

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова в городе
Сарове

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор филиала МГУ в г.Сарове
Член-корреспондент РАН В.В. Воеводин

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Наименование дисциплины:

Квантовая теория поля. Ч.1

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) ОПОП:

Теоретическая физика

Квалификация «Магистр»

Форма обучения: Очная

Саров 2021 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика в редакции приказа по МГУ от 30 декабря 2020 г. №1366.

Разработчик (разработчики) программы: с.н.с. Казанцев А.Е.

1. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО: относится к вариативной части, читается во 2 семестре

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (если есть):
освоение курса квантовой механики в объеме дисциплин «Квантовая теория. Ч.1» и «Квантовая теория. Ч.2», читаемых на физическом факультете МГУ

3. Результаты обучения по дисциплине (модулю):

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
<ul style="list-style-type: none">Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений в области теоретической физики в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1).	<p>ЗНАТЬ основные законы и направления современных научных исследований в области теоретической физики</p> <p>УМЕТЬ на основе фундаментальных знаний в области теоретической физики, определять возможные направления научных исследований.</p> <p>ВЛАДЕТЬ необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования области теоретической физики.</p>
<ul style="list-style-type: none">Способность организовать и планировать физические исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области теоретической физики и решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования и информационных технологий (СПК-2).	<p>ЗНАТЬ базовые принципы организации научных исследований с использованием информационных технологий, основные методики работы на современном оборудовании.</p> <p>УМЕТЬ используя знания в области теоретической физики проводить научные исследования.</p> <p>ВЛАДЕТЬ навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.</p>

<ul style="list-style-type: none"> Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области теоретической физики (СПК-3). 	<p>ЗНАТЬ основные направления инновационного развития в области теоретической физики.</p> <p>УМЕТЬ проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области теоретической физики для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов.</p> <p>ВЛАДЕТЬ методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области теоретической физики.</p>
---	--

4. Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е.

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

5.1. Структура дисциплины (модуля) по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий (в строгом соответствии с учебным планом)

Наименование разделов и тем дисциплины (модуля), Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Номинальные трудозатраты обучающегося		Самостоятельная работа обучающегося, академические часы	Всего академических часов	Форма текущего контроля успеваемости* (наименование)
	Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, академические часы				
	Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа			
Тема 1. Введение.	1	1	2	4	опрос
Тема 2. Теория скалярного поля	1	1	2	4	опрос
Тема 3. Законы сохранения в теории поля	2	2	3	7	опрос

Тема 4. Теории поля со спином	1	1	3	5	опрос
Тема 5. Вейлевские спиноры	1	1	2	4	опрос
Тема 6. Дираковские спиноры	1	1	3	5	опрос
Тема 7. Квантование дираковского поля	2	2	3	7	опрос
Тема 8. Дискретные симметрии в теории дираковского поля	2	2	3	7	опрос
Тема 9. Массивное векторное поле	1	1	2	4	опрос
Тема 10. Безмассовое векторное поле	2	2	3	7	опрос
Тема 11. S-матрица	1	1	3	5	—
Тема 12. Расходимости и контрчлены	1	1	2	4	—
Тема 13. Правила Фейнмана и диаграммы Фейнмана	1	1	3	5	—
Другие виды самостоятельной работы (при наличии): <i>Например,</i> <i>Курсовая работа</i> <i>Творческая работа (эссе)</i> <i>...</i>	—	—			—
	—	—			—
	—	—			—
Промежуточная аттестация (экзамен)			4	4	—
					—
Итого	17	17	38	72	—

* *Примеры форм текущего контроля успеваемости:*

опрос;

тестирование;

контрольная работа;

коллоквиум;

реферат и и.д.

