

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол № 1 от 16.01.2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Квантовая механика

Уровень высшего образования

Бакалавриат

Направление подготовки / специальность

03.03.03 - Радиофизика

Направленность образовательной программы

Радиофизика и электроника

Форма обучения

очная

г. Нижний Новгород

2024 год начала подготовки

1. Место дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина Б1.О.21 Квантовая механика относится к обязательной части образовательной программы.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями и индикаторами достижения компетенций)

Формируемые компетенции (код, содержание компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), в соответствии с индикатором достижения компетенции		Наименование оценочного средства	
	Индикатор достижения компетенции (код, содержание индикатора)	Результаты обучения по дисциплине	Для текущего контроля успеваемости	Для промежуточной аттестации
ОПК-1: Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности;	ОПК-1.1: Обладает фундаментальными знаниями в области физики и радиофизики ОПК-1.2: Анализирует физические аспекты теории и возможности ее использования для решения научно-исследовательских задач ОПК-1.3: Решает научно-исследовательские задачи, в том числе в сфере педагогической деятельности	ОПК-1.1: Знать методики получения базовых знаний в области квантовой механики. Уметь овладевать базовыми знаниями в области квантовой механики и использовать их в профессиональной деятельности. Владеть опытом получения базовых знаний в области квантовой механики и их использования в профессиональной деятельности. ОПК-1.2: Знать методики получения базовых знаний в области квантовой механики. Уметь овладевать базовыми знаниями в области квантовой механики и использовать их в профессиональной деятельности. Владеть опытом получения базовых знаний в области квантовой механики и их использования в профессиональной деятельности. ОПК-1.3: Знать методики получения базовых знаний в области квантовой механики.	Контрольная работа	Экзамен: Контрольные вопросы Задачи Зачёт: Контрольная работа

		<p>Уметь овладевать базовыми знаниями в области квантовой механики и использовать их в профессиональной деятельности.</p> <p>Владеть опытом получения базовых знаний в области квантовой механики и их использования в профессиональной деятельности.</p>		
<p>ОПК-2: Способен проводить экспериментальные и теоретические научные исследования объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;</p>	<p>ОПК-2.1: Использует методы радиофизических измерений и методы обработки результатов</p> <p>ОПК-2.2: Формулирует задачи экспериментального и теоретического исследования в области радиофизики, использует радиофизическое измерительное оборудование и применяет теоретические методы</p> <p>ОПК-2.3: Применяет практические навыки радиофизических исследований и представления результатов</p>	<p>ОПК-2.1:</p> <p>Уметь самостоятельно приобретать новые знания в области квантовой механики, используя современные образовательные и информационные технологии.</p> <p>Владеть опытом самостоятельного приобретения новых знаний в области квантовой механики с использованием современных образовательных и информационных технологий.</p> <p>ОПК-2.2:</p> <p>Уметь самостоятельно приобретать новые знания в области квантовой механики, используя современные образовательные и информационные технологии.</p> <p>Владеть опытом самостоятельного приобретения новых знаний в области квантовой механики с использованием современных образовательных и информационных технологий.</p> <p>ОПК-2.3:</p> <p>Уметь самостоятельно приобретать новые знания в области квантовой механики, используя современные образовательные и информационные технологии.</p> <p>Владеть опытом самостоятельного приобретения новых знаний в области квантовой механики с</p>	Задачи	<p>Экзамен:</p> <p>Контрольные вопросы</p> <p>Задачи</p> <p>Зачёт:</p> <p>Контрольная работа</p>

		использованием современных образовательных и информационных технологий.		
--	--	---	--	--

3. Структура и содержание дисциплины

3.1 Трудоемкость дисциплины

	очная
Общая трудоемкость, з.е.	6
Часов по учебному плану	216
в том числе	
аудиторные занятия (контактная работа):	
- занятия лекционного типа	80
- занятия семинарского типа (практические занятия / лабораторные работы)	32
- КСР	3
самостоятельная работа	65
Промежуточная аттестация	36 Экзамен, Зачёт

