

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
ТАДЖИКИСТАН  
МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«РОССИЙСКО-ТАДЖИКСКИЙ (СЛАВЯНСКИЙ) УНИВЕРСИТЕТ»

Естественнонаучный факультет

---

Кафедра «Математики и физики»

---

«УТВЕРЖДАЮ»

«28» августа 2024 г.

Зав. кафедрой математики и физики

к.ф.м.н., доцент Гулбоев Б.Дж.



**ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ**  
по учебной дисциплине (модулю)  
«Квантовая электродинамика»  
Направление подготовки - 03.03.02 «Физика»  
Профиль подготовки - «Общая физика»  
Форма подготовки - очная  
Уровень подготовки - бакалавриат

Душанбе 2024 г.

## ПАСПОРТ ФОНДА ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

по дисциплине (модулю) «Квантовая электродинамика»

### Общие положения

Фонд оценочных средств (далее ФОС) предназначен для контроля и оценки образовательных достижений обучающихся, освоивших программу учебной дисциплины «Квантовая электродинамика» программы подготовки специалистов по бакалавру для специальности 03.03.02 Физики.

В результате освоения учебной дисциплины квантовой электродинамики обучающийся должен обладать предусмотренными ФГОС следующими умениями, знаниями, а также использовать приобретенные знания и умения в практической деятельности и повседневной жизни.

В результате освоения дисциплины «Квантовая электродинамика» формируются следующие (профессиональные) компетенции обучающегося:

#### 1) Профессиональные компетенции

код	Формируемая компетенция	Этапы формирования компетенции	Содержание этапа формирования компетенции	Вид оценочного средства
ПК-2	Способность проводить научные исследования в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований с помощью современной приборной базы (в том числе сложного физического оборудования) и информационных технологий с учетом отечественного и	Начальный этап (знания)	Знает: - основных методов теоретической и экспериментальной физики, экспериментальные основы научных приборов и методика проведения современного научного эксперимента в различных областях физики. - современные методы измерений и способы проведения эксперимента по определению основных физических величин во всех разделах физики, такие как оптика и спектроскопия, физика твердого тела, ядерной физики и т.д. - основные достижения, современные тенденции и современную экспериментальную базу в области физики.	Коллективум
		Продвинутый этап (навыки)	Умеет: - проводить измерения физических характеристик объектов и осуществлять приготовление образцов и подготовку приборов для проведения измерений. - обрабатывать полученные экспериментальные данные и проводить необходимые математические преобразования физических проблем, а также делать оценки по порядку величины.	Разноуровневые задачи и задания
		Завершающий этап (умения)	Владеет: - навыками работы с современными экспериментальными научными приборами и компьютерного управления современными экспериментальными	Коллективум

	зарубежного опыта		установками с использованием специального программного обеспечения; - компьютерной обработки полученных экспериментальных данных и использования электронно-вычислительной техники для расчетов и презентации полученных научных результатов. - грамотного использования физического научного языка для оформления ВКР, проектов и т.п.	
--	-------------------	--	---	--

Уровень и качество знаний обучающихся оценивается по результатам текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины в виде экзамена (на 8 семестре).

Текущий контроль включает в себя защиту выполненного практического задания.

Защита задач для самостоятельного решения проводится для проверки способности использовать законы теоретической физики при анализе условия и решения задач по квантовой электродинамике, а также умения применять математические методы для описания физических явлений.

Промежуточная аттестация по итогам освоения дисциплины проводится в виде экзамена на 8 семестре.

Экзамен предполагает ответ на теоретические вопросы виде билета из перечня вопросов по всему курсу. К моменту сдачи зачета должны быть благополучно пройдены предыдущие формы контроля.

Методика формирования результирующей оценки в обязательном порядке учитывает активность студентов на занятиях, посещаемость занятий, выполнение самостоятельных заданий.

**Комплект вопросов для письменной работы (ответы на контрольные вопросы) или для собеседования на коллоквиумах (по основным разделам дисциплины), а также для написания рефератов:**

№ п/п	Контролируемые разделы, темы, модули <sup>1</sup>	Формируемые компетенции	Оценочные средства		
			Количество тестовых заданий	Другие оценочные средства	
				Вид	Количество
1	Тема 1. Фотон и бозоны. (Введение. Соотношения неопределенности в релятивистской области. Квантование свободного электромагнитного поля. Фотоны. Калибровочная инвариантность. Электромагнитное поле в квантовой теории. Момент и четность фотона.	ПК-2	100	Решение задач Опрос Реферат	3 5 3

<sup>1</sup>Наименования разделов, тем, модулей соответствуют рабочей программе дисциплины.

