

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов»  
(РУДН)*

*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  
03.03.02 «Физика»**

**Квалификация (степень) выпускника  
бакалавр**

**1. Цели и задачи дисциплины:** Целью курса является изучение методов квантовой теории поля.

**2. Место дисциплины в структуре ООП:**

Дисциплина относится к дисциплинам вариативной части образовательной программы по направлению 03.03.02 – Физика, Б1.В.ДВ.06. Изучение дисциплины базируется на следующих дисциплинах образовательной программы бакалавриата по направлению: на модуле «Математика» базовой части цикла, модуле «Общая физика», модуле «Теоретическая физика», дисциплинах вариативной части: «Теория колебаний и волн».

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 использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин	Введение в астрофизику	Дополнительные главы теоретической физики

**3. Требования к результатам освоения дисциплины:**

В результате изучения дисциплины студент должен:

**знать:** принципы квантования полей;

**уметь:** строить диаграммы Фейнмана и находить амплитуды процессов, вычислять ширины распадов и сечения процессов рассеяния;

**владеть:** навыками освоения большого объема информации, навыками самостоятельной работы.

**4. Объем дисциплины и виды учебной работы**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 6 зачетных единиц.

Вид учебной работы	Всего часов	Семестр	
		Д	Е
<b>Аудиторные занятия (всего)</b>	<b>51</b>	<b>27</b>	<b>24</b>
В том числе:			
Лекции			
Практические занятия (ПЗ)	51	27	24
Семинары (С)			
Лабораторные работы (ЛР)			
<b>Самостоятельная работа (всего)</b>	<b>165</b>	<b>117</b>	<b>48</b>
<i>Другие виды самостоятельной работы</i>			
Изучение литературы по дисциплине			
Самостоятельное решение задач по дисциплине			
Вид промежуточной аттестации (зачет, экзамен)			
Общая трудоемкость, час	<b>216</b>	<b>144</b>	<b>72</b>
зач. ед.	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>2</b>

## 5. Содержание дисциплины

### 5.1. Содержание разделов дисциплины

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела
1	Классические поля	<p>Обозначения и система единиц. Лагранжев формализм, принципы построения лагранжианов, Группа Лоренца и ее тензорные представления.</p> <p>Симметрии и теорема Нетер: тензор энергии-импульса, момента, токи, отвечающие внутренним симметриям.</p> <p>Действительное свободное скалярное поле. Принцип построение Лагранжиана, вывод уравнений поля. Решение уравнений: представление в виде плоских волн. Динамические сохраняющиеся величины в импульсном пространстве. Комплексное скалярное поле.</p> <p>Электромагнитное поле. Лагранжиан. Уравнения поля в ковариантном виде. Свойства решений, калибровочный принцип. Динамические сохраняющиеся величины в импульсном пространстве.</p> <p>Особенности массивного векторного поля: Лагранжиан и уравнения движения, поперечность.</p> <p>Поле Дирака. Построение уравнений движения (релятивистская квантовая механика). Алгебра матриц Дирака, представления матриц Дирака.</p> <p>Релятивистская ковариантность уравнения Дирака, получение спинорного представление группы Лоренца. Построение тензорных представлений группы Лоренца из спинорного. P-преобразование спиноров.</p> <p>Поле Дирака. Лагранжев формализм. Свойства решений: разложение по спиновым состояниям.</p> <p>Безмассовое спинорное поле: спиральность и киральность.</p>
2	Квантование свободных полей	<p>Принципы квантования волновых полей. Каноническое квантование.</p> <p>Поле как система осцилляторов с бесконечным числом степеней свободы.</p> <p>Операторное квантование. Представление Шредингера и Гейзенберга. Релятивистская схема квантования. Постулат квантования.</p> <p>Физический смысл операторов рождения и уничтожения. Амплитуда состояния в фоковском представлении.</p> <p>Нахождение перестановочных соотношений. Квантование по Ферми–Дираку и Бозе–Эйнштейну. Теорема Паули.</p> <p>Квантование свободного скалярного поля. Нормировка состояний.</p> <p>Квантование свободного массивного векторного поля.</p> <p>Особенности и проблемы квантования электромагнитного поля. Метод Гупта–Блейера. Пространство физических состояний.</p> <p>Ненаблюдаемость временных и продольных фотонов.</p> <p>Квантование свободного поля Дирака. Степени свободы. Зарядовое сопряжение: C-матрица.</p> <p>PT-преобразования в квантовой теории. Нахождение операторов, осуществляющих PT-преобразование. Антиунитарность T-преобразования. Преобразование амплитуд состояний при PT. P- и T-четность частиц. CPT-теорема</p>

