

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет
Кафедра теоретической физики**



**Рабочая программа дисциплины
КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ 2**

направление подготовки: **03.03.02 Физика**
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения: **Очная**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Прием заданий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	180	48	48	16	44	18	4			2
Всего 180 часов / 5 зачётных единиц, из них: - контактная работа 118 часов										
Компетенции: ОПК-1										

Ответственный за образовательную программу,
д.ф.-м.н., проф.

С.В. Цыбуля

Новосибирск, 2022

Содержание

Аннотация	3
1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.	5
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы	5
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.	7
4. Структура и содержание дисциплины	8
5. Перечень учебной литературы.	12
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	12
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.	13
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	14
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.	14
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	14

Аннотация

к рабочей программе дисциплины курса «Квантовая теория 2»

Направление: **03.03.02 Физика**

Направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Программа курса «**Квантовая теория 2**» составлена в соответствии с требованиями СУОС к уровню бакалавриата по направлению подготовки **03.03.02 Физика, направленность «Общая и фундаментальная физика»**, а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ. Дисциплина реализуется на физическом факультете Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ) кафедрой теоретической физики. Курс реализуется кафедрой теоретической физики, входит в набор вариативных дисциплин и является дисциплиной по выбору.

Целью курса является обучение студентов-физиков основам квантовомеханического подхода в решении задач, применяемым в квантовой физике и в физике элементарных частиц. Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей общепрофессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p>ОПК-1. Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности</p>	<p>ОПК-1.1. Применяет математический аппарат, теоретические и методологические основы математических дисциплин для решения профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p> <p>ОПК -1.2. Использует теоретические основы базовых разделов математических и естественно-научных дисциплин при решении профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p>	<p>Знать: основные релятивистские уравнения квантовой механики; фазовую теорию рассеяния; понятие тождественных частиц; стационарную и нестационарную теорию возмущений; квазиклассическое приближение; тонкую и сверхтонкую структуру атомных уровней; квантовые основы таблицы Менделеева; квантовомеханические эффекты во внешних полях (эффект Зеемана, Папшена-Бака, Штарка и проч.); приближенные методы квантовой механики (приближение Томаса-Ферми, вариационный метод, подход Хартри-Фока); квантование электромагнитного поля и разные виды рассеяния света (рэлеевское, томсоновское).</p> <p>• Уметь: решать простейшие задачи с релятивистскими уравнениями; использовать борновское приближение и простейшие элементы фазовой теории в задачах рассеяния; делать оценки для различных ве-</p>

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
		<p>личин (в частности, коэффициентов прохождения) на основе квазиклассического приближения; рассчитывать тонкую структуру атомных уровней на основе гамильтониана Брейта; пользоваться правилами Хунда; использовать стационарную и нестационарную теорию возмущений в задачах с малыми возмущениями; проводить квантование свободного электромагнитного поля и уметь решать простейшие задачи с квантованным электромагнитным полем (фотоэффект, расчет ширин спектральных линий).</p> <p>Владеть: техникой расчета квантовомеханических задач рассеяния (включая рассеяние тождественных частиц); математическими приемами при решении релятивистских квантовых уравнений; понятиями об устройстве тонкой и сверхтонкой структуры атомных уровней; приближенными методами квантовой механики (теория возмущений, вариационный метод, многочастичные приближенные методы).</p>

Курс читается в 6-ом семестре. Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, контрольные работы, семестровые домашние задания и индивидуальный прием этих заданий, консультации, самостоятельная работа студента, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: решение задач из семестрового задания, контрольная работа.

Промежуточная аттестация: экзамен (в летнюю сессию) в форме контрольной работы и устного собеседования.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет **180** академических часов / **5** зачетных единиц.

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Целью курса «Квантовая теория 2» является обучение студентов-физиков основам квантовомеханического подхода в решении задач, применяемым в квантовой физике и в физике элементарных частиц. В курсе излагается материал, знание которого необходимо как для выполнения теоретических работ, так и прикладных вычислений в фундаментальной физике. В процессе освоения дисциплины студенты знакомятся с релятивистскими уравнениями квантовой механики (уравнение Клейна-Гордона и уравнение Дирака), с квантовой теорией рассеяния, с понятием тождественных частиц, с квазиклассическим приближением, с приближенными методами квантовой механики, с тонкой и сверхтонкой структурой атомных уровней, с квантованием электромагнитного поля и др.

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p>ОПК-1. Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности</p>	<p>ОПК-1.1. Применяет математический аппарат, теоретические и методологические основы математических дисциплин для решения профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p> <p>ОПК -1.2. Использует теоретические основы базовых разделов математических и естественнонаучных дисциплин при решении профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p>	<p>Знать: основные релятивистские уравнения квантовой механики; фазовую теорию рассеяния; понятие тождественных частиц; стационарную и нестационарную теорию возмущений; квазиклассическое приближение; тонкую и сверхтонкую структуру атомных уровней; квантовые основы таблицы Менделеева; квантовомеханические эффекты во внешних полях (эффект Зеемана, Пашена-Бака, Штарка и проч.); приближенные методы квантовой механики (приближение Томаса-Ферми, вариационный метод, подход Хартри-Фока); квантование электромагнитного поля и разные виды рассеяния света (рэлеевское, томсоновское).</p> <p>Уметь: решать простейшие задачи с релятивистскими уравнениями; использовать борновское приближение и простейшие элементы фазовой теории в задачах рассеяния; делать оценки для различных величин (в частности, коэффициентов прохождения) на основе квазиклассического приближения; рассчитывать тонкую структуру атомных уровней на основе гамильтониана Брейта; пользоваться правилами Хунда; использовать стационарные уравнения Шредингера для</p>

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
		<p>нарную и нестационарную теорию возмущений в задачах с малыми возмущениями; проводить квантование свободного электромагнитного поля и уметь решать простейшие задачи с квантованным электромагнитным полем (фотоэффект, расчет ширин спектральных линий).</p> <p>Владеть: техникой расчета квантовомеханических задач рассеяния (включая рассеяние тождественных частиц); математическими приемами при решении релятивистских квантовых уравнений; понятиями об устройстве тонкой и сверхтонкой структуры атомных уровней; приближенными методами квантовой механики (теория возмущений, вариационный метод, многочастичные приближенные методы).</p>

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Курс квантовой теории занимает центральное место в процессе обучения студентов на третьем курсе физического факультета Новосибирского государственного университета по направлению «03.03.02 Физика».