5.2. Содержание разделов (тем) дисциплины

№ п/п	Наименование разделов (тем) дисциплины	Содержание разделов (тем) дисциплин
1.	Тема 1. Введение	Основные обозначения. Лоренц-инвариантность и причинность. Кван-

		товая теория поля как релятивистская квантовая механика. Принцип наименьшего действия в теории поля. Канонически сопряженные величины в теории поля. Каноническое квантование в теории поля.
2.	Тема 2. Теория вещественного скалярного поля	Построение лоренц-инвариантной теории скалярного поля и ее квантование. Уравнения движения для свободного скалярного поля как уравнения Гейзенберга. Операторы рождения и уничтожения. Построение пространства Фока. Энергия и импульс скалярного поля. Причинность в теории скалярного поля. Оператор Ньютона—Вигнера и невозможность локализации частицы в квантовой теории поля. Представление группы Пуанкаре в пространстве Фока.
	Тема 3. Законы сохранения в теории поля	Непрерывные симметрии и теорема Нётер. Дискретные симметрии. Внутренние и пространственные симметрии. Группа собственных ортохронных преобразований Лоренца. Комплексное скалярное поле. Зарядовое сопряжение. Частицы и античастицы. Пространственная инверсия. Антиунитарные операторы и их свойства. Обращение времени. Теорема Вигнера о представлении симметрий унитарными и антиунитарными операторами. Законы преобразования нётеровских зарядов под действием группы Лоренца.
	Тема 4. Поля со спином	Поля как представления группы Лоренца. Напоминание о представлениях групп и их алгебр Ли. Эквивалентные и приводимые представления. Алгебра Ли группы Лоренца. Построение всех неприводимых конечномерных представлений группы Лоренца. Их свойства под действием комплексного сопряжения и пространственной инверсии. Примеры представлений: скалярное поле, вещественное векторное поле.
	Тема 5. Вейлевские спиноры	Правый и левый вейлевские спиноры как двумерные неприводимые представления группы Лоренца. Построение лоренц-инвариантной теории для вейлевских спиноров. Уравнения Вейля. Нарушение пространственной инверсии в теориях с вейлевскими спинорами. Спиральность вейлевской частицы и античастицы.
	Тема 6. Дираковские спиноры	Дираковский спинор как прямая сумма представлений для левого и правого вейлевских спиноров. Киральность. Построение лоренц-инвариантного сохраняющего пространственную четность действия для дираковского спинора. Матрицы альфа и бета, их алгебра. Уравнение Дирака. Эквивалентные представления для дираковского спинора, представление Вейля и Дирака. Гамма-матрицы и их алгебра. Дираков-

		ское сопряжение. Закон преобразования для дираковского спинора под действием группы Лоренца. Билинейные спинорные произведения как неприводимые тензоры.
	Тема 7. Квантование дираковского поля	Решения уравнения Дирака. Их свойства ортогональности. Спиновые суммы. Тожества Гордона. Канонические коммутационные соотношения – как не нужно квантовать дираковское поле. Квантование дираковского поля с помощью канонических антикоммутационных соотношений. Заряд дираковской частицы и её античастицы. Спин дираковской частицы и античастицы. Теорема о связи спина со статистикой.
	Тема 8. Дискретные симметрии в теории дираковского поля	Зарядовое сопряжение, пространственная инверсия и обращение времени. Их действие на дираковское поле и векторы в пространстве Фока. СРТ-теорема. Майорановские спиноры.
	Тема 9. Массивное векторное поле	Построение свободной лоренц-инвариантной теории массивного векторного поля. Уравнение Прока. Независимые динамические переменные как полный набор начальных данных. Каноническое квантование массивного векторного поля. Спин массивной векторной частицы.
	Тема 10. Безмассовое векторное поле	Действие для безмассового векторного поля, взаимодействующего с током. Уравнения Максвелла. Калибровочные преобразования. Необходимость выбора калибровки. Каноническое квантование безмассового векторного поля в калибровке Кулона. Спиральность безмассовой векторной частицы. Построение калибровочно-инвариантного взаимодействия безмассового векторного поля с полями материи с помощью минимальной связи. Спинорная электродинамика. Скалярная электродинамика.
	Тема 11. S-матрица	Представления Шредингера, Гейзенберга и Дирака. In- и out-состояния. Определение элемента S-матрицы как скалярное произведение in- и out-состояний. Гипотеза асимптотической полноты. Оператор S-матрицы как оператор эволюции в картине Дирака с адиабатическим включением и выключением взаимодействия. Недостатки такого определения. Формула Дайсона. Теорема Вика. Приведение оператора S-матрицы к нормальной форме. Диаграммы Вика. Симметричные множители. Теорема о сумме диаграмм Вика. Оператор S-матрицы в модели скалярного поля, взаимодействующего с внешним током.
	Тема 12. Расходимости и контрчлены	Расходящиеся фазовые множители в формуле Дайсона и борьба с ними. Контрчлен, сокращающий энергию вакуума. Перенормировка массы.