## 5.2. Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Практ. зан.	Лаб. зан.	Семина.	СРС	Всего час.
1.	Классические поля			27	117	144
2.	Квантование свободных полей			24	48	72
	<b>ИТОГО</b>			<b>51</b>	<b>165</b>	<b>216</b>

6. Лабораторный практикум не предусмотрен учебным планом

## 7. Практические занятия (семинары)

№ п/п	№ раздела дисциплины	Тематика практических занятий (семинаров)	Трудо-емкость (час.)
1.	1	Классические поля	27
2.	2	Квантование свободных полей	24

8. Примерная тематика курсовых проектов (работ) не предусмотрены учебным планом

## 9. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины:

### Основная литература:

1. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. Введение в теорию квантованных полей. Собрание научных трудов в 12 томах. Квантовая теория. Том 10. М.: Издательство Московского Университета, 2008.
2. Пескин М., Шрёдер Д. Введение в квантовую теорию поля. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Физматлит, 2012.

### Дополнительная литература:

1. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. Введение в теорию квантованных полей. М.: Наука, 1984.
2. Ициксон К., Зюбер Ж.-Б. Квантовая теория поля. В 2-х томах: М.,
3. Бьеркен Дж.Д., Дрелл С.Д. Релятивистская квантовая теория. В 2-х томах. М.: Наука, 1978.
4. Ченг Т.-П., Ли Л.-Ф. Калибровочные теории в физике элементарных частиц. М.: Мир, 1987.
5. Волошин М.Б., Тер-Мартirosян К.А. Теория калибровочных взаимодействий элементарных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1984.
6. Райдер Л. Квантовая теория поля. М.: Мир, 1987.
7. Рамон П. Теория поля. Современный вводный курс. М.: Мир, 1984.
8. Окунь Л.Б. Лептоны и кварки. М.: Наука, 1990.
9. Weinberg S. Quantum theory of fields. Cambridge University Press, vol.1: 1995; vol.2: 1997.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. IV. М.: Наука, 1989.
11. Рубаков В.А. Классические калибровочные поля. Эдиториал УРСС, 1999

в) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

<http://www.eps.org/> – Европейское физическое общество.

<http://www.kiae.ru/> – Курчатовский институт.

<http://www.kipt.kharkov.ua/indexr.html> – национальный научный центр. Харьковский физико-технический институт.

<http://fusedweb.llnl.gov/> – исследования ядерной энергии.

<http://www.aip.org/> – американский институт физики

<http://top.msu.ru/> - каталог научно-образовательных ресурсов МГУ

<http://nuclphys.sinp.msu.ru/> - Ядерная физика в Интернете (НИИЯФ МГУ).

<http://www.physics-words.com/> - толковые словари по физике

<http://prac-gw.sinp.msu.ru/atom.htm> - Практикум по ядерной и атомной физике МГУ

<http://www.phys.nsu.ru/> - сайт физического факультета Новосибирского государственного университета

<http://psj.nsu.ru/> - центр инновационных образовательных технологий Новосибирского государственного университета

<http://www.iop.org/> - web-сайт Международного Института Физики

<http://physics.nist.gov/lab.html> - физическая лаборатория Национального института стандартов и технологий США (включая базы экспериментальных данных)

<http://www.iaea.org/> - Международное агентство по атомной энергии

<http://www.vacuum.ru/> - (Рос вакуумное общество)

<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html> - таблицы баз данных рентгеновской спектроскопии (институт стандартизации и технологий США)

#### **10. Материально-техническое обеспечение дисциплины:**

Лекционный компьютер, мультимедийный проектор, интерактивная доска, лицензионное ПО: Microsoft Office (Word Excel PowerPoint), Adobe Acrobat 8.0 Pro, Maple, MatLab и MathCad, Simulink. Дисплейный класс для проведения занятий.