Дисциплина «Квантовая теория 2» изучается в весеннем семестре студентами третьего курса бакалавриата физического факультета, обучающимися по направлению подготовки 03.03.02 Физика. Курс реализуется кафедрой теоретической физики, входит в набор вариативных дисциплин и является дисциплиной по выбору.

Для восприятия дисциплины «Квантовая теория 2» требуется предварительная подготовка студентов по таким физическим дисциплинам как квантовая теория-1, электродинамика, аналитическая механика, функциональный анализ, методы математической физики, линейная алгебра и математический анализ.

3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Прием заданий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	180	48	48	16	44	18	4			2
Всего 180 часов / 5 зачётных единиц, из них: - контактная работа 118 часов										
Компетенции: ОПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, консультации, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью семестровых заданий, экзаменов, проходящий в форме письменной контрольной и собеседования.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: домашние задания, контрольные работы, семестровые задания для самостоятельного решения.

Промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет **180** академических часов / **5** зачетных единиц:

- занятия лекционного типа – 48 часов;
- практические занятия – 48 часов;
- прием заданий – 16 часов;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 44 часа;
- промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультация и экзамен) – 24 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, групповые консультации, экзамен) составляет 118 часов.

4. Структура и содержание дисциплины

Дисциплина «Квантовая теория 2» представляет собой полугодовой курс, читаемый на 3-м курсе физического факультета НГУ в 6 семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 5 зачётных единиц, 180 академических часов.

№ п/п	Раздел дисциплины, основное содержание лекций	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)						Консультации (в часах)	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы			Сам. работа во время занятий	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции (кол-во часов)	Практические занятия (кол-во часов)	Прием заданий				
1	Уравнение Клейна-Гордона, ток, калибровочная инвариантность. Уравнение Дирака, γ -матрицы, свободное движение. Гамильтонова форма уравнения Дирака. С, Р, Т-преобразования. Сохранение полного момента в центрально-симметричном поле. Спиральность. Парадокс Клейна.	1-2	14	4	4	2	4			
2	Трёхмерное рассеяние, постановка задачи. Борновское приближение, критерий применимости. Рассеяние в кулоновском поле, атомный форм-фактор.	3-4	14	4	4	2	4			
3	Фазовая теория рассеяния. Рассеяние медленных частиц, рассеяние быстрых частиц, дифракционное рассеяние, резонансное рассеяние, формула Брейта-Вигнера.	4-5	12	4	4		4			
4	Тождественность частиц в квантовой механике. Волновые функции систем тождественных бозонов и фермионов. Принцип Паули. Рассеяние тождественных частиц.	5	12	4	4	2	2			
5	Стационарная теория возмущений. Производная энергии по параметру. Поляризуемость атома водорода. Силы Ван-дер-Ваальса. Вырожденный случай. Непересечение уровней. Обменная энергия.	6-7	12	4	4		4			
6	Квазиклассическое приближение. Критерий применимости. Правила сшивки. Правило квантования Бора-Зоммерфельда. Нормировка квазиклассической волновой функции. Плотность состояний в фазовом пространстве. Двойная яма, задача с начальными условиями. α -распад.	8-9	14	4	4	2	4			
7	Приближение Томаса-Ферми. Вариационный метод. Атом гелия. Уравнение Хартри-Фока.	10	10	3	3	2	2			
8	Рассеяние быстрого электрона в кулоновском поле, гамильтониан Брейта, тонкая структура уровней.	11	12	4	4		4			
9	Таблица Менделеева. LS- и JJ-связь. Правила Хунда.	12	10	3	3	2	2			
10	Сверхтонкая структура. Изотопический сдвиг. Атом в постоянном внешнем поле. Эффекты Зеемана, Пашена-Бака и Штарка.	13-14	12	4	4		4			

№ п/п	Раздел дисциплины, основное содержание лекций	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)						Консультации (в часах)	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы			Сам. работа во время занятий	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции (кол-во часов)	Практические занятия (кол-во часов)	Прием заданий				
11	Нестационарная теория возмущений. Адиабатическое и внезапное возмущения. Периодическое возмущение. Золотое правило Ферми. Фотоэффект.	14-15	14	4	4	2	4			
12	Квантование электромагнитного поля. Спонтанное и индуцированное излучение. Лэмб-сдвиг. Естественная ширина спектральных линий.	15-16	10	3	3	2	2			
13	Рассеяние света. Рэлеевское, томсоновское и резонансное рассеяние.	16	10	3	3		4			
14	Самостоятельная работа в период подготовки к промежуточной аттестации		18					18		
15	Консультации		4						4	
16	Экзамен		2						2	
	Всего		180	48	48	16	44	18	4	2

Программа и основное содержание лекций (48 часов)

1. Уравнение Клейна-Гордона, ток, калибровочная инвариантность. Уравнение Дирака, γ -матрицы, свободное движение. Гамильтонова форма уравнения Дирака. С, P, T-преобразования. Сохранение полного момента в центрально-симметричном поле. Спиральность. Парадокс Клейна. **(4 часа)**

2. Трёхмерное рассеяние, постановка задачи. Борновское приближение, критерий применимости. Рассеяние в кулоновском поле, атомный формфактор. **(4 часа)**

3. Фазовая теория рассеяния. Рассеяние медленных частиц, рассеяние быстрых частиц, дифракционное рассеяние, резонансное рассеяние, формула Брейта-Вигнера. **(4 часа)**

4. Тождественность частиц в квантовой механике. Волновые функции систем тождественных бозонов и фермионов. Принцип Паули. Рассеяние тождественных частиц. **(4 часа)**