	Сферические волны фотонов. Поляризация фотона. Система двух фотонов. Волновое уравнение для частиц со спином. Частицы и античастицы. Истинно нейтральные частицы. Преобразования $C, P, T$ . Волновое уравнение для частицы со спином 1.)				
2	Тема 2. Фермионы. (Четырехмерные спиноры. Связь спиноров с 4-векторами. Инверсия спиноров. Уравнение Дирака в спинорном представлении. Симметричная форма уравнения Дирака. Алгебра матриц Дирака. Плоские волны. Сферические волны. Связь спина со статистикой. Зарядовое сопряжение и обращение спиноров по времени. Внутренняя симметрия частиц и античастиц. Билинейные формы. Поляризационная матрица плотности. Нейтрино.)	ПК-2		Решение задач Опрос Реферат	3 5 3
3	Тема 3. Частица во внешнем поле. (Уравнение Дирака для электрона во внешнем поле. Разложение по степеням $1/\alpha$ . Тонкая структура уровней атома водорода. Движение в центрально-симметричном поле. Движение в кулоновом поле. Рассеяние в центрально-симметричном поле. Рассеяние в ультрарелятивистском случае. Система волновых функций непрерывного спектра для рассеяния в кулоновском поле. Электрон в поле плоской электромагнитной волны.	ПК-2		Решение задач Опрос Реферат	3 5 3

	Движение, спина во внешнем поле.)				
4	Тема 4. Излучение. (Оператор электромагнитного взаимодействия. Испускание и поглощение. Дипольное излучение. Электрическое мультипольное излучение. Магнитное мультипольное излучение. Угловое распределение и поляризация излучения. Излучение атомов. Электрический тип. Излучение атомов. Магнитный тип. Излучение атомов. Эффекты Зеемана и Штарка. Излучение атомов. Атом водорода. Излучение двухатомных молекул. Электронные спектры. Излучение двухатомных молекул. Колебательный и вращательный спектры. Фотоэффект. Нерелятивистский случай. Фотоэффект. Релятивистский случай. Фоторасщепление дейтрона.)	ПК-2		Решение задач Опрос Реферат	3 5 3
5	Тема 5. Рассеяние света. (Тензор рассеяния. Рассеяние свободно ориентирующимися системами. Рассеяние на молекулах. Естественная ширина спектральных линий.)	ПК-2		Решение задач Опрос Реферат	3 5 3
6	Тема 6. Матрица рассеяния. (Амплитуда рассеяния. Реакции с поляризованными частицами. Кинематические инварианты. Физические области. Разложение по парциальным амплитудам. Инвариантные амплитуды. Условие унитарности.)	ПК-2		Решение задач Опрос Реферат	3 5 3

7	<p>Тема 7. Инвариантная теория возмущений. (Хронологическое произведение. Диаграммы Фейнмана для рассеяния электронов. Диаграммы Фейнмана для рассеяния фотона. Электронный пропагатор. Фотонный пропагатор. Общие правила диаграммной техники. Перекрестная инвариантность.)</p>	ПК-2		<p>Решение задач Опрос Реферат</p>	<p>3 5 3</p>
8	<p>Тема 8. Взаимодействие электронов. (Рассеяние электрона во внешнем поле. Рассеяние электронов и позитронов на электроне. Ионизационные потери быстрых частиц. Уравнение Брейта. Позитроний. Взаимодействие атомов на далеких расстояниях. Взаимодействие электронов с фотонами. Рассеяние фотона электроном. Рассеяние фотона электроном. Поляризационные эффекты. Двухфотонная аннигиляция электронной пары. Аннигиляция позитрония. Магнитотормозное излучение. Образование пар фотоном в магнитном поле. Тормозное излучение электрона на ядре. Нерелятивистский случай. Тормозное излучение электрона на ядре. Релятивистский случай. Образование пар фотоном в поле ядра. Точная теория рождения пар в ультрарелятивистском случае. Точная теория тормозного излучения в ультрарелятивистском случае. Тормозное излучение электрона на</p>	ПК-2		<p>Решение задач Опрос Реферат</p>	<p>3 5 3</p>