#### **11. Методические рекомендации по освоению дисциплины:**

Студентам следует: приносить с собой рекомендованную преподавателем литературу к конкретному занятию; до очередного практического занятия по рекомендованным литературным источникам проработать теоретический материал соответствующей темы занятия; в ходе семинара давать конкретные, четкие ответы по существу вопросов; на занятии доводить каждую задачу до окончательного решения, демонстрировать понимание проведенных расчетов (анализов, ситуаций), в случае затруднений обращаться к преподавателю.

Студентам, пропустившим занятия (независимо от причин), не имеющим письменного решения задач или не подготовившиеся к данному практическому занятию, рекомендуется не позже чем в 2-недельный срок явиться на консультацию к преподавателю и отчитаться по теме, изучавшейся на занятии. Студенты, не отчитавшиеся по каждой не проработанной ими на занятиях теме к началу зачетной сессии, упускают возможность получить положенные баллы за работу в соответствующем семестре.

#### **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 по дисциплине

Ответ на экзамене оценивается по следующим критериям (максимально можно набрать 40 баллов):

Набрано баллов	Критерии
33-40 баллов	1) содержание материала билета раскрыто полностью; 2) материал изложен грамотно, в определенной логической последовательности, точно используется терминология; 3) показано умение иллюстрировать теоретические положения конкретными примерами, применять их в новой ситуации; 4) продемонстрировано усвоение ранее изученных сопутствующих вопросов; 5) ответ самостоятельный, без наводящих вопросов; 6) допущены одна–две неточности при освещении второстепенных вопросов, которые исправляются после замечаний или наводящих вопросов.
25-32 баллов	Ответ удовлетворяет в основном требованиям на оценку «отлично», но при этом имеет один из недостатков: 1) в изложении допущены небольшие пробелы, не искажившие сути содержания ответа; 2) допущены один–два недочета при освещении основного содержания ответа (выполнения практического задания), исправленные после замечания экзаменатора; 3) допущены ошибка или более двух недочетов при освещении второстепенных вопросов, которые исправляются после замечания экзаменатора.
16-24 баллов	1) неполно или непоследовательно раскрыто содержание материала, но продемонстрированы общее понимание вопроса и умения, достаточные для дальнейшего усвоения материала; 2) имелись затруднения или допущены ошибки в определении понятий, использовании терминологии, выполнении практических заданий, исправленные после нескольких наводящих вопросов; 3) при неполном знании теоретического материала выявлена недостаточная сформированность компетенций, умений и навыков, студент не может применить теорию в новой ситуации
менее 16 баллов	1) не раскрыто основное содержание учебного материала; 2) обнаружено незнание или непонимание большей или наиболее важной части учебного материала; 3) допущены ошибки в определении понятий, при использовании терминологии, которые не исправлены после нескольких наводящих вопросов. 4) ответ на вопрос полностью отсутствует. 5) отказ от ответа.

**Паспорт фонда оценочных средств по дисциплине «Классическая и квантовая теория поля»**

Направление/Специальность: 03.03.02 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	Реферат	Контрольная работа	Экзамен/Зачет	...	...		
ПК-1	Раздел 1 Классические поля	Тема 1 Лагранжиан. Уравнения поля в ковариантном виде. Свойства решений, калибровочный принцип	10		5	10			25	50
		Тема 2: Лагранжев формализм. Свойства решений: разложение по спиновым состояниям	10		5	10			25	
ПК-1	Раздел 2: Квантование свободных полей	Тема 1: Квантование по Ферми–Дираку и Бозе–Эйнштейну. Теорема Паули	10		5	10			25	50
		Тема 2: Нахождение операторов, осуществляющих РТ-преобразование. Антиунитарность Т-преобразования. Преобразование амплитуд состояний при РТ. Р- и Т-четность частиц. СРТ-теорема	10		5	10			25	
		<b>Итого:</b>	<b>40</b>		<b>20</b>	<b>40</b>			<b>100</b>	<b>100</b>