3.2. Содержание дисциплины

(структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий)

Наименование разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	в том числе			
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них			Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа (практические занятия/лабораторные работы), часы	Всего	
	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0	0 Ф 0
Тема 1. Введение в курс квантовой механики	13	4		4	9
Тема 2. Физические величины в классике и квантовой механике	8	4	2	6	2
Тема 3. Общая теория операторов физических величин	19	8	2	10	9
Тема 4. Измерение в квантовой механике	18	4	2	6	12
Тема 5. Уравнение Шредингера для свободной нерелятивистской частицы	10	4	2	6	4
Тема 6. Представление Гейзенберга	8	4		4	4
Тема 7. Запутанные и независимые состояния	6	4		4	2
Тема 8. Одномерное движение	8	4	2	6	2
Тема 9. Точно решаемые потенциалы	4	2		2	2
Тема 10. Гармонический осциллятор	8	4	2	6	2

Тема 11. Оператор орбитального момента	14	8	4	12	2
Тема 12. Движение в центральном поле	6	4		4	2
Тема 13. Кулоново поле	8	4	2	6	2
Тема 14. Теория возмущений	14	8	4	12	2
Тема 15. Квазиклассическое приближение	15	8	4	12	3
Тема 16. Спин	11	4	4	8	3
Тема 17. Движение электрона в магнитном поле	7	2	2	4	3
Аттестация	36				
КСР	3			3	
Итого	216	80	32	115	65

Содержание разделов и тем дисциплины

-

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает в себя подготовку к контрольным вопросам и заданиям для текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины приведенным в п. 5.

-

5. Фонд оценочных средств для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

5.1 Типовые задания, необходимые для оценки результатов обучения при проведении текущего контроля успеваемости с указанием критериев их оценивания:

5.1.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольная работа) для оценки сформированности компетенции ОПК-1:

- Докажите, что уравнение Шредингера сохраняет плотность вероятности.
- Докажите, что собственные функции УШ инфинитного движения дважды вырождены.
- Докажите, что собственные функции УШ свободного движения, соответствующие разным импульсам ортогональны.
- Докажите, что собственные функции дискретного спектра невырождены.
- Докажите, что собственные функции дискретного спектра УШ с четной ямой либо четны, либо нечетны.
- Найдите собственную функцию УШ с линейным потенциалом.

- Определите уровни энергии в симметричной прямоугольной яме конечной глубины.
- Выведите граничные условия и определите коэффициент отражения от дельта-потенциала.
- Напишите уравнение для собственных функций гармонического осциллятора и приведите его к безразмерному виду.
- Найдите собственную функцию основного состояния гармонического осциллятора. Отнормируйте её.
- Определите операторы рождения и уничтожения. Напишите гамильтониан гармонического осциллятора. Опишите их свойства.

$$a|0\rangle = 0$$

- Решая уравнение $a|0\rangle = 0$ в координатном представлении найдите собственную функцию основного состояния.
- Используя операторы a, a^+ вычислите матричные элементы операторов x^2, p^2 в базисе собственных функций гармонического осциллятора.
- Как преобразуются координаты при инфинитезимальном (бесконечно малом) вращении.
- Связь оператора момента и вращения. Определение оператора момента. Выведите коммутационные соотношения между компонентами момента Выведите коммутационные соотношения между проекциями момента и координатами Выведите коммутационные соотношения между проекциями момента и импульсами l_x, l_y, l_z представлении.
- Собственные функции момента в сферических координатах. Напишите уравнение и его решение методом разделения переменных. Выражение через присоединенные полиномы Лежандра.
- Четность состояния, оператор инверсии. Скаляры и псевдоскаляры, полярные и аксиальные векторы. Примеры.
- Преобразование инверсии в сферических координатах. Связь четности с орбитальным моментом.
- Сведите задачу двух тел к задаче движения одной частицы в центральном поле.
- Разделите переменные УШ для центрального поля и напишите общее решение.
- Напишите условие ортонормированности. Сколько квантовых чисел и каких образуют полный набор.
- Определите уровни энергии частицы с моментом $l=0$, движущейся в сферической прямоугольной яме конечной глубины. Определите минимальную глубину ямы, необходимую для существования связанного состояния.
- Определите уровни энергии и волновые функции сферического гармонического осциллятора путем разделения переменных в декартовых координатах. Каковы квантовые числа. Определите степень вырождения уровней.