5. Стационарная теория возмущений. Производная энергии по параметру. Поляризуемость атома водорода. Силы Ван-дер-Ваальса. Вырожденный случай. Непересечение уровней. Обменная энергия. **(4 часа)**

6. Квазиклассическое приближение. Критерий применимости. Правила сшивки. Правило квантования Бора-Зоммерфельда. Нормировка квазиклассической волновой функции. Плотность состояний в фазовом пространстве. Двойная яма, задача с начальными условиями. Применение квантования Бора-Зоммерфельда для трёхмерного случая. α -распад. **(4 часа)**

7. Приближение Томаса-Ферми. Вариационный метод. Атом гелия. Уравнение Хартри-Фока. **(3 часа)**

8. Рассеяние быстрого электрона в кулоновском поле, гамильтониан Брейта, тонкая структура уровней. **(4 часа)**

9. Таблица Менделеева. LS- и JJ- связь. Правила Хунда. **(2 часа)**

10. Сверхтонкая структура. Изотопический сдвиг. Атом в постоянном внешнем поле. Эффекты Зеемана, Пашена-Бака и Штарка. **(4 часа)**

11. Нестационарная теория возмущений. Адиабатическое и внезапное возмущения. Периодическое возмущение. Золотое правило Ферми. Фотоэффект. (4 часа)
12. Квантование электромагнитного поля. Спонтанное и индуцированное излучение. Лэмб-сдвиг. Естественная ширина спектральных линий. (4 часа)
13. Рассеяние света. Рэлеевское, томсоновское и резонансное рассеяние. (3 часа)

Программа практических занятий (48 часов)

Номера задач и параграфов соответствуют обозначениям следующего списка литературы:

- [1] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., *Квантовая механика*, М.: Наука, 1989.
- [2] Флюгге З., *Задачи по квантовой механике т.1,2*, Москва: Мир, 1974.
- [3] Сербо В.Г., Хриплович И.Б., *Квантовая механика*, Новосибирск.: Редакционно-издательский центр НГУ, 2005.
- [4] Галицкий В.М., Карнаков Б.М., Коган В.И. *Задачи по квантовой механике*, М.: Наука, 1992.
- [5] Гольдман И.И., Кривченков В.Д., *Сборник задач по квантовой механике*, М.: ГИТТЛ, 1957.

Занятие 1. Релятивистские уравнения. Уравнение Клейна-Гордона. (2 часа)

[4]: 15.1, 15.5, 15.13, 15.15;

Занятие 2. Релятивистские уравнения. Уравнение Дирака. (2 часа)

[2]: 189-194, 199; [3]: 30.1-30.3; [4]: 15.20, 15.21, 15.27;

Занятие 3. Релятивистские уравнения. Уравнение Дирака. (2 часа)

[2]: 201,202; [4]: 15.29, 15.31, 15.32;

Занятие 4. Теория рассеяния. Борновское приближение. (2 часа)

[1]: 126.1-6; [2]: 184, 211; [3]: 20.5; [4]: 13.1, 13.2, 13.4, 13.10, 13.12, 13.14,13.17; [5]: 9.8;

Занятие 5. Теория рассеяния. (2 часа)

Фазовая теория рассеяния: [4]: 13.19, 13.21, 13.23, 13.26; [5]: 9.3, 9.6, 9.7, 9.18;

Рассеяние при больших энергиях: [1]: 131.1-3; [4]: 13.51, 13.52, 13.53, 13.54; [5] 9.9, 9.15;

Рассеяние медленных частиц: [1]: 132.1-6; [4]: 13.27, 13.31, 13.36, 13.45, 13.46; [5]: 9.2, 9.13;

Занятие 6. Теория рассеяния. (2 часа)

Резонансное рассеяние: [1]: 133.1-4;

Упругое рассеяние: [1]: 139.1, 143.1; [5]: 9.11, 9.12;

Занятие 7. Теория рассеяния. (2 часа)

Неупругое рассеяние: [1]: 148.1-4, 151.1-3; [2]: 166; [3]: 21.4; [4]: 13.77, 13.79, 13.82, 13.90;

Рассеяние релятивистской частицы: [4]: 15.19, 15.35, 15.37;

Рассеяние частиц со спином: [2]: 147; [4]: 13.59, 13.61;

Занятие 8. Тождественность частиц. (2 часа)

[1]: 62.1-3, 63.1-2; [2]: 152-3; [4]: 10.6, 10.8, 10.9;

Рассеяние тождественных частиц: [1]: 137.1; [2]: 164, 165;

Занятие 9. Стационарная теория возмущений. (2 часа)

[1]: 38.1-4; [3]: 17.1; [4]: 8.1, 8.2, 8.4, 8.7, 8.10;

Занятие 10. Стационарная теория возмущений. (2 часа)

[1]: 39.1-3; [4]: 8.15, 8.16, 8.18, 8.20, 8.30, 8.31;

Теория возмущений при наличии вырождения: [3]: 18.1, 18.2, 18.4;

Занятие 11. Квазиклассическое приближение. Квантование спектра. (2 часа)

[1]: 49.1-3, 50.1; [4]: 9.1, 9.2, 9.4, 9.5, 9.7, 9.8, 9.10, 9.12, 9.13; [5]: 1.18, 1.19, 1.21;

Занятие 12. Квазиклассическое приближение. Прохождение через барьер. (2 часа)

[1]: 51.1-3; [4]: 9.23-25, 9.27, 9.28, 9.30; [5]: 2.1, 2.2, 2.4, 2.7, 2.9, 2.11, 5.14;

Занятие 13. Квазиклассическое приближение. Рассеяние. (2 часа)

Рассеяние: [1]: 127.1-3; [4]: 13.33;

Квазиклассические матричные элементы и вероятности перехода: [1]: 52.1-2, 52.1-2; [3]: 12.1-12.5; [4]: 9.16, 9.18, 9.20, 9.22;

Модель альфа-распада: [3]: 13.1-2;

Занятие 14. Приближение Томаса-Ферми. (2 часа)

[1]: 71.1; [2]: 172-6; [3]: 38.1-2; [4]: 11.13–11.14, 11.29–31, 11.33; [5]: 7.19, 7.20, 7.21, 7.23, 7.25;