### Вопросы для самоподготовки

1. Свойства полной ортонормированной системы векторов в линейном пространстве
2. Определение и свойства дельта-функции Дирака
3. Определение и свойства самосопряженного оператора
4. Что такое задача на собственные значения? Свойства собственных векторов и собственных значений самосопряженного оператора
5. Что следует понимать под вырождением собственных значений
6. В чем заключается смысл соотношения неопределенностей Гейзенберга?
7. Сформулируйте теорему о собственных функциях и собственных значениях коммутирующих операторов.
8. Записать коммутационные соотношения для операторов импульса и координаты.
9. Как описывается зависимость от времени операторов в картине Гейзенберга?
10. Как описывается зависимость от времени волновых функций в картине Шредингера?
11. Свойства волновых функций и энергий системы, состоящей из невзаимодействующих частей.
12. Какими свойствами обладает волновая функция стационарного состояния?
13. Свойства волновой функции свободно движущейся частицы.
14. Энергия свободно движущейся частицы.
15. Длина волны де Бройля.
16. Свойства ортогональности и нормировки для волновой функции свободного движения.
17. Определение и свойства оператора четности.
18. Уровни энергии гармонического осциллятора.
19. Гамильтониан гармонического осциллятора в представлении операторов рождения и уничтожения.
20. Свойства оператора углового момента. Собственные векторы и собственные значения. Диапазон изменений квантовых чисел.
21. Свойства собственных функций орбитального углового момента (сферических гармоник).
22. Записать уравнение Шредингера для атома водорода.
23. Общие свойства решения уравнения Шредингера для атома водорода. Волновые функции, энергии.
24. Оператор магнитного момента, создаваемого орбитальным движением электрона.
25. Общая постановка задачи для стационарной теории возмущений.
26. Поправки первого и второго порядка к энергии в невырожденной теории возмущений.
27. Поправка первого порядка к волновой функции в невырожденной теории возмущений.
28. Постановка задачи в теории возмущений для вырожденных уровней.
29. Энергия движения свободной частицы в постоянном магнитном поле.
30. Записать математическую формулировку вариационного принципа в квантовой механике. Как связаны стационарное уравнение Шредингера и принцип минимума энергии
31. В чем суть метода линейных комбинаций орбиталей? Что понимают под орбиталью?
32. Как связано происхождение разрешенных энергетических зон в кристалле с уровнями энергии атома?
33. Записать выражение для вероятности перехода в двухуровневой системе под действием монохроматического возмущения. Что такое расстройка частоты, частота Раби? Как влияют эти величины на вероятность перехода?
34. Что такое адиабатическое возмущение? Критерий адиабатичности. Вероятность перехода под действием адиабатического возмущения?
35. Критерий внезапности возмущения. Записать вероятность перехода под действием внезапного возмущения.



36. Записать выражение для вероятности перехода в единицу времени под действием гармонического монохроматического возмущения между дискретными уровнями. В чем физический смысл дельта-функции в этом выражении?
37. Записать общее определение плотности состояний в непрерывном спектре. Физический смысл функции плотности состояний для непрерывного спектра.
38. Записать вероятность перехода в единицу времени в непрерывный спектр под действием гармонического монохроматического возмущения.
39. Записать волновую функцию квазистационарного состояния. В чем смысл комплексной энергии? Какова связь с соотношением неопределенностей энергия-время?
40. Записать выражение для вероятности перехода в единицу времени между атомными уровнями в поле классической световой волны.
41. В чем состоят правила отбора для дипольных переходов в атоме?
42. Записать гамильтониан электромагнитного поля.
43. Что представляет из себя фотон с точки зрения квантовомеханического описания?
44. Записать действие операторов рождения и уничтожения на собственные векторы электромагнитного поля.
45. Записать энергию квантованного электромагнитного поля. Что такое электромагнитный вакуум? Почему это понятие отсутствует в классической физике?
46. Записать гамильтониан системы атом+квантованное поле.
47. Записать энергию атома и поля в приближении, когда их взаимодействие отсутствует
48. Записать матричные элементы операторов рождения и уничтожения
49. Записать выражение для вероятности поглощения и испускания света атомом. Что означает наличие дельта-функции в этом выражении?
50. Чем отличаются спонтанные и вынужденные переходы?
51. С чем связана естественная ширина атомных уровней?
52. Написать выражение для плотности состояний фотонов.
53. Записать распределение Планка.
54. Что такое коэффициенты Эйнштейна? Выписать соотношение между ними.
55. Что понимается под заселенностью атомных уровней?
56. С чем связано доплеровское уширение атомных уровней?
57. Записать совместно законы сохранения энергии и импульса при поглощении и испускании квантов движущимся атомом.
58. Записать выражение для доплеровского сдвига частоты при взаимодействии света с атомом. Что такое эффект отдачи?
59. Как связаны комплексная диэлектрическая проницаемость и коэффициент поглощения света?
60. Что следует понимать под системой с инверсной заселенностью? Каковы особенности взаимодействия света с такими системами?
61. Записать среднее значение произвольной физической величины в смешанном ансамбле.
62. Записать уравнение движения для оператора плотности.
63. Определить физический смысл матричных элементов матрицы плотности.
64. В чем состоит физическая природа релаксационного члена в уравнении для матрицы плотности? Что такое время релаксации и его физический смысл?
65. Записать квантовомеханическое выражение для мнимой части диэлектрической проницаемости. В чем проявляется роль заселенностей квантовых уровней?
66. Сформулировать правило сумм для сил осцилляторов.
67. Нарисовать качественную картину частотной дисперсии коэффициентов поглощения и преломления света. С какими характеристиками квантовой системы связаны особенности на этих кривых?
68. Принцип и схема работы квантового генератора.