- Напишите УШ для движения в кулоновом поле и приведите его к безразмерному виду. Атомная система единиц.
- Определите асимптотику радиальной функции движения в кулоновом поле вблизи центра.
- Какова степень вырождения уровней при движении в кулоновом поле.
- Выведите формулу для первой поправки к волновой функции, соответствующей невырожденной энергии
- Выведите формулу для первой и второй поправок к энергии.
- Используя теорию возмущений найдите первую поправку к частоте слабо ангармонического осциллятора из-за возмущения. Используйте операторы рождения и уничтожения
- Выведите формулу для поправки к энергии в случае m кратного вырождения этого уровня. Секулярное уравнение.
- Выведите формулу для поправки к энергии в случае 2 кратного вырождения этого уровня. Определите правильные волновые функции нулевого приближения.
- Получите нестационарное уравнение Шредингера в представлении собственных функций невозмущенного гамильтониана.
- Выведите формулу для первой поправки к волновой функции системы при произвольном нестационарном возмущении
- Выведите формулу для первой поправки к волновой функции системы при гармоническом нерезонансном возмущении.
- Выведите формулу для вероятности перехода при резонансном воздействии.
- Золотое правило Ферми.
- Выведите формулу главного члена квазиклассического асимптотического разложения.
- Напишите локальные условия применимости квазиклассического приближения.
- Напишите квазиклассическое решение для УШ, описывающее движение в однородном поле.
- Напишите квазиклассическое решение для УШ, описывающее движение в однородном поле слева и справа от точки поворота.
- Методом Цвана выведите граничные условия для перехода из полубесконечной классически запрещенной области в классически разрешенную. Каков набег фазы при отражении?
- В квазиклассическом приближении определите уровни энергии в потенциальной яме. Правило квантования Бора-Зоммерфельда.
- С помощью правила квантования Бора-Зоммерфельда определите уровни энергии гармонического осциллятора. Сравнить с точным решением.

- Методом Цвана выведите граничные условия для перехода из полубесконечной классически разрешенной области в классически запрещенную.
- Понятие спина. Спиновая переменная. Аналог поляризации электромагнитных волн. Опыт Штерна-Герлаха.
- Инфинитизимальное преобразование вращения и оператор спина. На какие переменные действует оператор спина.
- Напишите коммутационные соотношения для операторов спина
- Докажите, что оператор s^2 коммутирует с операторами проекций спина.
- Что такое s^2 , s_z представление.
- Напишите матрицы Паули.
- Напишите матрицу s^2 .
- Напишите собственные функции операторов s_x, s_y, s_z для $s=1/2$ в s^2, s_z представлении.
- Прямым вычислением докажите антикоммутируемость матриц Паули.
- Напишите матрицы конечных вращений U_x, U_y, U_z
- На прибор Штерна-Герлаха с собственной осью z падает пучок, поляризованный по x . Что на выходе?
- На прибор Штерна-Герлаха вдоль оси x падает пучок, поляризованный по z . Что на выходе, если ось прибора z' повернута относительно оси x на угол α ?
- Напишите УШ бесспиновой заряженной частицы в магнитном поле
- Напишите УШ заряженной частицы со спином $1/2$ в магнитном поле.
- Опишите связь спина и магнитного момента частицы. Что такое гиромагнитное отношение, магнетон Бора, ядерный магнетон. Чему равно гиромагнитное отношение электрона.
- Роль потенциалов в квантовой механике. Калибровочная инвариантность.
- Удлиненные производные.
- Напишите выражения для операторов компонент скоростей и получите коммутационные соотношения для них при конечном магнитном поле.
- Напишите уравнения движения электрона в однородном магнитном поле в калибровке Ландау.
- Приведите УШ электрона в магнитном поле к безразмерному виду. Магнитная длина.
- Выведите волновые функции и значения энергии электрона в магнитном поле.