Занятие 15. Вариационный метод. Атом гелия. (2 часа)

[1]: 69.1-2; [2]: 155-6 (Атом гелия); 177 (Вариационный принцип для модели Томаса-Ферми);

[3] 37.1-2; [4]: 8.21, 8.22, 8.25, 8.27; [5]: 7.2, атом гелия: 7.13, 7.14, 7.15;

Занятие 16. Тонкая структура атомных уровней. (4 часа)

[1]: 75.1-3; [2]: 136, 203, 205; [3]: 34.1-3; [5]: 7.10, 7.11;

Эффект Штарка: [3] параграф 31. Рождение пар, [3]: 35.1; [5]: 7.57, 7.59;

Атом в электрическом поле, поляризуемость: [1]: 76.1-5, 77.1-2;

Эффект Зеемана: [3]: 42.1; [5] 7.54, 7.55;

Эффект Пашена-Бака: [1]: 113.1; [5] 7.53;

Занятие 17. Атомы и молекулы. Правила Хунда. (2 часа)

Правила Хунда: [1]: 67.1, 68.1; [3]: 41.1, 41.3, 41.4; [4]: 11.12, 11.20;

Сверхтонкая структура: [4]: 7.28; [3]: 43.1, 43.3, 43.4; [5]: 7.29, 7.30, 7.31, 7.34, 7.36, 7.37;

Структура молекул: [2]: 149; [3]: 51.1; [5]: 8;

Силы Ван-дер-Ваальса: [2]: 161;

Занятие 18. Нестационарная теория возмущений. (2 часа)

[1]: 40.1, 41.1-5; [2]: 180, 181; [4]: 8.33, 8.34, 8.36, 8.41, 8.54;

Занятие 19. Нестационарная теория возмущений. (2 часа)

Внезапные возбуждения: [4]: 8.47, 8.49, 8.50, 8.52;

Адиабатические приближения: [4]: 8.54, 8.57, 8.59, 8.61;

Золотое правило: [2]: 183;

Занятие 20. Нестационарная теория возмущений. (2 часа)

Периодические возмущения: [1]: 77.3; [2]: 182;

Потенциальная энергия как возмущение: [1]: 45.1-2;

Занятие 21. Квантовая теория излучений. (2 часа)

[2]: 210, 212, 213; [4]: 14.1, 14.2, 14.6, 14.8, 14.11;

Возбуждение атома пролетающим ионом: [2]: 185; [3] параграф 45.3;

Занятие 22. Фотоэффект, спонтанное и вынужденное излучение. Правила отбора. (4 часа)

[3]: параграф 46; 46.1-2; [4]: 13.93, 14.12, 14.13, 14.16, 14.18 (фотоэффект), 14.19, 14.20, 14.21

(тормозное излучение); [2] 186 (фотоэффект), 218 (эффект Комптона);

Правила отбора: [2]: 216; [3]: 48.2-48.8.

Самостоятельная работа студентов (62 часа)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям, выполнение текущих и семестровых домашних заданий	44
Подготовка к экзамену	18

Материал лекционного курса соответствует современным представлениям в области квантовой теории. Важнейшим элементом образовательной технологии является самостоятельное решение студентами и индивидуальная сдача семестровых домашних заданий. Для получения оценки «отлично» на экзамене необходимо сдать в течение семестра все семестровые домашние задания. В процессе сдачи семестровых домашних заданий студент рассказывает свое решение преподавателю и отвечает на дополнительные вопросы. Таким образом, триада: лекции + практические занятия + задания (семестровые и текущие)

способствует активному усвоению материала и позволяет студентам не столько вызубрить теорию, сколько научиться применять ее для решения задач.

5. Перечень учебной литературы.

Вся перечисленная ниже литература доступна либо в бумажном виде в библиотеке НГУ, либо в электронном виде в сети Интернет (см., например, ресурс bookZZ), либо на сайте кафедры теоретической физики ФФ НГУ (<http://wwold.inp.nsk.su/students/theor/index.ru.html>).

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. — Изд. 4-е, испр. — Москва: Наука, 1989. — 767 с.: ил. — (Теоретическая физика, т. III).
2. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Квантовая электродинамика. — 3-е изд., испр. — Москва: Наука, 1989. — 723 с.: ил. — (Теоретическая физика, т. IV).
3. Зелевинский В.Г. Квантовая физика: [учебное пособие для студентов физических и физико-технических вузов: в 3 т.: пер. с англ.]. — Новосибирск: Редакционно-издательский центр НГУ, 2014-2015.
4. Сербо В.Г., Хриплович И.Б. Квантовая механика: учебное пособие. — 2-е изд., испр. — Новосибирск: Редакционно-издательский центр НГУ, 2010. — 273 с.: ил.
5. Галицкий В.М., Карнаков Б.М., Коган В.И. Задачи по квантовой механике. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука 1992. — 879 с.: ил.
6. Борн М. Атомная физика. — 3-е изд. — М.: Мир, 1970. — 484 с.
7. Бете Г.А. Квантовая механика. — М.: Мир, 1965. — 333 с.
8. Гольдман И.И., Кривченков В.Д. Сборник задач по квантовой механике. — М.: УНЦ ДО, 2001. — 275 с.: ил. — Репринт. воспроизведение изд. 1957 г.
9. Флюгге З. Задачи по квантовой механике [в 2 томах]. — М.: Мир, 1974.
10. Мессиа А. Квантовая механика, том 1. — Москва: Наука, 1978. — 478 с.: ил.
11. Базь А.И., Зельдович Я.Б., Переломов А.М. Рассеяние, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике. — Изд. 2-е, испр. и доп. — Москва: Наука, 1971. — 544 с.