	электроне в ультрарелятивистском случае. Излучение мягких фотонов при столкновениях. Метод эквивалентных фотонов. Образование пар при столкновениях частиц. Излучение фотона электроном в поле интенсивной электромагнитной волны.)				
--	--	--	--	--	--

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Изучение дисциплины «Квантовая электродинамика» организуется в виде лекций, практических занятий и самостоятельной работы. Продолжительность изучения дисциплины -1 семестра. Уровень и качество знаний обучающихся оцениваются по результатам входного контроля, текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины в виде зачета.

Лекция - основная форма систематического, последовательного устного изложения учебного материала. Чтение лекций, как правило, осуществляется наиболее профессионально подготовленными преподавателями университета. Основными задачами лекций являются:

- ознакомление обучающихся с целями, задачами и структурой изучаемой дисциплины, ее местом в системе наук и связями с другими дисциплинами;
- изложение комплекса основных научных понятий, законов, методов, принципов данной дисциплины;

Лекции мотивируют обучающегося на самостоятельный поиск и изучение научной и специальной литературы и других источников по темам дисциплины, ориентируют на выявление, формулирование и исследование наиболее актуальных вопросов и проблем физической кинетики. Значимым фактором полноценной и плодотворной работы обучающегося на лекции является культура ведения конспекта. Слушая лекцию, необходимо научиться выделять и фиксировать ее ключевые моменты, записывая их более четко и выделяя каким-либо способом из общего текста. Кроме того, необходимо научиться делать понятные для обучающегося сокращения при записи текста лекции и стремиться освоить быструю манеру письма и рубрикацию материала.

Интерактивные лекции проводятся в форме проблемных лекций. В ходе проблемной лекции преподаватель включает в процесс изложения материала серию проблемных вопросов. Как правило, это сложные, ключевые для темы вопросы. Студенты приглашаются для размышлений и поиску ответов на них по мере их постановки. Типовая структура проблемной лекции включает:

- создание проблемной ситуации через постановку учебной проблемы; конкретизацию этой проблемы, выдвижение гипотез по ее решению;
- мысленный эксперимент по проверке выдвинутых гипотез;
- проверку сформулированных гипотез, подбор аргументов и фактов для их подтверждения;
- формулировку выводов;
- подведение к новым противоречиям или перспективам изучения последующего материала;

- вопросы для обратной связи, помогающие корректировать умственную деятельность студентов на лекции. В ходе проблемной лекции проводится дискуссия по актуальным вопросам.

Практические занятия по дисциплине «Квантовая электродинамика» проводятся в соответствии с учебно-тематическим планом по отдельным группам. Цель практических занятий - закрепить теоретические знания, полученные студентами на лекциях и в результате самостоятельного изучения соответствующих разделов рекомендуемой литературы, а также приобрести начальные практические навыки анализа наблюдаемых физических явлений.

Темы практических занятий заранее сообщаются обучающимся для того, чтобы они имели возможность подготовиться и проработать соответствующие теоретические вопросы дисциплины. В начале каждого практического занятия преподаватель кратко доводит до обучающихся цель и задачи занятия и сообщает обучающимся основные законы необходимые для решения задач на занятии.

В рамках практического занятия обучающиеся решают задачи и разбирают практические задачи самостоятельно или при помощи преподавателя. Преподаватель выступает в роли консультанта, осуществляет контроль полученных обучающимися результатов.

Интерактивными являются практические занятия в форме метода развивающейся кооперации (решение задач в группах с последующим обсуждением).

Отсутствие обучающихся на занятиях или их неактивное участие на них может быть компенсировано самостоятельным выполнением дополнительных заданий и представлением их на проверку преподавателю.

Целью самостоятельной работы обучающихся при изучении настоящей учебной дисциплины является выработка ими навыков работы с научной и учебной литературой, а также развитие у обучающихся устойчивых способностей к самостоятельному изучению и обработке полученной информации.