- Какими квантовыми числами характеризуется состояние. Уровни Ландау.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольная работа)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой
отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо»
хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо»
удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.1.2 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ОПК-2:

- Дана волновая функция $\psi(x)$. Отнормируйте и нарисуйте график плотности вероятности

величины x

$$\psi(x) = \frac{1 + e^{i\pi/4}}{\sqrt{x^2 + a^2}}$$

- Покажите, что при переходе к классике возникает уравнение Гамильтона-Якоби.
- Дана волновая функция $\psi(x)$. Отнормируйте и нарисуйте график плотности вероятности величины x

$$\psi(x) = \cosh^{-1} \alpha(x - x_0)$$
- Покажите, что УШ сохраняет вероятность.
- Дана волновая функция $\psi(x)$. Отнормируйте и нарисуйте график плотности вероятности величины x , $\psi(x) = \theta(x + L/2) - \theta(x - L/2)$
- С помощью экспоненциальной регуляризации докажите соотношение

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp[ik(x - x')] \frac{dk}{2\pi} = \delta(x - x')$$
. Запишите его в обозначениях Дирака и дайте интерпретацию двум возможным вариантам записи (число или оператор).
- Докажите, что
$$\int_{-\infty}^{\infty} p |\psi(p)|^2 dp = \int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(x) \{-i\hbar \nabla\} \psi(x) dx$$
- Найдите $\psi(p)$ по данным $\psi(x)$. Найдите связь ширины в x и p представлениях

$$\psi(x) \sim \theta(x + L/2) - \theta(x - L/2)$$
- Найдите $\psi(p)$ по данным $\psi(x)$. Найдите связь ширины в x и p представлениях

$$\psi(x) \sim \exp\{-u|x|\}$$
- Разложите $\delta(x)$ по собственным функциям оператора импульса
- Докажите, что нормировка сохраняется при замене представления

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x)|^2 dx = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(p)|^2 dp$$
- Найдите $\psi(p)$ по данным $\psi(x)$. Найдите связь ширины в x и p представлениях

$$\psi(x) \sim \exp\left\{-\frac{(x - x')^2}{4b^2} + iux\right\}$$
- Запишите общее решение нестационарного уравнения Шредингера с помощью разложения по стационарным состояниям
- Докажите, что оператор кинетической энергии эрмитов.
- Запишите нестационарное уравнение Шредингера в энергетическом представлении. Найдите его общее решение. Как выглядит оператор \hat{H} в энергетическом представлении
- Найдите стационарные состояния в бесконечно глубокой яме. Найдите силу с которой частица действует на стенку.

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «

Оценка	Критерии оценивания
	очень хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо» ИЛИ Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине при промежуточной аттестации

Шкала оценивания сформированности компетенций

Уровень сформированности компетенций (индикатора достижения компетенций)	плохо	неудовлетворительно	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо	отлично	превосходно
	не зачтено			зачтено			
<u>Знания</u>	Отсутствие знаний теоретического материала. Невозможность оценить полноту знаний вследствие отказа обучающегося от ответа	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имели место грубые ошибки	Минимально допустимый уровень знаний. Допущено много негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько негрубых ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Допущено несколько несущественных ошибок	Уровень знаний в объеме, соответствующем программе подготовки. Ошибок нет.	Уровень знаний в объеме, превышающем программу подготовки.
<u>Умения</u>	Отсутствие минимальных умений. Невозможность оценить наличие умений вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы основные умения. Имели место грубые ошибки	Продemonстрированы основные умения. Решены типовые задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания, но не в полном объеме	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с негрубыми ошибками. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания в полном объеме, но некоторые с недочетами.	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи с отдельными несущественными недочетами, выполнены все задания в полном	Продemonстрированы все основные умения. Решены все основные задачи. Выполнены все задания, в полном объеме без недочетов