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

6.1. Видео-лекции по курсу квантовой теории:

1. Лекции проф. В.Ф. Дмитриева, НГУ, 2012 г.:
<https://www.youtube.com/playlist?list=PLE61A955CA34AD967>
2. Лекции ак. Герштейна С.С., лекторий МФТИ, 2013 г.:
<https://lectoriy.mipt.ru/course/TheoreticalPhysics-QuantumMechanics-13L>

6.2. Дополнительное информационное обеспечение:

1. Материалы (скан. конспекта практических занятий) по курсу Квантовая теория-2 на сайте <https://et.nsu.ru/>
2. Видеосеминары (Резниченко А.В.) по курсу Квантовая теория-2 (2020 год):

Видеосеминар № 1: <https://youtu.be/6BenxsTtjVc>
Квазиклассическое и эйкональное рассеяние. Рассеяние тождественных частиц.

Видеосеминар № 2: <https://youtu.be/jNMniKbJ2Gg>
Квазиклассическое приближение (продолжение). Вариационный принцип.

Видеосеминар № 3: <https://youtu.be/LTsHVy-DHGY>
Вариационный метод.

Видеосеминар № 4: <https://youtu.be/MpzKxMnjAEc>
Модель атома Томаса-Ферми.

Видеосеминар № 5: <https://youtu.be/FXSHXaRCUeg>
Тонкая структура (часть 1).

Видеосеминар № 6: <https://youtu.be/TMgBBpGNKkY>
Тонкая структура (часть 2).

Видеосеминар № 7: <https://youtu.be/5tWegfuv15g>
Многоэлектронные атомы.

Видеосеминар № 8: <https://youtu.be/1GSbm3X1qaM>
Сверхтонкое расщепление. Изотопический сдвиг.

Видеосеминар № 9: <https://youtu.be/PRmkhry0Gn4>
Эффект Штарка.

Видеосеминар № 10: <https://youtu.be/prunYX5DHwI>
Атом в магнитном поле. Эффект Зеемана.

Видеосеминар № 11: https://youtu.be/ir_1CIA_6CQ
Нестационарная теория возмущений (часть 1).

Видеосеминар № 12: <https://youtu.be/7kt8EuElZvc>
Нестационарная теория возмущений. Золотое правило Ферми.

Видеосеминар № 13: <https://youtu.be/54YgNfqQ9Z8>
Нестационарная теория возмущений. Квантование электромагнитного поля.

Видеосеминар № 14: <https://youtu.be/nf7TVpnp8JI>
Излучение света. E1 переходы.

Видеосеминар № 15: <https://youtu.be/i9CpkHP-uR0>
Излучение света. E2 и M1 переходы.

Видеосеминар № 16: <https://youtu.be/HmBpLPUG8XE>
Рассеяние света (часть 1).

Видеосеминар № 17: <https://youtu.be/HSWvR8FN5uE>
Рассеяние света (часть 2). Радиационный захват.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- сайт кафедры теоретической физики (<http://wwwold.inp.nsk.su/students/theor/index.ru.html>);
- система Mathematica (в бесплатном online-варианте <https://www.wolframalpha.com/>).

7.1. Современные профессиональные базы данных

Не используются.

7.2. Информационные справочные системы

Не используются.

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

В качестве рекомендуемой среды для самостоятельной работы (в т.ч. проверки семестровых домашних заданий) студентом предлагается освоить на базовом уровне систему Mathematica (в бесплатном online-варианте <https://www.wolframalpha.com/>).

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.

Для реализации дисциплины «Квантовая теория 2» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Реализация дисциплины (или ее части) в случае необходимости может осуществляться с применением электронного обучения (на платформе Google Meet, Zoom или аналогах), где обучение проводится на виртуальных аналогах, позволяющим достигать запланированных результатов по дисциплине.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

10.1. Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Текущий контроль

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем проверки домашних заданий, семестровых заданий, а также регулярных опросов в ходе практических занятий.

Текущий контроль успеваемости студента предусматривает несколько видов контроля, результаты которых в дальнейшем учитываются также при промежуточной аттестации:

- сдача домашних заданий по материалам практических занятий.
- сдача 8 задач семестрового домашнего задания, оформленных в соответствии с требованиями и в установленные преподавателем сроки (со 2 по 16 недели семестра); качество решения и выполнение требований по срокам сдачи задач учитываются при промежуточной аттестации. Срок сдачи заданий для студента может быть скорректирован по согласованию с преподавателем при наличии уважительной причины (болезнь и т.п.).

Промежуточная аттестация.

Для контроля усвоения дисциплины учебным планом предусмотрен экзамен в конце семестра. Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

Освоение компетенции оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ОПК-1 сформирована не ниже порогового уровня.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию в форме контрольной работы и собеседования по результатам контрольной работы. Вывод об уровне сформированности компетенции ОПК-1 принимается лектором курса при учете мнения преподавателя практических занятий.

Положительная оценка ставится, когда по результатам итоговой контрольной и собеседования студент продемонстрировал, что компетенция ОПК-3 освоена не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации. Оценка «отлично» может быть поставлена только при выполнении студентом семестрового домашнего задания в полном объеме.

Пересдача экзамена осуществляется по билетам в устной форме. Вторая пересдача принимается комиссией из трех человек. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда компетенция ОПК-1 освоена не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
------------------	---	---------------------------

<p>ОПК-1.1. Применяет математический аппарат, теоретические и методологические основы математических дисциплин для решения профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p>	<p>Знать: основные релятивистские уравнения квантовой механики; фазовую теорию рассеяния; понятие тождественных частиц; стационарную и нестационарную теорию возмущений; квазиклассическое приближение; тонкую и сверхтонкую структуру атомных уровней; квантовые основы таблицы Менделеева; квантовомеханические эффекты во внешних полях (эффект Зеемана, Пашена-Бака, Штарка и проч.); приближенные методы квантовой механики (приближение Томаса-Ферми, вариационный метод, подход Хартри-Фока); квантование электромагнитного поля и разные виды рассеяния света (рэлеевское, томсоновское).</p>	<p>Выполнение семестровых заданий. Экзамен.</p>
<p>ОПК -1.2. Использует теоретические основы базовых разделов математических и естественнонаучных дисциплин при решении профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p>	<p>Уметь: решать простейшие задачи с релятивистскими уравнениями; использовать борновское приближение и простейшие элементы фазовой теории в задачах рассеяния; делать оценки для различных величин (в частности, коэффициентов прохождения) на основе квазиклассического приближения; рассчитывать тонкую структуру атомных уровней на основе гамильтониана Брейта; пользоваться правилами Хунда; использовать стационарную и нестационарную теорию возмущений в задачах с малыми возмущениями; проводить квантование свободного электромагнитного поля и уметь решать простейшие задачи с квантованным электромагнитным полем (фотоэффект, расчет ширин спектральных линий).</p> <p>Владеть: техникой расчета квантовомеханических задач рассеяния (включая рассеяние тождественных частиц); математическими приемами при решении релятивистских квантовых уравнений; понятиями об устройстве тонкой и сверхтонкой структуры атомных уровней; приближенными методами квантовой механики (теория возмущений, вариационный метод, многочастичные приближенные методы).</p>	<p>Выполнение семестровых заданий. Экзамен.</p>

Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Квантовая теория 2».