В процессе самостоятельной работы обучающийся должен воспринимать, осмысливать и углублять получаемую информацию, решать практические задачи, подготавливать доклады, выполнять домашние задания, овладевать профессионально необходимыми навыками. Самостоятельная работа обучающегося весьма многообразна и содержательна. Она включает следующие виды занятий:

-самостоятельный подбор, изучение, конспектирование, анализ учебно-методической и научной литературы, периодических научных изданий,

-индивидуальная творческая работа по осмыслению собранной информации, проведению сравнительного анализа и синтеза материалов, полученных из разных источников, интерпретации информации, выполнение домашних заданий;

-завершающий этап самостоятельной работы;

-подготовка к сдаче экзамена по дисциплине, предполагающая интеграцию и систематизацию всех полученных при изучении учебной дисциплины знаний.

Опрос — это выяснение мнения сообщества по тем или иным вопросам. По итогам опроса могут быть изменены или отменены существующие либо приняты новые правила и руководства (за исключением противоречащих общим принципам проекта). Опрос студентов проводится с целью:

- систематизации и закрепления полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубления и расширения теоретических знаний;
- формирования умений использовать справочную и специальную литературу;
- развития познавательных способностей и активности студентов;
- творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирования самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;



- развития исследовательских умений.

Требование к опросу:

- точность ответа на поставленный вопрос;
- формулировка целей и задач работы;
- раскрытие (определение) рассматриваемого понятия (определения, проблемы, термина);
- четкость структуры работы;
- самостоятельность, логичность изложения;
- наличие выводов, сделанных самостоятельно.

Критерии оценки по опросу:

Отметка «5». Выступление выполнено в полном объеме с соблюдением необходимой последовательности. Работа соответствует требованию.

Отметка «4». Выступление отвечает предъявленным требованиям. Допускаются отклонения от необходимой последовательности выполнения, не влияющие на правильность конечного результата.

Отметка «3». Учащиеся показывают знания не в полной мере и испытывают затруднение при решении задач.

Отметка «2» выставляется в том случае, когда учащиеся не подготовлены к выполнению этой работы.

Решение задач — процесс выполнения действий или мыслительных операций, направленный на достижение цели, заданной в рамках проблемной ситуации задачи; является составной частью мышления. С точки зрения когнитивного подхода процесс решения задач является наиболее сложной из всех функций интеллекта и определяется как когнитивный процесс более высокого порядка, требующий согласования и управления более элементарными или фундаментальными навыками.

Критерии оценки решения задач:

Оценка «5» - выставляется студенту, если он активно принимал участие в решении задач и отвечал на вопросы полным ответом с доказательством и решением безошибочно.

Оценка «4» - наличие несущественных ошибок, уверенно исправляемых обучающимся после дополнительных и наводящих вопросов. Демонстрация обучающимся знаний в объеме пройденной программы. Четкое изложение учебного материала.

Оценка «3» - наличие несущественных ошибок в ответе, не исправляемых обучающимся. Демонстрация обучающимся недостаточно полных знаний по пройденной программе.

Оценка «2» - выставляется студенту, если он не участвовал в решении задач, а при вызывании к доске не мог ничего ответить.

Критерии оценки выполнения самостоятельной работы.

Критериями оценок результатов внеаудиторной самостоятельной работы студента являются:

- уровень освоения студентами учебного материала;
- умения студента использовать теоретические знания при выполнении практических задач;
- сформированность общеучебных умений;
- умения студента активно использовать электронные образовательные ресурсы; находить требующуюся информацию, изучать ее и применять на практике;
- обоснованность и четкость изложения ответа;
- оформление материала в соответствии с требованиями;
- умение ориентироваться в потоке информации, выделять главное;
- умение четко сформулировать проблему, предложив ее решение, критически оценить решение и его последствия;

-умение показать, проанализировать альтернативные возможности, варианты действий;

-умение сформировать свою позицию, оценку и аргументировать ее.