69. Нарисовать схему уровней и описать свойства системы, необходимые для осуществления генерации света.
70. Дать определение спина. Спиновые характеристики бозе и ферми частиц.
71. Спиновая координата и ее свойства.
72. Оператор спина и его свойства.
73. Вид волновой функции в нерелятивистском приближении.
74. Спиновый магнитный момент. Аномальное гиромагнитное отношение для электрона.
75. Записать оператор спин-орбитального взаимодействия. Порядок величины релятивистских поправок к оператору энергии электрона.
76. Почему понятие спина отсутствует в классической физике?
77. Записать вид одночастичной волновой функции электрона в атоме.
78. Сложение орбитального и спинового моментов. Связь между собственными функциями.
79. Записать спиновые части одночастичной волновой функции для проекции спина  $\frac{1}{2}$  и  $-\frac{1}{2}$ .
80. Сформулировать принцип тождественности частиц, в том числе на языке волновых функций.
81. Чем отличаются волновые функции систем из бозе- и ферми-частиц?
82. Сформулировать принцип Паули в общей и частной формулировках.
83. Записать волновую функцию парасостояния.
84. Записать волновую функцию ортосостояния.
85. Записать кулоновский и обменный вклады в энергию двухэлектронной системы.
86. Нарисовать схему уровней атома гелия. Что такое орто- и парагелий?
87. Объяснить, что называется синглетом и триплетом. Какова основная особенность триплетного уровня?
88. Записать уравнение Хартри.
89. Записать уравнение Хартри-Фока. Каково происхождение обменного члена?
90. Чем отличаются  $L-S$  и  $j-j$  связь?
91. Что понимают под электронной оболочкой в атоме?
92. С чем связано понятие эффективного заряда в атоме? Как проявляется электрон-электронное взаимодействие в поведении уровней энергии атомов?
93. Запишите формулу для релятивистских поправок к уровням энергии атома. Почему за ними закрепилось название тонкой структуры?
94. Запишите выражение для уровней энергии атома в постоянном магнитном поле. В чем состоит нормальный и аномальный эффект Зеемана? В чем источник аномального эффекта?
95. В чем сущность адиабатического приближения в теории многоатомных систем?
96. Запишите гамильтониан молекулы водорода.
97. Запишите выражение для связывающей и антисвязывающей орбиталей молекулы водорода. Нарисуйте вид распределения электронной плотности.
98. Запишите выражение для энергии связывающего и антисвязывающего состояний молекулы водорода.
99. Свойства ковалентной связи.
100. Что такое  $sp_3$  гибридизация? В каких физических системах возникает это понятие?
101. Как квантовая механика объясняет взаимодействие Ван-дер-Ваальса? В чем основное отличие сил Ван-дер-Ваальса от ковалентных сил?
102. В чем состоит проявление резонансного взаимодействия между нейтральными молекулами? Какова квантовомеханическая природа этого взаимодействия?
103. В чем состоит сущность квазиклассического приближения в квантовой механике?
104. Что такое точка поворота (остановки) в квазиклассическом приближении и какие проблемы в расчете волновой функции с ними связаны? В чем состоит идея метода ВКБ?