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (2 балла)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ОПК-1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ОПК-1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ОПК-1.2	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

10.3. Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Семестровое домашнее задание

Задание 1

1. Используя борновское приближение, найти дифференциальное сечение рассеяния релятивистского поляризованного электрона в кулоновском поле и зависимость спина рассеянного электрона от угла рассеяния.

2. Частица находится в осцилляторном потенциале со слабой нелинейностью:

$$H = H_0 + V(x), \quad H_0 = \frac{p^2}{2m} + \frac{m\omega^2 x^2}{2}, \quad V(x) = \alpha x^3, \quad \alpha \ll m \omega^2 \sqrt{\frac{m\omega}{\hbar}}.$$

Найти среднее значение координаты $\langle \psi_n | x | \psi_n \rangle$ в зависимости от номера n возбужденного уровня. Здесь $\psi_n = \psi_n^{(0)} + \psi_n^{(1)}$ – волновая функция с учетом первой поправки по возмущению $V(x)$.

3. Используя квазиклассическое приближение, найти число состояний дискретного спектра в потенциале $U(r) = -\alpha/r + \alpha/b$ при $r < b$ и $U(r) = 0$ при $r > b$.

4. Водородоподобный ион, состоящий из ядра с зарядом $-Ze$ и частицы с зарядом e , массой m и нулевым спином, находится в основном состоянии. Ион поместили в постоянное магнитное поле \mathbf{B} , направленное вдоль оси z . Используя теорию возмущений, найти сдвиг энергии, связанный с магнитным полем, при калибровке $A_y = Bx$.

Указание: При суммировании ряда теории возмущений воспользоваться соотношением (которое надо доказать)

$$xp_y = \frac{im}{2\hbar} [H, xy] + \frac{\hbar}{2} l_z,$$

где H – гамильтониан системы при нулевом магнитном поле, l_z – оператор проекции орбитального момента на ось z .

Задание 2

5. Атом состоит из частицы π^+ (пион, спин $s_1=0$) с массой $m_1=140 \text{ МэВ}/c^2$ и частицы μ^- (мюон, спин $s_2=1/2$) с массой $m_2=106 \text{ МэВ}/c^2$. Частицы взаимодействуют по закону Кулона, $U(r) = -e^2/r$. Найти магнитный момент атома, если он находится в состоянии $p_{1/2}, p_{3/2}$.

Указание: выразить оператор магнитного момента через оператор полного орбитального момента $\mathbf{L} = \mathbf{l}_1 + \mathbf{l}_2$ и оператор полного спина $\mathbf{S} = \mathbf{s}_2$, и усреднить его по соответствующей волновой функции, используя векторную теорему.

6. Две частицы со спинами $1/2$ и одинаковыми массами $m_{1,2}=m$ взаимодействуют по закону

$$V = g \mathbf{S}_1 \mathbf{S}_2 \delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2).$$

Частицы находятся в осцилляторном потенциале $U = m \omega^2 r^2 / 2$. Найти энергию основного и первого возбужденного состояния с учетом первой поправки по константе g ,

$$|g| \ll \hbar \omega \left(\frac{\hbar}{m\omega} \right)^{3/2}.$$

Рассмотреть случаи различных и тождественных частиц.

7. Система состоит из Z «электронов», взаимодействие между которыми описывается потенциальной энергией

$$U_{ee}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) = g / |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|^s,$$

где $g > 0$ и $s < 2$ – некоторые константы. «Электроны» находятся в поле «ядра», потенциальная энергия притяжения «электрона» к «ядру» равна $V(r) = -Zg / r^s$. Считая, что $Z \gg 1$, вывести в квазиклассическом приближении интегральное уравнение для плотности «электронов» $n(r)$ (аналог дифференциального уравнения Томаса-Ферми). Найти зависимость от Z среднего расстояния, на котором находятся «электроны», и среднего импульса «электронов». Масса «электрона» равна m .

8. Частица с массой m находится в связанном состоянии в потенциале $V(x) = -g\delta(x)$.

а) К системе прикладывают зависящее от времени t возмущение

$$U(x,t) = -Fx e^{-|t|/\tau}.$$

Здесь τ, F, g – некоторые константы. Найти в первом порядке теории возмущений по U вероятность перехода в состояние непрерывного спектра с энергией E .

б) К системе прикладывают периодическое возмущение

$$U(x,t) = -Fxcos(\omega t).$$

Найти в первом порядке теории возмущений по U вероятность в единицу времени перехода в состояние непрерывного спектра.

ПРИМЕР ПИСЬМЕННОЙ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО КУРСУ КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ-2

1. Найти в борновском приближении дифференциальное сечение рассеяния $d\sigma/d\Omega$ релятивистского электрона с импульсом p на потенциале $U(r) = a^2 V_0 / (r^2 + a^2)$.

2. Две тождественные частицы со спином $3/2$ и массой m находятся во внешнем потенциале $U(r) = m\omega^2 r^2 / 2$. Потенциал взаимодействия частиц равен

$$V(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) = g \frac{(\mathbf{s}_1 \cdot \mathbf{s}_2)}{|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2|},$$

где $\mathbf{s}_{1,2}$ - операторы спина. Рассматривая потенциал $V(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)$ как возмущение, найти энергию основного состояния системы с учётом линейной по g поправки.