						объеме	
<u>Навыки</u>	Отсутствие базовых навыков. Невозможность оценить наличие навыков вследствие отказа обучающегося от ответа	При решении стандартных задач не продемонстрированы базовые навыки. Имели место грубые ошибки	Имеется минимальный набор навыков для решения стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач с некоторым и недочетами	Продемонстрированы базовые навыки при решении стандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрированы навыки при решении нестандартных задач без ошибок и недочетов	Продемонстрирован творческий подход к решению нестандартных задач

Шкала оценивания при промежуточной аттестации

Оценка		Уровень подготовки
зачтено	превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне выше предусмотренного программой
	отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично».
	очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо»
	хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо».
	удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно».
	плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3 Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения на промежуточной аттестации с указанием критериев их оценивания:

5.3.1 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ОПК-1

1. Стационарные состояния гармонического осциллятора. Подход дифференциального уравнения. Нахождение собственных энергий.

2. Выведите формулы теории возмущений для 1 и 2 поправки к энергии

3. Указать вид оператора проекции спина s_n на произвольное направление, задаваемое единичным вектором n . Найти среднее значение проекции спина на ось p в состоянии с определенной проекцией спина на ось z .

4. Операторы рождения и уничтожения в задаче о гармоническом осцилляторе. Вывод выражений для собственных энергий и собственных функций.

5. Методом ВКБ найдите амплитуду и фазу отраженной волны от линейного потенциала

6. Найти волновые функции стационарных состояний и собственные значения энергии плоского ротатора (вращающейся системы из двух жестко связанных друг с другом частиц). Момент инерции ротатора $I = ma^2$, где m - приведенная масса частиц, a - расстояние между ними. Частицы вращаются в фиксированной плоскости. Какова кратность вырождения уровней.

7. Найдите глубину 3D прямоугольной ямы, необходимой для появления связанного состояния.

8. Выведите формулы квазиклассического приближения. Базисные решения. Оцените локальная точность.

9. Найти коммутатор операторов L^2 , L_x .

10. Опишите свободное движение частицы в сферической системе координат. Какими квантовыми числами характеризуется движение.

11. С помощью теории возмущений найдите поправки к энергии основного состояния для слабо аангармонического осциллятора $V = \alpha x^3$.

12. Найти коммутатор операторов проекций моментов импульса.

13. Орбитальный момент. Связь с вращением. Повышающие и понижающие операторы. Матричное представление операторов момента.

14. Теория возмущений в случае вырождения. Напишите явные формулы для задачи о двукратном вырождении.

15. На частицу, находящуюся при $t \rightarrow -\infty$ в основном состоянии в бесконечно глубокой яме с прямоугольными стенками (ширина ямы a), накладывается слабое однородное поле, изменяющееся во времени по закону $V(x,t) = -xF_0 \exp(-t^2/\tau^2)$. Вычислить в первом порядке теории возмущений вероятности возбуждения различных состояний частиц при $t \rightarrow +\infty$.

16. Оператор орбитального момента в декартовых координатах. Преобразование вращения. Коммутационные соотношения

17. Выведите формулу Золотого правила Ферми.

18. Найти спектр энергии в атоме водорода. Какими квантовыми числами характеризуются уровни

19. Опишите принцип работы анализатора Штерна-Гелаха.

20. Стационарная теория возмущений в случае вырождения. Задача об электроны в поле двух одинаковых ядер. Правильные функции нулевого приближения. Интегралы перекрытия.

21. Выразить оператор поворота R , описывающий преобразование волновой функции частицы при вращении системы координат на угол α относительно оси, направление которой в пространстве определяется единичным вектором n , через оператор момента импульса.

22. Оператор орбитального момента. Спектр энергий и собственные функции симметричного ротатора.

23. Теория возмущений в случае периодического воздействия. Найдите вероятности переходов между уровнями в бесконечно глубокой яме под действием однородного гармонического поля.

24. Найти расщепление первого возбужденного уровня энергии плоского симметричного гармонического осциллятора (k - жесткость осциллятора, m - его масса, плоскость (x, y) - плоскость колебаний) под действием возмущения вида $V = \alpha xy$ в первом порядке по теории возмущений.