Критерии оценки самостоятельной работы студентов:

Оценка «5» ставится тогда когда студент свободно применяет знания на практике, не допускает ошибок в воспроизведении изученного материала, выделяет главные положения в изученном материале и не затрудняется в ответах на видоизмененные вопросы, усваивает весь объем программного материала и оформлен аккуратно в соответствии с требованиями;

Оценка «4» ставится тогда когда студент знает весь изученный материал, отвечает без особых затруднений на вопросы преподавателя, умеет применять полученные знания на практике, в ответах не допускает серьезных ошибок, легко устраняет определенные неточности с помощью дополнительных вопросов преподавателя, материал оформлен недостаточно аккуратно и в соответствии с требованиями;

Оценка «3» ставится тогда когда студент обнаруживает освоение основного материала, но испытывает затруднения при его самостоятельном воспроизведении и требует дополнительных дополняющих вопросов преподавателя, предпочитает отвечать на вопросы воспроизводящего характера и испытывает затруднения при ответах на воспроизводящие вопросы, материал оформлен не аккуратно или не в соответствии с требованиями;

Оценка «2» ставится тогда когда студента имеет отдельные представления об изучаемом материале, но все, же большая часть не усвоена и материал оформлен не в соответствии с требованиями.

В основу разработки балльно-рейтинговой системы положены принципы, в соответствии с которыми формирование рейтинга студента осуществляется постоянно в процессе его обучения в университете. Настоящая система оценки успеваемости студентов основана на использовании совокупности контрольных точек, равномерно расположенных на всем временном интервале изучения дисциплины. При этом предполагается разделение всего курса на ряд более или менее самостоятельных, логически завершенных блоков и модулей и проведение по ним промежуточного контроля.

Студентам выставляются следующие баллы за выполнение задания ПК:

- **оценка «отлично» (10 баллов):** контрольные тесты, а также самостоятельно выполненные семестровые задания, выполненные полностью и сданные в срок в соответствии с предъявляемыми требованиями;

- **оценка «хорошо» (8-9 баллов):** задание выполнено и в целом отвечает предъявляемым требованиям, но имеются отдельные замечания в его оформлении или сроке сдачи;

- **оценка «удовлетворительно» (6-7 баллов):** задание выполнено не до конца, отсутствуют ответы на отдельные вопросы, имеются отклонения в объеме, содержании, сроке выполнения;

- **оценка «неудовлетворительно» (5 и ниже):** отсутствует решение задачи, задание переписано (скачано) из других источников, не проявлена самостоятельность при его выполнении.

Текущий контроль осуществляется в ходе учебного процесса по результатам выполнения самостоятельной работы и контрольной работы.

Основными формами текущего контроля знаний являются:

- обсуждение вынесенных в планах практических занятий лекционного материала и контрольных вопросов;

- решение тестов и их обсуждение с точки зрения умения сформулировать выводы, вносить рекомендации и принимать адекватные управленческие решения;

- выполнение контрольной работы и обсуждение результатов;

- участие в дискуссиях в качестве участника и модератора групповой дискуссии по темам дисциплины;
- написание и презентация доклада;
- написание самостоятельной (контрольной) работы.

Для контроля усвоения данной дисциплины учебным планом предусмотрен экзамен. Общее количество баллов по дисциплине - 100 баллов в семестре. Распределение баллов на текущий и промежуточный контроль при освоении дисциплины, а также итоговой оценке представлено ниже.

### **ПРИМЕРЫ ОПРОСОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА ПО ОСВОЕНИЮ МАТЕРИАЛА**

1. Что изучает квантовая электродинамика?
2. Что такое уравнения непрерывности?
3. Как пишется физические величины в квантовой физике?
4. Как пишется оператор импульса?
5. Как пишется оператор энергии?
6. Что такое принцип неопределённости?
7. Как пишется волновая функция?
8. Какое физическое значение имеет волновая функция?
9. Что такое принцип соответствия?
10. Как определяют уравнений непрерывности?
11. Что характеризует уравнений непрерывности?
12. Где принимается приближенное решение кинетического уравнения?
13. Как имеет вид уравнение Шредингера
14. Какой вид имеет уравнение Клейна-Гордона
15. Как имеет вид уравнение Дирака
16. Какую связь между уравнениями Дирака и Клейна-Гордона
17. Что значит релятивистская инвариантность уравнения Дирака
18. Что такое четырёхмерный вектор спина
19. Что значит матрица рассеяния
20. Как описать законы сохранения в квантовой электродинамике
21. Как происходит квантование свободного электромагнитного поля.
22. Как проводится калибровка.
23. Что такое электромагнитное поле в квантовой теории.
24. Как пишется волновое уравнение для частиц со спином.
25. Что характеризует диаграмма Феймана
26. Что означает тензор рассеяния света
27. Как происходит коммутации.
28. Рассеяние на молекулах.
29. Естественная ширина спектральных линий.
30. Как происходит рассеяние электрона во внешнем поле.
31. Как характеризуется рассеяние электронов и позитронов на электроне.
32. Как происходит взаимодействия электронов с фотонами.
33. Инвариантные амплитуды. Условие унитарности.
34. Что объясняет рассеяние фотона электроном.
35. Общие правила диаграммной техники. Перекрестная инвариантность.
36. Что означает тормозное излучение электрона на ядре.
37. Тормозное излучение электрона на электроне в ультрарелятивистском случае.
38. Излучение мягких фотонов при столкновениях.
39. Метод эквивалентных фотонов.
40. Образование пар при столкновениях частиц.

## ПРИМЕРЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА ПО РЕШЕНИЮ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ.

1. Какой вид имеет метрический тензор  $g^{\mu\nu}$  в  $n$ -мерном евклидовом пространстве? А в  $n$ -мерном пространстве Минковского, которое содержит  $p$  временных и  $q$  пространственных измерений (естественно, что  $n=p+q$ )?
2. В пространстве Минковского даны два 4-вектора  $a^\mu=(1/2, 1/3, -1/4, 1/2)$  и  $b^\mu=(1/6, 1, 1/2, -3/4)$ . Вычислить, чему равны скалярные произведения  $a^\mu a_\mu \equiv a^2$ ,  $b^\mu b_\mu \equiv b^2$  и  $a^\mu b_\mu \equiv (ab)$ .
3. Найти, чему равны свертки и произведения  $g_{\mu\mu}$ ;  $g_{\mu\nu}g^{\mu\alpha}$ ;  $g_{\mu\nu}g^{\alpha\mu}$ ;  $g_{\mu\nu}g^{\mu\nu}$  в 4-мерном пространстве Минковского.
4. Объясните, почему все нижеперечисленные свертки  $g_{\mu\mu}$ ;  $g_{\mu\nu}a^\mu b^\nu$ ;  $g_{\mu\nu}q^\nu b_\mu c^\mu$ ;  $a^\mu b_\mu c^\mu d_\mu$  не имеют никакого смысла.
5. При помощи явного вида матрицы преобразования Лоренца  $A_\mu^\nu(v)$  показать, что скалярное произведение двух 4-векторов является лоренц-инвариантом.
6. Проверить, что в теории поля два лагранжиана, отличающиеся между собой на 4-дивергенцию некоторого 4-вектора (т.е. на величину  $\partial_\mu V^\mu(x)$ ), приводят к одинаковым уравнениям Лагранжа.
7. Зная явный вид тензора напряженности электромагнитного поля  $F_\mu^\nu(x)$  получить явный вид  $F_\mu^\nu(x)$ .
8. Получить выражение для тензора энергии-импульса  $T_\mu^\nu$  свободного электромагнитного поля в произвольной калибровке.
9. Привести примеры истинно нейтральных адронов, отличных от  $\pi^0$ -мезона. Встречаются ли среди них барионы?
10. Предполагая, что движение электрона в атоме водорода можно описать при помощи уравнения Клейна–Гордона–Фока с кулоновским взаимодействием, получить выражение для тонкой структуры спектра. Совпадает ли полученная формула с экспериментальными данными?
11. Найти унитарные матрицы переходов от стандартного к спинорному представлению и от спирального к спинорному представлению.
12. Предполагая, что движение электрона в атоме водорода можно описать при помощи уравнения Дирака с кулоновским взаимодействием, получить выражение для тонкой структуры спектра.
13. Найти явный вид  $u(p, \lambda)$  в спиральном и спинорном представлениях.
14. Основываясь на результатах предыдущей задачи покажите, что операторы  $P_\pm = 1/\sqrt{2} (I \pm \gamma^5)$  можно рассматривать как проекционные операторы. На какие состояния проецируют эти операторы?
15. Доказать, что операция взятия следа двух матриц удовлетворяет всем аксиомам скалярного произведения. Самостоятельно сформулируйте, каким свойствам при этом должны удовлетворять указанные матрицы.
16. Найти явный вид оператора зарядового сопряжения в спиральном и спинорном представлениях.
17. Найти явный вид  $v(p, \lambda)$  в спиральном и спинорном представлениях.
18. Найти явный вид операторов пространственной четности  $P$  и обращения времени  $T$  для спирального и спинорного представлений.
19. Прямыми вычислениями показать, что  $C$  – четность электромагнитного тока отрицательна.
20. Показать, что если  $\hat{A}(S)$  и  $\hat{A}(H)$  – операторы одной и той же наблюдаемой в представлении Шредингера ( $S$ ) и представлении Гейзенберга ( $H$ ) соответственно, то собственные значения обоих операторов совпадают. Как этот факт можно объяснить с