### Примерный список задач, выносимых на экзамен

1. Найти уровни энергии в одномерной симметричной потенциальной яме .
2. Найти вероятность отражения частицы при прохождении над одномерным потенциальным барьером (энергия частицы больше высоты барьера).
3. Найти s-уровни энергии в сферически-симметричной потенциальной яме .
4. Найти s-уровни энергии в сферической оболочке .
5. Для водородоподобного атома в основном состоянии найти вероятность пребывания электрона в классически запрещенной области.
6. Рассчитать расщепление уровня энергии атома водорода с  $n = 2$  в слабом однородном электрическом поле.
12. Найти оператор, эрмитово сопряженный оператору комплексного сопряжения.
13. Найти спектр и собственные функции оператора трансляции.
14. Показать, что коммутатор наблюдаемых не является наблюдаемой.
16. Найти коммутаторы операторов координат момента импульса и импульса.
17. Показать, что в любом стационарном состоянии среднее значение импульса должно равняться нулю.
18. Найти вид оператора скорости заряженной без спиновой частицы, находящейся в произвольном электромагнитном поле.
20. Квантовая частица находится в основном состоянии линейного гармонического осциллятора. Найти вероятность пребывания этой частицы в области, запрещенной для классического движения.
21. Проверить выполнение соотношения неопределенности для координаты и импульса частицы, совершающей линейные гармонические колебания.
22. Как изменятся разрешенные значения энергии заряженного квантового гармонического осциллятора, если поместить его в постоянное, однородное электрическое поле. Сравнить точный ответ с первой поправкой к осцилляторным уровням энергии, если поле рассматривать как возмущение.
23. Для квантовой частицы, находящейся в «бесконечно глубокой потенциальной яме» в первом возбужденном состоянии определить среднюю кинетическую энергию и среднее квадратичное отклонение от этого значения.

### Вопросы для промежуточной аттестации

1. Основы квантовой физики.
  - 1.1. Корпускулярно – волновой дуализм, его основания и проявления.
  - 1.2. Движение волнового пакета. Групповая и фазовая скорости. Соотношение неопределенностей.
  - 1.3. Принципы соответствия дополнительности.
  - 1.4. Расплывание волнового пакета.
  - 1.5. Принципы микро и макро причинности.
  - 1.6. Уравнение Шредингера и его свойства.
  - 1.7. Уравнение непрерывности.
  - 1.8. Уравнение Шредингера для заряженной частицы в электромагнитном поле. Обобщенное уравнение Шредингера.
  - 1.10. Описание стационарных состояний.
  - 1.11. Операторы динамических переменных и их свойства, их собственные функции и собственные значения.
  - 1.12. Особенности описания состояний с дискретным и непрерывным спектрами. Вырожденные состояния. Условия полноты.
  - 1.13. Средние значения динамических величин.
  - 1.14. Алгебра коммутаторов.
  - 1.15. Теорема о возможности изменения двух динамических величин.
  - 1.16. Обобщенное соотношение неопределенности.