25. Спин. Многокомпонентная волновая функция. Опыт Штерна-Герлаха. Спиновая переменная. Инфинитизимальное преобразование вращения и оператор спина.

26. Стационарная теория возмущений в случае вырождения. Секулярное уравнение. Правильные функции нулевого приближения.

27. Найти значения энергии, при которых частицы не отражаются от потенциального барьера $U(x) = \alpha[\delta(x) + \delta(x+a)]$.

28. Преобразование спиновой волновой функции при конечном вращении. Явные выражения для спина $\frac{1}{2}$

29. Симметрия по отношению к преобразованию инверсии. Истинные и псевдо скаляры, векторы и тензоры. Четность различных сферических гармоник.

30. Найти коэффициент прохождения частиц через прямоугольный потенциальный барьер, $U(x) = 0$;

31. Спин $1/2$. Матрицы Паули. Коммутационные и антикоммутационные соотношения. Алгебра матриц Паули. Собственные числа и собственные функции операторов проекций спина.

32. С помощью теории возмущений найдите поправки к энергиям для слабо аангармонического осциллятора $V = \alpha x^4$.

33. Доказать, что для потенциального барьера произвольной формы выполняется соотношение $R(E) + T(E) = 1$, R и T – коэффициенты отражения и прохождения, соответственно. Рассмотреть потенциальный барьер наиболее общей формы

34. Примените метод ВКБ к гармоническому осциллятору. Сравните ответы с точными.

35. Оператор спина. Коммутационные соотношения. Собственные числа и собственные функции операторов спина. Матричные элементы.

36. Найти электрический потенциал, создаваемый атомом водорода, находящимся в основном состоянии.

37. Вариационный принцип. Осцилляционная теорема. Существование связанного состояния в 1D мелкой одномерной яме.

38. Оператор орбитального момента. Собственные функции и числа. Явные выражения для операторов орбитального момента в сферических координатах.

39. На частицу в бесконечно глубокой потенциальной яме ширины a ($0 < x < a$) наложено возмущение вида $V(x) = V_0 \cos^2(\pi x/a)$. Рассчитать изменение энергетических уровней частицы в первых двух порядках теории возмущений.

40. Оператор орбитального момента. Спектр энергии и собственные функции плоского ротатора.

5.3.2 Типовые задания (оценочное средство - Контрольные вопросы) для оценки сформированности компетенции ОПК-2

1. Нестационарная теория возмущений. Общая теория.
2. Для сферически симметричного кулоновского потенциала $U(r) = -\gamma/r$ ($\gamma > 0$) оценить энергию основного состояния, пользуясь пробной функцией вида $\Psi(r) \sim \exp(-\alpha r/2)$, где α - вариационный параметр. Сравните результат с точным решением.
3. Существование связанного состояния в 2D мелкой прямоугольной яме. Зависимость энергии связи от глубины ямы
4. Нестационарная теория возмущений. Золотое правило Ферми.
5. Найти собственные значения энергии и волновые функции частицы в потенциале ($\alpha > 0$)
6. $U(x) = \alpha \delta(x)$;
7. $U(x) = \infty$;
8. Отдельно рассмотрите случай $m\alpha a/\hbar^2 \gg 1$.
9. Одномерное уравнение Шредингера. Решение задач с дельта-функцией в потенциале. Граничные условия.
10. Стационарная теория возмущений. Общая теория.
11. Найти собственные значения оператора $f = aI + b\sigma$ (a - число, b - вектор, σ - вектор из матриц Паули, I - единичная матрица).
12. Движение в центральном поле. Общие свойства. Центробежная энергия.
13. Квазиклассическое приближение. Задача о потенциальной яме. Правила квантования Бора-Зоммерфельда.
14. Найти собственные значения и собственные функции операторов проекций спина для частицы со спином $s = 1/2$.
15. Покажите, что произвольная функция от матриц Паули $f = aI + b\sigma$ сводится к линейной и найдите её.
16. Нестационарная теория возмущений. Резонансный случай.