физической, а не с математической точки зрения? Обобщите утверждение на произвольное представление (в том числе и на представление взаимодействия).

21. Доказать, что коммутационные соотношения в представлениях Шредингера и Гейзенберга имеют один и тот же вид. Как обобщить данное утверждение на любое другое представление (в том числе и на представление взаимодействия)?

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

23. Доказать, что из-за бозевости фотонов распад  $\rho^0 \rightarrow \gamma\gamma$  запрещен не только за счет электромагнитного взаимодействия (теорема Фарри), но и за счет любого другого взаимодействия.

24. Получить уравнение эволюции для оператора  $A^{\hat{}}(t)$  некоторой физической величины  $A$  в представлении взаимодействия.

### ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ

1. Частицы и античастицы.
2. Истинно нейтральные частицы.
3. Волновое уравнение для частицы со спином 1.
4. Волновое уравнение для частиц с высшими целыми спинами. Спиральные состояния частицы.
5. Поляризационная матрица плотности.
6. Нейтрино.
7. Волновое уравнение для частицы со спином 3/2.
8. Система волновых функций непрерывного спектра для рассеяния в кулоновском поле.
9. Электрон в поле плоской электромагнитной волны.
10. Колебательный и вращательный спектры.
11. Нерелятивистский случай. Фотоэффект.
12. Релятивистский случай. Фоторасщепление дейтрона.
13. Рассеяние нейтронов в электрическом поле.
14. Контроль самостоятельных работ на тему: Излучение ядер.
15. Резонансная флуоресценция.
16. Симметрия спиральных амплитуд рассеяния.
17. Виртуальные частицы.
18. Излучение фотона электроном в поле интенсивной электромагнитной волны.
19. Тормозное излучение электрона на ядре.
20. Тормозное излучение электрона на электроном в ультрарелятивистском случае.
21. Излучение мягких фотонов при столкновениях.
22. Метод эквивалентных фотонов.
23. Образование пар при столкновениях частиц.
24. Излучение фотона электроном в поле интенсивной электромагнитной волны.

### ПРИМЕРНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ ВОПРОСОВ К ЭКЗАМЕНУ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОНТРОЛЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Соотношения неопределенности в релятивистской области.
2. Квантование свободного электромагнитного поля.
3. Фотоны.
4. Калибровочная инвариантность.
5. Электромагнитное поле в квантовой теории.
6. Момент и четность фотона.
7. Сферические волны фотонов.
8. Поляризация фотона.

9. Система двух фотонов.
10. Волновое уравнение для частиц со спином.
11. Частицы и античастицы. Истинно нейтральные частицы.
12. Преобразования  $C, P, T$ . Волновое уравнение для частицы со спином 1.
13. Четырехмерные спиноры.
14. Связь спиноров с 4-векторами.
15. Инверсия спиноров.
16. Уравнение Дирака в спинорном представлении.
17. Симметричная форма уравнения Дирака.
18. Алгебра матриц Дирака.
19. Плоские волны.
20. Сферические волны.
21. Связь спина со статистикой.
22. Зарядовое сопряжение и обращение спиноров по времени.
23. Внутренняя симметрия частиц и античастиц.
24. Билинейные формы.
25. Поляризационная матрица плотности.
26. Нейтрино.
27. Уравнение Дирака для электрона во внешнем поле.
28. Разложение по степеням  $1/\alpha$ .
29. Тонкая структура уровней атома водорода.
30. Движение в центрально-симметричном поле.
31. Движение в кулоновом поле.
32. Рассеяние в центрально-симметричном поле.
33. Рассеяние в ультррелятивистском случае.
34. Система волновых функций непрерывного спектра для рассеяния в кулоновском поле.
35. Электрон в поле плоской электромагнитной волны.
36. Движение, спина во внешнем поле.
37. Оператор электромагнитного взаимодействия.
38. Испускание и поглощение.
39. Дипольное излучение.
40. Электрическое мультипольное излучение.
41. Магнитное мультипольное излучение.
42. Угловое распределение и поляризация излучения.
43. Излучение атомов.
44. Электрический тип. Излучение атомов.
45. Магнитный тип. Излучение атомов.
46. Эффекты Зеемана и Штарка.
47. Излучение атомов.
48. Атом водорода.
49. Излучение двухатомных молекул.
50. Электронные спектры.
51. Излучение двухатомных молекул.
52. Колебательный и вращательный спектры.
53. Фотоэффект. Нерелятивистский случай.
54. Фотоэффект. Релятивистский случай.
55. Фоторасщепление дейтрона.
56. Рассеяние света.
57. Тензор рассеяния.
58. Рассеяние свободно ориентирующимися системами.
59. Рассеяние на молекулах.