- 1.17. Уравнение Гейзенберга.
- 1.18. Уравнение Эренфеста.
- 1.19. Связь квантовой механики с классической.
20. Законы сохранения в квантовой механике.
- 1.21. Конфигурационные представления.
- 1.22. Эволюционное представление.
- 1.23. Унитарные преобразования.
2. Точно решаемые квантовомеханические задачи.
  - 2.1. Движение частицы в бесконечно глубокой потенциальной яме.
  - 2.2. Движение частицы в потенциальной яме конечной глубины.
  - 2.3. Одномерный гармонический осциллятор (решение спектральной задачи).
  - 2.4. Двухмерный гармонический осциллятор. Причины вырождения.
  - 2.5. Оператор момента импульса и его свойства.
  - 2.6. Спектральные задачи для оператора момента импульса и его квадрата.
  - 2.7. Атом водорода. Постановка задачи, переход в систему центра масс, разделение переменных.
  - 2.8. Решение радиального уравнения для атома водорода.
  - 2.9. Собственные функции и собственные значения в задаче об атоме водорода.
  - 2.10. Движение электрона в однородном электрическом поле.
  - 2.11. Движение электрона в однородном магнитном поле.
  - 2.12. Спин электрона и его магнитный момент.
  - 2.13. Уравнение Паули. Спинорные вакуумные функции.
  - 2.14. Матрицы Паули.
  - 2.15. Нормальный эффект Зеемана.
  - 2.16. Оператор полного момента импульса и его свойства.
3. Приближенные методы квантовой механики.
  - 3.1. Стационарная теория возмущений в случае отсутствия вырождения.
  - 3.2. Стационарная теория возмущений в случае вырождения. Вековое уравнение.
  - 3.3. Ангармонический осциллятор.
  - 3.4. Эффект Штарка.
  - 3.5. Аномальный эффект Зеемана.
  - 3.6. Нестационарная теория возмущений. Постановка задачи, второй порядок теории возмущений.
  - 3.7. Нестационарная теория возмущений в случае импульсного воздействия.
  - 3.8. Нестационарная теория возмущений в случае гармонического воздействия.
  - 3.9. Плотность состояний.
  - 3.10. Элементарная теория излучения. Коэффициенты Эйнштейна и их вычисление по теории возмущений.
  - 3.11. Квазиклассическое приближение, общий случай.
  - 3.12. Квазиклассическое приближение, решение одномерной задачи. Туннельный эффект.
  - 3.13. Радиоактивный распад.
  - 3.14. Функция Грина уравнения Шредингера.
  - 3.15. Теория рассеяния, уравнение Липпмана – Швингера.
  - 3.16. Теория рассеяния, Борновское приближение.
  - 3.17. Сечение рассеяния.
  - 3.18. Формула Резерфорда.
4. Системы тождественных частиц.
  - 4.1. Принцип тождественности частиц. Фермионы и бозоны.
  - 4.2. Волновые функции системы тождественных частиц.
  - 4.3. Переход к представлению чисел заполнения (представление Фока).
  - 4.4. Операторы аддитивного и бинарного типа в представлении чисел заполнения.
  - 4.5. Представление вторичного квантования.

- 4.6. Уравнения движения для операторов рождения и уничтожения в системе с парным взаимодействием. Элементы диаграммной техники.
- 4.7. Матрица плотности и ее свойства. Чистые и смешанные состояния.
- 4.8. Уравнение движения для матрицы плотности.
- 4.9. Функция Грина в системе многих частиц.
5. Заключение.
- 5.1. Стохастическая модель физического вакуума.
- 5.2. Модель Дирака физического вакуума. Частицы и античастицы.
- 5.3. Поляризация вакуума. Необходимость перенормировок.
- 5.4. Лембовский сдвиг.
- 5.5. Аномальный магнитный момент электрона.
- 5.6. Эффект Казимира.
- 5.7. Эффект Фулинга – Унру.
- 5.8. Эффект Швингера вакуумного туннелирования частиц.
- 5.9. Вакуумное рождение частиц в сверхсильных полях черных дыр, сверхмощных лазеров, в соударениях тяжелых ионов в ранней Вселенной.

### Контрольная работа 1

1. Найти условия, которым должны удовлетворять операторы  $\hat{A}, \hat{B}$  для того, чтобы выполнялось соотношение  $(\hat{A} + \hat{B})(\hat{A} - \hat{B}) = \hat{A}^2 - \hat{B}^2$
2. Является ли эрмитовым оператор  $\hat{x}\hat{p}$  ?
3. Вычислить коммутатор операторов  $[\hat{x}\hat{G}(\hat{p})]$ . Произвольная функция  $G(\xi)$  предполагается аналитической.
4. Исходя из вида волновых функций  $\varphi_n = \frac{1}{\sqrt{n!}}(\hat{a}^+)^n \varphi_0$  доказать для гармонического осциллятора теорему вириала  $\langle \varphi_n | \hat{T} | \varphi_n \rangle = \langle \varphi_n | \hat{U} | \varphi_n \rangle$
5. Вычислить поправку первого порядка к уровням энергии гармонического осциллятора при наличии возмущения  $\hat{V} = \lambda \hat{x}^2$ , где  $\lambda$  - малый параметр.

Руководитель направления 03.03.02

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



О.Т. Лоза