17. Определить коэффициенты отражения и прохождения частиц в случае потенциала $U(x)=\alpha\delta(x)$. Рассмотреть предельные случаи $E \rightarrow \infty$ и $E \rightarrow 0$.
18. С помощью прямого вариационного принципа оцените энергию атома водорода.
19. Квазиклассическое приближение. Выведите формулу для набег фазы при отражении от линейного слоя.
20. Для двумерной потенциальной ямы конечной глубины:
21. $U(r)=-U_0$;
22. $U(r)=0$;
23. Оценить энергию основного состояния используя пробную функцию вида
24. $\Psi(r) \sim \cos(\pi r/(2R))$;
25. $\Psi(r)=0$;
26. Туннельный эффект. Квазиклассическое приближение. Задача о прохождении через барьер.
27. Какова интенсивность и поляризация выходящих из анализатора Штерна-Герлаха электронных пучков, если падающий пучок поляризован вдоль некоторой оси, не совпадающей с осью анализатора.
28. Для частицы, находящейся в состоянии Ψ_{lm} с определенными значениями момента l и его проекции m на ось z найти среднее значение проекции момента на ось z' , составляющую угол α с осью z .
29. С помощью правила Бора-Зоммерфельда найдите уровни энергии в треугольной яме.
30. Сведение задачи двух тел к движению в центральном поле.
31. На плоский ротор, имеющий дипольный момент p , наложено однородное электрическое поле, меняющееся по времени $E=E_0 \exp(-|t|/\tau)$. До включения поля ротор имел определенное значение проекции момента импульса m . Вычислить в первом порядке теории возмущений вероятности измерения различных значений проекции момента импульса и энергии ротора при $t \rightarrow +\infty$.
32. По теории возмущений найдите поправку к волновым функциям гармонического осциллятора из-за наложения однородного поля. Сравните с точным решением.
33. Квазиклассическое приближение. Метод Цвана. Правило сшивки из классически запрещенной области.
34. Произвольный линейный оператор L , действующий в пространстве спиновых переменных для частиц с $s=1/2$, является квадратной матрицей 2-го ранга. Какие ограничения накладывает эрмитовость оператора L на элементы этой матрицы? Найти собственные значения такого эрмитова оператора.
35. Покажите, что матрицы Паули антикоммутируют между собой.
36. Связанные состояния электрона в атоме водорода. Спектр и собственные функции. Выражение для собственных значений энергии. Связь главного и радиального квантовых чисел

37. Найти энергию и волновую функцию локализованного состояния в потенциале $U(x)=-\alpha\delta(x)$.
38. Найдите явно нормированные 0 и 1 собственные функции гармонического осциллятора с помощью операторов рождения и уничтожения.
39. Свободное движение в сферических координатах. Сферические функции Бесселя и их выражения через элементарные функции.
40. Найти приближенное значение энергии основного состояния частицы в потенциальной яме вида $U(x)=\gamma|x|$, используя пробную функцию $\Psi_{\alpha}(x)\sim\exp(-\alpha x^2/2)$, где α - вариационный параметр.
41. Оператор четности. Закон сохранения четности. Связь четности с орбитальным моментом.
42. Сферический гармонический осциллятор. Решение в декартовой и сферической системе координат. Собственные функции.
43. Частица находится внутри непроницаемого эллипсоида вращения, т.е. $U(r)=0$;
44. Оператор орбитального момента. Пространственный симметричный ротатор.
45. Гармонический осциллятор. Подход операторов рождения и уничтожения. Вычисление собственных функций, нормировок и матричных элементов.
46. Найти приближенное значение энергии основного состояния частицы в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечными стенками используя пробную функцию вида $\psi(x)\sim x(x-a)$. Сравните результаты с точным решением.
47. Сферические гармоники. Определения, нормировки. Явные выражения для момента 0 и 1.