		Голая масса и физическая масса. Массовые контрчлены.
	Тема 13. Правила Фейнмана и диаграммы Фейнмана	Правила Фейнмана в модели с вещественным и комплексным скалярным полем. Сокращение некоторых расходимостей с помощью введенных контрчленов. Поправки к внешним линиям. Правила Фейнмана в квантовой электродинамике. Примеры вычисления амплитуд вероятности различных процессов с помощью диаграмм Фейнмана в низших порядках теории возмущений. Сечение рассеяния.

6. Фонд оценочных средств (ФОС, оценочные и методические материалы) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

6.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости, критерии и шкалы оценивания (в отсутствие утвержденных соответствующих локальных нормативных актов на факультете)

РЕЗУЛЬТАТ ОБУЧЕНИЯ по дисциплине (модулю)	ШКАЛА оценивания					ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНИВАНИЯ
	1	2	3	4	5	
знать основные модели квантовой теории поля и способы их квантования	Отсутствие знаний об основных моделях квантовой теории поля и способах их квантования	Фрагментарные знания об основных моделях квантовой теории поля и способах их квантования	Неполные знания об основных моделях квантовой теории поля и способах их квантования	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания об основных моделях квантовой теории поля и способах их квантования	Сформированные и систематические знания об основных моделях квантовой теории поля и способах их квантования	опрос

Вопросы для проведения текущего контроля успеваемости

1. Что такое группа Лоренца? Что такое собственная, ортохронная и собственная ортохронная подгруппы (всего перечислено три) подгруппы группы Лоренца? Как выглядит инфинитезимальное преобразование Лоренца? Что такое преобразование инверсии пространства, обращения времени?
2. Как записать преобразование Лоренца для поля в произвольном представлении, если известны генераторы представления группы Лоренца в этом представлении? Как выглядят генераторы представления группы Лоренца в представлении дираковского спинора?
3. Как получить канонический импульс для полевой переменной? Как получить гамильтониан? Как проквантовать любую теорию бозонного поля? Фермионного поля? О чем говорит теорема о связи спина со статистикой?
4. Зачем нужна привязка наблюдаемых к точкам пространства-времени? Какому важному свойству должны удовлетворять наблюдаемые в теории поля, чтобы сохранялась причинность? Может ли фермионное поле быть наблюдаемой? (**Подсказка:** нет.) Почему?
5. Как по плоским волнам раскладывается свободное вещественное скалярное поле? Как называются коэффициенты в этом разложении? Каким коммутационным соотношениям они удовлетворяют? А как вообще получить эти коммутационные соотношения? (**Подсказка:** из канонических коммутационных соотношений.) А как с помощью операторов рождения построить гильбертово пространство состояний? Чему равны энергия и импульс этих состояний? Что такое релятивистская нормировка векторов состояний?
6. Что такое пространство Фока? Что такое вакуумное состояние? В чем его принципиальное отличие от состояний с одной частицей с определенным импульсом, двумя частицами с определенными импульсами и т.д. (**Подсказка:** нормировка.) Как записать произвольное состояние в пространстве, где базисом являются: состояние без частиц, с одной частицей, двумя частицами и т.д. (При ответе на этот вопрос достаточно рассматривать пространство Фока для бесспиновой частицы.)
7. Как преобразования Лоренца действуют на состояние с n бесспиновыми частицами $|k_1, k_2, k_3, \dots, k_n\rangle$? Как на него подействует сдвиг в пространстве-времени? Какие операторы являются генераторами пространственно-временных сдвигов?
8. Как квантовое поле преобразуется под действием преобразования Лоренца? Под действием сдвигов в пространстве-времени?
9. Запишите уравнение Дирака. Запишите определяющее тождество для гамма-матриц. Что такое γ^5 и каким (анти)коммутационным соотношениям удовлетворяет? О чем говорит существование матрицы γ^5 и тот факт, что она не пропорциональна единичной матрице? (**Подсказка:** это имеет отношение к приводимости/неприводимости представления.) На какие два неприводимых представления разбивается дираковский спинор? (**Подсказка:** вейлевские спиноры.) В каком случае два представления перемешиваются при эволюции, а в каком нет? (**Подсказка:** это связано с массой.) Как выглядят гамма-матрицы в вейлевском представлении? Как выглядит γ^5 ?
10. Что будет если фермион повернуть на 360 градусов? Он вернется в исходное состояние? А если человека повернуть?
11. Как выглядят решения в виде плоских волн для дираковского поля? Как дираковского поле раскладывается по ним? Какую роль играют коэффициенты? Какие у них (анти)коммутационные соотношения? Как нормируются решения уравнения Дирака в виде плоских волн? Чему равно $\sum_{s=1,2} u_s(k) \bar{u}_s(k)$? $\sum_{s=1,2} v_s(k) \bar{v}_s(k)$? Что означает индекс s в $u^s(k)$ и a_k^s ? В $v^s(k)$ и b_k^s ?

