–Фейнмана: операторные уравнения Лагранжа, канонические перестановочные соотношения для совпадающих времен, теоремы смещения, вращения и заряда. Зарядовая симметрия и теорема Людерса–Паули о связи спина со статистикой. Физический смысл положительно- и отрицательно-частотных полевых операторов для свободных полей. Перестановочные соотношения для фурье-амплитуд.

Тема 6. Квантование скалярного поля

Структура решений однородного и неоднородного уравнений Клейна–Гордона–Фока. Функция Паули–Иордана и решение задачи Коши. Запоздывающая и причинная функции Грина. Пропагатор как среднее по вакууму от хронологического произведения операторов поля. Структура энергии – импульса поля. Нормальная форма наблюдаемых (тривиальность вакуумного вклада). Инвариантная мера в импульсном пространстве (мера Лобачевского) и релятивистский оператор положения. Структура собственной функции оператора положения и радиус локализации частицы.

Тема 7. Квантование массивного векторного поля

Уравнения Прока как обобщение уравнений Максвелла, условие Лоренца. Решение задачи Коши для уравнений Прока. Фурье-представление решений и структура наблюдаемых: энергия, импульс, спин. Перестановочные соотношения для полей и фурье-амплитуд. Круговой (циклический) базис. Структура пропагатора.

Тема 8. Квантование электромагнитного поля

Поперечность реальных фотонов и нековариантность кулоновской калибровки. Лагранжиан Ферми и независимое квантование 4-потенциалов. Противоречивость перестановочных соотношений и определения вакуума. Духовые состояния (с отрицательной нормой). Дополнительное условие Ферми. Выделение физического (поперечного) сектора в гильбертовом пространстве. Структура наблюдаемых в круговом базисе. Индефинитная метрика.

Тема 9. Квантование спинорного поля

Лагранжиан и гамильтониан Дирака. Канонический формализм для уравнения Дирака. Разложение решения уравнения Дирака по базисным спинорам. Структура наблюдаемых и скалярного произведения. Антиперестановочные соотношения. Структура пропагатора.

Тема 10. Матрица рассеяния в квантовой теории поля

Различные квантовые схемы (картины): Гейзенберга, Шредингера, Дирака (взаимодействия). Учет взаимодействия в представлении Гейзенберга, фермионные и бозонные квантовые токи. Уравнения Янга–Фельдмана для интерполирующих полей. Входящие и выходящие асимптотические поля. Матрица рассеяния Уилера–Гейзенберга–Меллера и уравнение для нее в представлении Гейзенберга. Переход к представлению взаимодействия и гипотеза об адиабатическом включении взаимодействия. Уравнение Томонаги–Швингера для оператора преобразования и условие Блоха его интегрируемости.

Решение Дайсона уравнения Томонаги–Швингера и адиабатическая S-матрица Дайсона–Боголюбова (хронологическое упорядочение). Основные свойства S-матрицы: релятивистская (групповая) инвариантность и законы сохранения, унитарность как следствие адиабатической гипотезы (индекс дефекта и связанные состояния), причинность в интегральной и дифференциальной формах.

Тема 11. Правила Фейнмана в квантовой электродинамике

Представление S-матрицы в виде функционального степенного ряда относительно функции включения взаимодействия. Теорема Вика для нормального и T-произведений. Приведение S-матрицы к нормальной форме: правила Фейнмана в x- и p-представлениях. Древесное приближение. Учет тождественности частиц: эквивалентные диаграммы. Нормировка векторов начального и конечного состояний, вычисление сечений реакций (формула Мёллера). Расчет простейших эффектов в квантовой электродинамике: комптон-эффект (формула Клейна–Нишины–Тамма), рождение электрон-позитронных пар, тормозное излучение, рассеяние Мёллера и Баба. Метод проекционных операторов.

Тема 12. Учет радиационных поправок (теория возмущений)

Петлевые диаграммы и расходимости S-матрицы. Регуляризация причинных функций по Паули–Вилларсу. Учет размерных соображений и теорема Гейзенберга о ренормируемых и неренормируемых взаимодействиях: возможность отделить эффекты структуры частиц и эффекты взаимодействия в перенормируемых теориях. Методы вычисления интегралов Фейнмана в квантовой теории поля: α -представление Боголюбова, параметризация Фейнмана, виковский поворот, размерная регуляризация. Диаграммы собственной энергии электрона и фотона: массовый и поляризационный операторы. Индексы диаграммы и

вершины. Обобщенная вершинная функция: теорема Фарри, тождество Уорда. Устранение расходимостей в примитивно расходящихся, неприводимых и приводимых диаграммах: метод субинтегрирований или редукций Дайсона – Салама. R-операция Боголюбова, теорема Боголюбова–Парасюка–Хеппа.

Тема 13. Метод полных функций Грина

Сильно- и слабо-связные графы, скелетные диаграммы и их суммирование по Дайсону. Полные функции Грина электрона и фотона и уравнения Дайсона. Спектральное представление Челлена–Лемана для полных функций Грина. Уравнения Швингера в вариационных производных, их эквивалентность уравнениям Дайсона. Методы решения уравнений Швингера: 3Г-приближение, метод Тамма–Данкова, функциональное преобразование Фурье (метод производящего функционала или метод источников Швингера). Основные эффекты квантовой электродинамики: Дельбрюк-эффект (рассеяние света на внешнем поле), Юлинг-эффект (поляризация вакуума), аномальный магнитный момент электрона, лэмбовский сдвиг. Уравнение Бете–Солпитера для двухчастичной функции Грина и для волновой функции связанного состояния двух заряженных частиц.

Тема 14. Аксиоматическая теория S-матрицы

Теория рассеяния Хаага–Рюэля и требование асимптотической полноты. Редукционные формулы Лемана–Симанчика–Циммермана для элементов S-матрицы и схемы Боголюбова–Медведева–Поливанова и Вайтмана в аксиоматической локальной теории поля. Принцип спектральности. СРТ-теорема, связь спина со статистикой и теорема Хаага. Необходимость «странных» представлений перестановочных соотношений. Спектральное представление запаздывающего коммутатора токов Йоста–Лемана–Дайсона, аналитичность амплитуды рассеяния и дисперсионные соотношения. Дисперсионные правила сумм.

Руководитель направления 03.04.02

Директор института физических исследований
и технологий, д.ф.-м.н., профессор



О.Т. Лоза