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольные вопросы)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой
отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо»
хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо»

Оценка	Критерии оценивания
удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3.3 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ОПК-1

Комплект задач к экзамену соответствует комплекту для текущего контроля

5.3.4 Типовые задания (оценочное средство - Задачи) для оценки сформированности компетенции ОПК-2

Комплект задач к экзамену соответствует комплекту для текущего контроля

Критерии оценивания (оценочное средство - Задачи)

Оценка	Критерии оценивания
превосходно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой
отлично	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично»
очень хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо»
хорошо	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо»
удовлетворительно	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»

Оценка	Критерии оценивания
неудовлетворительно	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо»
плохо	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

5.3.5 Типовые задания (оценочное средство - Контрольная работа) для оценки сформированности компетенции ОПК-1

Контрольная работа к зачету соответствует контрольной работе для текущего контроля

5.3.6 Типовые задания (оценочное средство - Контрольная работа) для оценки сформированности компетенции ОПК-2

Контрольная работа к зачету соответствует контрольной работе для текущего контроля

Критерии оценивания (оценочное средство - Контрольная работа)

Оценка	Критерии оценивания
зачтено	Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «превосходно», продемонстрированы знания, умения, владения по соответствующим компетенциям на уровне, выше предусмотренного программой ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «отлично», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «отлично» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «очень хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «очень хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «хорошо», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «хорошо» ИЛИ Все компетенции (части компетенций), на формирование которых направлена дисциплина, сформированы на уровне не ниже «удовлетворительно», при этом хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «удовлетворительно»
не зачтено	Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «неудовлетворительно», ни одна из компетенций не сформирована на уровне «плохо» ИЛИ Хотя бы одна компетенция сформирована на уровне «плохо»

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

Основная литература:

- Ландау Лев Давидович. Теоретическая физика : [учеб. пособие для физ. специальностей ун-тов] : в 10 т. Т. 3. Квантовая механика. Нерелятивистская теория / при участии Л. П. Питаевского. -

- Изд. 4-е, испр. - М. : Наука, 1989. - 767 с. : ил. - ISBN 5-02-014421-5 (в пер.) : 1.90., 174 экз.
2. Шифф Леонард И. Квантовая механика / пер. с англ. Г. А. Зайцева. - 2-е изд. - М. : Изд-во иностр. лит., 1959. - 473 с. : черт. - 2.25., 17 экз.
3. Давыдов Александр Сергеевич. Квантовая механика : [учеб. пособие для ун-тов]. - 2-е изд., испр. и перераб. - М. : Наука, 1973. - 703 с. : с черт. - 1.56., 8 экз.

Дополнительная литература:

1. Фейнман Ричард П. Фейнмановские лекции по физике = The Feynman Lectures on Physics : в 9 т. Т. 8 - 9. Квантовая механика / [пер. с англ. Г. И. Копылова ; под ред. Я. А. Смородинского]. - 2-е изд. - М. : Мир, 1978. - 524 с. - 50.00., 24 экз.
2. Ферми Энрико. Квантовая механика : (конспект лекций). - [2-е изд.]. - М. : Мир, 1968. - 367 с. : ил. - 1.58., 22 экз.
3. Задачи по квантовой механике : учеб. пособие для студентов физ. специальностей вузов. - М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. - 648 с. : граф. - 1.70., 44 экз.
4. Флюгге Зигфрид. Задачи по квантовой механике. Т. 1. - М. : Мир, 1974. - 341 с. : с черт. - 1.51., 163 экз.
5. Флюгге Зигфрид. Задачи по квантовой механике. Т. 2. - М. : Мир, 1974. - 315 с. : с черт. - 1.35., 190 экз.

Программное обеспечение и Интернет-ресурсы (в соответствии с содержанием дисциплины):

-

7. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебные аудитории для проведения учебных занятий, предусмотренных образовательной программой, оснащены мультимедийным оборудованием (проектор, экран), техническими средствами обучения.

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

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки/специальности 03.03.03 - Радиофизика.

Автор(ы): Курин Владислав Викторович, доктор физико-математических наук, доцент.

Заведующий кафедрой: Бакунов Михаил Иванович, доктор физико-математических наук.

Программа одобрена на заседании методической комиссии от 18 декабря 2023 г., протокол № 09/23.