12. Любую комплексную матрицу 4×4 можно записать в виде линейной комбинации 16 базисных матриц с комплексными коэффициентами, перечислите их, пожалуйста. (Понятно, что базис можно выбирать бесконечным числом способов, перечислите те, что давались на лекции.) Если их поместить между $\bar{\psi}$ и ψ , получатся локальные операторы. Как они преобразуются под действием преобразования Лоренца? Операции пространственной инверсии? Что означает черта над ψ в $\bar{\psi}$?
13. Когда кто-то говорит, что непрерывное преобразование является симметрией теории, что это конкретно означает? Как построить сохраняющийся ток из вида непрерывного преобразования симметрии. Как получить заряд? Как из заряда получить унитарный оператор, осуществляющий преобразование симметрии в гильбертовом пространстве?
14. Когда кто-то говорит, что дискретное преобразование является симметрией теории, что это конкретно означает?
15. Что такое антиунитарный и антилинейный оператор? Приведите примеры. Что будет, если перемножить два антиунитарных оператора? Антиунитарный и унитарный оператор?
16. Запишите вид C-, P- и T-преобразования для дираковского спинора. Что можно сказать про лоренц-инвариантные теории с локальными эрмитовыми гамильтонианами?

6.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине (модулю), критерии и шкалы оценивания (в отсутствие утвержденных соответствующих локальных нормативных актов на факультете)

РЕЗУЛЬТАТ ОБУЧЕНИЯ по дисциплине (модулю)	ШКАЛА оценивания					ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНИВАНИЯ
	1	2	3	4	5	
знать основные модели квантовой теории поля и способы их квантования	Отсутствие знаний об основных моделях квантовой теории поля и способах их квантования	Фрагментарные знания об основных моделях квантовой теории поля и способах их квантования	Неполные знания об основных моделях квантовой теории поля и способах их квантования	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания об основных моделях квантовой теории поля и способах их квантования	Сформированные и систематические знания об основных моделях квантовой теории поля и способах их квантования	Экзамен
уметь канонически квантовать основные модели	Отсутствие умений канонически	Частично освоенное умение канонически квантовать основ-	В целом успешное, но не систематическое умение кано-	В целом успешное, но содержащее отдельные	Сформированное умение канонически	Экзамен