3. Электрон находится в потенциале $U(r) = -m_e \omega^2 (R^2 - r^2) / 2$ при $r \leq R$ и $U(r) = 0$ при $r > R$. Считая, что яма глубокая (какой критерий?), оценить количество состояний в яме.

4. Частица с массой m находится в потенциале $U(r) = m\omega^2 r^2 / 2 + \gamma / r^2$. Используя вариационную функцию

$$\psi(r) = \frac{1}{(\sqrt{\pi} a)^{3/2}} \exp(-r^2 / 2a^2),$$

где a - вариационный параметр, найти энергию основного состояния. Сравнить полученный результат с результатом, полученным в первом порядке теории возмущений по γ .

5. В нейтральном атоме Z электронов, $Z \gg 1$. Оценить в модели Томаса-Ферми среднее значение (а) орбитального момента l и (б) радиального квантового числа n_r .

6. Частица с массой m и зарядом e может свободно двигаться по сфере

радиуса a . Гамильтониан, описывающий движение, равен (объясните)

$$H = \frac{\hbar^2 \mathbf{l}^2}{2ma^2},$$

где \mathbf{l} - оператор орбитального момента. Найти в дипольном приближении сечение упругого рассеяния света на частице, находящейся в основном состоянии.

Примеры экзаменационных билетов

1. Стационарная теория возмущений. Производная энергии по параметру.
2. Оценить ширину уровней линейного гармонического осциллятора, $U(x) = m \omega^2 x^2 / 2$, возникающую от малой ангармоничности $\delta U(x) = -\gamma x^3$, $\gamma \ll m \omega^2 \sqrt{\frac{m \omega}{\hbar}}$.

1. Поляризуемость атома водорода. Силы Ван-дер-Ваальса.
2. Электрон находится в основном состоянии в водородоподобном атоме с зарядом ядра $Z|e|$. В результате бета распада заряд становится равным $(Z+1)|e|$. Считая распад мгновенным, найти вероятность того, что электрон останется в основном состоянии атома.

1. Правило квантования Бора-Зоммерфельда.
2. Частица находится в поле

$$U(r) = -\frac{e^2}{r} e^{-r^2/b^2}$$

Считая, что $b \gg a_B$, найти энергию основного состояния с учетом первой ненулевой поправки по $\frac{a_B}{b}$.

1. Квазиклассическое приближение. Критерий применимости. Условие квантования Бора-Зоммерфельда.
2. Два атома дейтерия образуют молекулу D_2 в состоянии с полным ядерным спином $S=1$. Какой возможен орбитальный момент L относительного движения ядер?

1. Квазиклассическое приближение. Критерий применимости. Коэффициент прохождения под барьером.
2. Используя правило квантования Бора-Зоммерфельда, найти число связанных состояний в потенциале $U(x)=0$ при $|x|>a$, $U(x) = -V(1-|x|/a)$ при $|x|<a$.

1. Коэффициент подбарьерного прохождения в квазиклассическом приближении.
2. Ортопозитроний ($S=1$) находится в состоянии с $L=1$, $J=1$ и $J_z=1$. Найти магнитный момент атома.

1. Уравнение Клейна-Гордона, ток и калибровочная инвариантность.
2. Вычислить поляризуемость линейного изотропного трехмерного осциллятора, находящегося в основном состоянии.

1. Уравнение Дирака, гамильтонова форма уравнения Дирака, S , P , T -преобразования.

2. Используя теорему о производной энергии по параметру, найти среднее значение оператора $1/r^2$ для трехмерного гармонического осциллятора в состоянии с орбитальным моментом l .

1. Волновые функции систем тождественных бозонов и фермионов. Принцип Паули.

2. Найти в квазиклассическом приближении коэффициент подбарьерного прохождения в потенциале $U(x)=U_0 (1-x^2/a^2) \theta(a-|x|)$.

1. Приближение Томаса-Ферми.

2. Оценить ширину уровней линейного гармонического осциллятора, $U(x)=m \omega^2 x^2/2$, возникающую от малой аангармоничности $\delta U(x)=-\gamma x^3$, $\gamma \ll m\omega^2 \sqrt{\frac{m\omega}{\hbar}}$.

1. Сверхтонкая структура. Изотопический сдвиг.

2. Найти вероятность перехода электрона из основного состояния атома водорода в состояние $2p$ под действием электрического поля $\mathbf{E}=\mathbf{E}_0 \exp(-|t|/\tau)$.

1. Вариационный метод. Уравнение Хартри-Фока.

2. Найти вероятность перехода электрона из основного состояния атома водорода в состояние $2p$ под действием электрического поля $\mathbf{E}=\mathbf{E}_0 \exp(-|t|/\tau)$.

1. Тонкая структура уровней.

2. Электрон находится в основном состоянии атома водорода. Найти магнитное поле, создаваемое электроном в ядре (в точке $\mathbf{r}=0$).

1. LS- и JJ-связь. Правила Хунда.

2. Электрон в атоме водорода находится в состоянии $3d_{3/2}$ с $J_z=3/2$. Найти среднее значение L_z .

1. Эффект Зеемана.

2. Используя теорему о производной энергии по параметру, найти среднее значение оператора $1/r^2$ для частицы, находящейся в потенциале $V(r)=-\alpha/r+\beta/r^2$ в состоянии с орбитальным моментом l .

1. Эффект Штарка.

2. Вычислить поляризуемость линейного изотропного трехмерного осциллятора, находящегося в основном состоянии.

1. Лэмб-сдвиг.

2. Частица находится в поле

$$U(r) = -\frac{e^2}{r} e^{-r^2/b^2}$$

Считая, что $b \gg a_B$, найти энергию основного состояния с учетом первой ненулевой поправки по $\frac{a_B}{b}$.

1. Нестационарная теория возмущений. Случай, когда возмущение исчезает при $t = \pm\infty$.

2. Два атома дейтерия образуют молекулу D_2 в состоянии с полным ядерным спином $S=1$. Какой возможен орбитальный момент L относительного движения ядер?