60. Естественная ширина спектральных линий.
61. Матрица рассеяния.
62. Амплитуда рассеяния.
63. Реакции с поляризованными частицами.
64. Кинематические инварианты.
65. Физические области. Разложение по парциальным амплитудам.
66. Инвариантные амплитуды.
67. Условие унитарности.
68. Инвариантная теория возмущений.
69. Хронологическое произведение.
70. Диаграммы Фейнмана для рассеяния электронов.
71. Диаграммы Фейнмана для рассеяния фотона.
72. Электронный пропагатор.
73. Фотонный пропагатор.
74. Общие правила диаграммной техники.
75. Перекрестная инвариантность.
76. Рассеяние электрона во внешнем поле.
77. Рассеяние электронов и позитронов на электроне.
78. Ионизационные потери быстрых частиц.
79. Уравнение Брейта.
80. Позитроний.
81. Взаимодействие атомов на далеких расстояниях.
82. Взаимодействие электронов с фотонами.
83. Рассеяние фотона электроном. Рассеяние фотона электроном.
84. Поляризационные эффекты.
85. Двухфотонная аннигиляция электронной пары.
86. Аннигиляция позитрония.
87. Магнитотормозное излучение.
88. Образование пар фотоном в магнитном поле.
89. Тормозное излучение электрона на ядре.
90. Нерелятивистский случай.
91. Тормозное излучение электрона на ядре.
92. Релятивистский случай.
93. Образование пар фотоном в поле ядра.
94. Точная теория рождения пар в ультрарелятивистском случае.
95. Точная теория тормозного излучения в ультрарелятивистском случае.
96. Тормозное излучение электрона на электроне в ультрарелятивистском случае.
97. Излучение мягких фотонов при столкновениях.
98. Метод эквивалентных фотонов.
99. Образование пар при столкновениях частиц.
100. Излучение фотона электроном в поле интенсивной электромагнитной волны.

### Итоговые оценки студентов

**Буквенное обозначение итоговых оценок студентов и их цифровые эквиваленты:**

Буквенная оценка	Цифра	Общий балл	Традиционная оценка
A	4	$95 \leq A \leq 100$	отлично
A-	3,67	$90 \leq A < 95$	
B+	3,33	$85 \leq B < 90$	хорошо
B	3	$80 \leq B < 85$	

B-	2,67	$75 \leq B < 80$	
C+	2,33	$70 \leq C < 75$	удовлетворительно
C	2	$65 \leq C < 70$	
C-	1,67	$60 \leq C < 65$	
D+	1,33	$55 \leq D < 60$	
D	1	$50 \leq D < 55$	
Fx	0	$45 \leq Fx < 50$	неудовлетворительно
F	0	$0 < F < 45$	

**Критерии выведения итоговой оценки промежуточной аттестации:**

«Отлично» - средняя оценка  $\geq 3,67$ .

«Хорошо» - средняя оценка  $\geq 2,67$  и  $\leq 3,33$ .

«Удовлетворительно» - средняя оценка  $\geq 1,0$  и  $\leq 2,33$ .

«Неудовлетворительно» - средняя оценка  $< 1,0$ .

Разработчик: к.ф.-м.н., Махмадбегов Р.С. \_\_\_\_\_



« 28 » \_\_\_\_\_ 08 \_\_\_\_\_ 2024 г.