квантовой теории поля и вычислять в них амплитуды вероятности различных процессов в древесном приближении	квантовать основные модели квантовой теории поля и вычислять в них амплитуды вероятности различных процессов в древесном приближении	ные модели квантовой теории поля и вычислять в них амплитуды вероятности различных процессов в древесном приближении	нически квантовать основные модели квантовой теории поля и вычислять в них амплитуды вероятности различных процессов в древесном приближении	пробелы умение канонически квантовать основные модели квантовой теории поля и вычислять в них амплитуды вероятности различных процессов в древесном приближении	квантовать основные модели квантовой теории поля и вычислять в них амплитуды вероятности различных процессов в древесном приближении	
Иметь навык (опыт) выделения независимых динамических переменных полевой модели, их квантования, построения представления для канонических (анти)коммутационных соотношений в теории поля, вычисления элементов S-матрицы в квантовой теории поля	Отсутствие навыков выделения независимых динамических переменных полевой модели, их квантования, построения представления для канонических (анти)коммутационных соотношений в теории поля, вычисления элементов S-матрицы в квантовой теории поля	Фрагментарные навыки выделения независимых динамических переменных полевой модели, их квантования, построения представления для канонических (анти)коммутационных соотношений в теории поля, вычисления элементов S-матрицы в квантовой теории поля	В целом удовлетворительные, но не систематизированные навыки выделения независимых динамических переменных полевой модели, их квантования, построения представления для канонических (анти)коммутационных соотношений в теории поля, вычисления элементов S-матрицы в квантовой теории поля	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков выделения независимых динамических переменных полевой модели, их квантования, построения представления для канонических (анти)коммутационных соотношений в теории поля, вычисления элементов S-матрицы в квантовой теории поля	Успешное и систематическое применение навыков выделения независимых динамических переменных полевой модели, их квантования, построения представления для канонических (анти)коммутационных соотношений в теории поля, вычисления элементов S-матрицы в квантовой теории поля	Экзамен

					рии поля	
--	--	--	--	--	----------	--

Задачи к экзамену

1. Нерелятивистская квантовая теория поля. В этой задаче вас попросят применить метод канонического квантования к нерелятивистской теории поля с лагранжевой плотностью

$$L = i\psi^* \partial_0 \psi + b \nabla \psi^* \nabla \psi$$

где b — это вещественное число. Эта лагранжева плотность не вещественна, но ничего страшного: действие вещественно, так как результат комплексного сопряжения компенсируется интегрированием по частям.

(a) Запишите уравнения Эйлера—Лагранжа.

(b) Найдите решения в виде плоских волн, то есть те, для которых $\psi = e^{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{x} - \omega t)}$, и найдите ω как функцию \mathbf{k} .

(c) Хотя теория и не лоренц-инвариантна, она инвариантна относительно пространственно-временных трансляций и преобразования внутренней симметрии

$$\psi \rightarrow e^{-i\lambda} \psi, \quad \psi^* \rightarrow e^{i\lambda} \psi^*.$$

Таким образом, в ней есть сохраняющиеся энергия, импульс и заряд, связанный с внутренней симметрией. Найдите эти величины, как интегралы от полей и их производных. Определите знак b из требования, чтобы энергия была ограничена снизу.

(Как объяснялось на лекции, когда приходится иметь дело с комплексными полями, поля ψ и ψ^* можно считать независимыми. В конце концов все должно получиться верно: уравнение движения для ψ будет комплексно-сопряжено уравнению движения для ψ^* , а сохраняющиеся величины будут вещественны. **(Предупреждение.** Развитый нами на лекциях формализм приспособлен для лоренц-инвариантных теорий, так что будьте осторожны, когда будете применять его к нерелятивистской теории: не упустите знак при поднятии и опускании пространственных индексов.)

(d) Проквантуйте теорию канонически. **(Подсказка.** Канонический импульс для ψ^* равен нулю, но в этом нет ничего страшного, так как уравнения движения имеют первый порядок по времени и достаточно наложить коммутационные соотношения на ψ и $i\psi^*$.)

(e) отождествите с операторами рождения и/или уничтожения отнормированные подходящим образом коэффициенты в разложении полей по плоским волнам. **(Подсказка.** Наши релятивистские квантовые поля содержали всегда и положительно-частотную, и отрицательно-частотную часть, здесь поля будут содержать только одну из них.)

(f) Запишите энергию, импульс и заряд, связанный с внутренней симметрией, в терминах операторов рождения и уничтожения. (Нормально упорядочивайте по необходимости.)

Замечание. Естественно, ψ здесь — это не волновая функция одной единственной частицы, а квантовое поле. Разработанный вами формализм полезен при описании большого числа нерелятивистских тождественных частиц, поэтому он пригождается при описании, например, сверхпроводимости и сверхтекучести.

2. Рассеяние в теории Юкавы. Вычислите дифференциальное сечение $d\sigma/d\Omega$ в системе центра инерции в первом нетривиальном порядке теории возмущений, просуммированное по конечным спинам и усредненное по начальным спинам, для рассеяния скаляра на фермионе в теории Юкавы со взаимодействием:

$$L' = -g\bar{\psi}\psi\phi.$$

Замечания. 1) В этой и следующей задаче вам требуется найти лишь $d\sigma/d\Omega$, но не полное сечение. 2) Поскольку требуется найти сечение рассеяния в системе центра инерции, не составит труда выразить четырехмерные скалярные произведения через угол рассеяния θ и начальный импульс. Результат можно не подставлять в сечение. 3) Здесь две диаграммы.

3. Рассеяние в теории с псевдоскаляром. Вычислите рассеяние фермиона на антифермионе в теории с дираковским спинором, скаляром (а точнее псевдоскаляром) и взаимодействием между ними

$$L' = -g\bar{\psi}i\gamma^5\psi\phi.$$

Замечание. Здесь две диаграммы, но поскольку вам нужно лишь сечение, вас интересует лишь относительный знак между ними.

Как преобразуется поле ϕ под действием пространственной четности?

4. Инвариантный гамильтониан. Пусть ψ_A, ψ_B, ψ_C и ψ_D — четыре дираковских поля. Эти поля взаимодействуют друг с другом (и, возможно, с некоторыми скалярными или псевдоскалярными полями), сохраняя при этом инвариантность относительно С-, Р- и Т-преобразования. При этом закон преобразования для этих полей ровно такой, какой был получен на лекции. Предположим, мы хотим добавить к гамильтоновой плотности слагаемое со взаимодействием:

$$H' = g_1(\bar{\psi}_A\gamma^\mu\psi_B)(\bar{\psi}_C\gamma_\mu\psi_D) + g_2(\bar{\psi}_A\gamma^\mu\psi_B)(\bar{\psi}_C\gamma_\mu\gamma^5\psi_D) + g_3(\bar{\psi}_A\gamma^\mu\gamma^5\psi_B)(\bar{\psi}_C\gamma_\mu\psi_D) + g_4(\bar{\psi}_A\gamma^\mu\gamma^5\psi_B)(\bar{\psi}_C\gamma_\mu\gamma^5\psi_D) + \text{э.с.},$$

где g_i — это, вообще говоря, комплексные числа.

(а) На лекции мы говорили, что лоренц-инвариантные эрмитовы локальные гамильтонианы инвариантны относительно СРТ-преобразования. Проверьте, что $H'(0)$ инвариантно по отношению к СРТ независимо от того, каковы g .

(б) При каких условиях на константы g $H'(0)$ инвариантно относительно С? Р? Т? Относительно РТ? СТ? СР? **Подсказка.** Можете воспользоваться таблицей на странице 85 в учебнике Пескина и Шредера. **Еще подсказка.** Помните, что Т-преобразование является антиунитарным.

5. Распады хиггсовского бозона. Хиггсовский бозон взаимодействует с фермионами посредством обычного юкавского взаимодействия:

$$L' = -g\bar{\psi}\psi\phi,$$

где ψ обозначает тот или иной фермион Стандартной модели (кварк или лептон), а ϕ обозначает поле хиггсовского бозона. Найдите в первом нетривиальном приближении полную вероятность распада в единицу времени (Γ) хиггсовского бозона (естественно, считайте при этом, что $m_\phi > 2m_\psi$).

7. Ресурсное обеспечение:

7.1. Перечень основной и дополнительной литературы

Основная литература

1. Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Введение в теорию квантованных полей. М.: Ленанд, 2018.
2. Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Квантовые поля. М.: URSS, 2017.
3. Славнов А. А., Фаддеев Л. Д. Введение в квантовую теорию калибровочных полей. М.: URSS, 2017.

Дополнительная литература

1. Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Квантовая электродинамика. 4-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.
2. Вайнберг С. Квантовая теория поля. Т. 1. Общая теория. / Пер. с англ; под редакцией В.Ч. Жуковского. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015.
3. Пескин М., Шредер Д. Введение в квантовую теорию поля. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
4. Ициксон К., Зюбер Ж.-Б. Квантовая теория поля. Т. 1. М.: Мир, 1984.
5. Бояркин О. М., Бояркина Г. Г. Физика частиц. Книга 1. От электрона до бозона Хиггса. Квантовая теория свободных полей. М.: URSS, 2020.
6. Fradkin E. General Field Theory (Department of Physics, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2021), <http://eduardo.physics.illinois.edu/phys582/physics582.html>

7.2. Перечень лицензионного программного обеспечения, в том числе отечественного производства (подлежит обновлению при необходимости)

7.3. Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем (подлежит обновлению при необходимости)

7.4. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

7.5. Описание материально-технического обеспечения.

Аудитория, доска, мел.

8. Соответствие результатов обучения по данному элементу ОПОП результатам освоения ОПОП указано в Общей характеристике ОПОП.

Перечень лицензионного программного обеспечения, в том числе отечественного производства
При реализации дисциплины может быть использовано следующее программное обеспечение:

1. Программный продукт Red Hat Enterprise Linux Server for HPC Compute Node for Power, LE, Self-support 4 шт. №5540331
2. Программный продукт Red Hat Enterprise Linux Server for HPC Head Node for Power, LE, Standard 1 шт. №5540332
3. Операционная система SUSE Linux Enterprise Server 11 SP4 for x86_64 16 шт.
4. Операционная система Red Hat Enterprise Linux Server 5.0 for x86_64 14шт.
5. Операционная система SUSE Linux Enterprise Server 10 SP3 for ppc64 7 шт.
6. Операционная система Ubuntu 18.04.
7. Программное обеспечение для виртуализации Oracle VM VirtualBox
8. Операционная система ALTLinuxMATEStarterkit 9 лицензияGPL
9. Программный продукт JetBrains IntelliJ IDEA Community Edition Free Educational Licenses
10. Программный продукт JetBrains PyCharm Community Edition Free Educational Licenses
11. Программный продукт JetBrains CLion Community Edition Free Educational Licenses
12. Программный продукт UPPAAL (<http://www.uppaal.org/>) академическая лицензия
13. Программный продукт Java 8 (64-bit) Oracle Corporation
14. Программный продукт Java SE Development Kit 8(64-bit) Oracle Corporation
15. Программный продукт NetBeans IDE 8.2 NetBeans.org
16. Программный продукт Dev-C++ Bloodshed Software
17. Программный продукт CodeBlocks The Code::Blocks Team
18. Программный продукт Free Pascal 3.0.0 Free Pascal Team
19. Программный продукт Python 3.5.1 (64-bit) Python Software Foundation
20. Программный продукт R for Windows 3.2.2 R Core Team
21. Программный продукт Haskell Platform 7.10.3 Haskell.org
22. Операционная система Microsoft Windows 7 корпоративная академическая лицензия
23. Операционная система Microsoft Windows 10 Education академическая лицензия
24. Программный продукт Microsoft Project Professional 2013 академическая лицензия
25. Программный продукт Microsoft Visio Professional 2013 академическая лицензия

26. Программный продукт Microsoft VisualStudioProfessional 2013 - RUS [Русский (Россия)] академическая лицензия

Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

1. <http://www.edu.ru> – портал Министерства образования и науки РФ
2. <http://www.ict.edu.ru> – система федеральных образовательных порталов «ИКТ в образовании»
3. <http://www.openet.ru> - Российский портал открытого образования
4. <http://www.mon.gov.ru> - Министерство образования и науки Российской Федерации
5. <http://www.fasi.gov.ru> - Федеральное агентство по науке и инновациям