1. Стационарная теория возмущений. Силы Ван-дер-Ваальса.

2. Найти вероятность в единицу времени перехода электрона из основного состояния атома водорода в состояние $2p$ под действием электрического поля $\mathbf{E}=\mathbf{E}_0 \cos(\omega t)$.

1. Нестационарная теория возмущений, случай адиабатического возмущения.
2. Электрон находится в основном состоянии в водородоподобном атоме с зарядом ядра $Z|e|$. В результате альфа распада заряд становится равным $(Z-2)|e|$. Считая распад мгновенным, найти вероятность того, что электрон останется в основном состоянии атома.

1. Нестационарная теория возмущений, случай внезапного возмущения.
2. Электрон находится в основном состоянии атома водорода. Найти магнитное поле, создаваемое электроном в ядре (в точке $r=0$).

1. Нестационарная теория возмущений, периодическое возмущение.
2. Две тождественные частицы со спином $s=1$ взаимодействуют по закону

$$V = g \mathbf{s}_1 \mathbf{s}_2 (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2, \quad g > 0.$$

Частицы находятся в потенциале $U = m \omega^2 r^2 / 2$. Найти энергию основного и первого возбужденного состояния с учетом первой поправки по константе g , если $|g| \ll m \omega^2$.

1. Стационарная теория возмущений. Вырожденный случай.
2. При $t=0$ спины двух нейтронов были направлены по оси x и y , соответственно. Внезапно включают магнитное поле, направленное вдоль оси z . Найти вероятность в момент $t > 0$ иметь полный спин $S=1$. Взаимодействие нейтронов не учитывать.

1. Фотоэффект.
2. Найти расщепление второго возбужденного уровня энергии двумерного осциллятора, $\hat{H}_0 = (\hat{p}_1^2 + \hat{p}_2^2) / 2m + m\omega^2 (x_1^2 + x_2^2) / 2$, под действием возмущения $\hat{V} = ax_1 x_2$.

1. Колебательные и вращательные возбуждения молекул.
2. На заряженный линейный осциллятор, находящийся при $t \rightarrow -\infty$ в n -м стационарном состоянии, накладывается электрическое поле $E(t) = E_0 / (1 + t^2 / \tau^2)$, направленное вдоль оси колебаний. Найти в первом порядке теории возмущений вероятности переходов осциллятора в другие его состояния при $t \rightarrow +\infty$.

1. Квантование свободного электромагнитного поля.
2. Определить квантовые числа $^{2S+1}L_J$ основных термов для электронных конфигураций $(np)^4$ и $(nd)^4$.

1. Спонтанное и индуцированное излучение.
2. Определить квантовые числа $^{2S+1}L_J$ основного терма атома, имеющего незаполненную оболочку с электронной конфигурацией $(nl)^{2l}$.

1. Рассеяние света. Рэлеевское и томсоновское рассеяние.
2. Найти расщепление первого возбужденного уровня энергии двумерного осциллятора, $\hat{H}_0 = (\hat{p}_1^2 + \hat{p}_2^2) / 2m + m\omega^2 (x_1^2 + x_2^2) / 2$, под действием возмущения $\hat{V} = ax_1 x_2$. Указать правильные волновые функции нулевого приближения.

1. Постановка задачи рассеяния. Борновское приближение. Критерий применимости.
2. Оценить время жизни $2p_{3/2}$ относительно однофотонного перехода на уровень $2p_{1/2}$ в атоме водорода.

1. Постановка задачи рассеяния. Рассеяние в кулоновском поле. Атомный формфактор.
2. Выяснить, сохраняется ли оператор $\Sigma (\mathbf{p} - \frac{e}{c}\mathbf{A})$ для релятивистского электрона во внешнем магнитном поле.

1. Фазовая теория рассеяния. Рассеяние медленных частиц.
2. Проверить релятивистскую инвариантность уравнения Клейна-Гордона.

1. Фазовая теория рассеяния. Рассеяние быстрых частиц, дифракционное рассеяние.
2. Вычислить дифференциальное и полное сечение упругого рассеяния в поле $U(r) = \frac{g}{r} e^{r/a}$.

1. Постановка задачи рассеяния. Резонансное рассеяние, формула Брейта-Вигнера.
2. Вычислить в борновском приближении дифференциальное сечение рассеяния нерелятивистских частиц на прямоугольном потенциале $U(r)=U_0 \theta(R-r)$.

1. Фазовая теория рассеяния. Резонансное рассеяние, формула Брейта-Вигнера.
2. Найти дифференциальное сечение рассеяния в поле $U(r)=G \delta(r-a)$ в борновском приближении. Указать критерий справедливости расчета.

1. Вариационный метод. Атом гелия. Уравнение Хартри-Фока.
2. Вычислить нормировочный множитель у дираковского спинора свободного электрона $u_{p,\lambda}$ из условия нормировки $\bar{u}_{p,\lambda} u_{p,\lambda} = 1$.

1. Уравнение Дирака. Парадокс Клейна.
2. Найти фазы рассеяния частицы в поле $U(r) = \frac{g}{r^2}$.

1. Уравнение Дирака. С, Р, Т-преобразования. Спиральность.
2. Найти фазу, амплитуду и полное сечение рассеяния медленных частиц в поле $U(r)=\{\infty, r \leq R; 0, r > R\}$.

1. Рассеяние быстрого электрона в кулоновском поле. Гамильтониан Брейта.
2. Пусть распределение зарядов в ядре с зарядом $Z|e|$ задано формулой $\rho(r)=\rho_0 e^{-r/a}$. Вычислить формфактор, нормировочный множитель ρ_0 и среднеквадратичный радиус.

1. Тождественность частиц в квантовой механике. Принцип Паули. Рассеяние тождественных частиц.
2. Вычислить релятивистские поправки к кулоновским уровням энергии частицы со спином ноль. Оператор возмущения имеет вид $V = -\frac{p^4}{8m^3 c^2}$.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы
по дисциплине «Квантовая теория 2»
по направлению подготовки 03.03.02 Физика
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного