

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 / институт / филиал)

УТВЕРЖДЕНО

решением президиума Ученого совета ННГУ

протокол от

«14» декабря 2021 г. № 4

Рабочая программа дисциплины (модуля)

Квантовая механика

(наименование дисциплины (модуля))

Бакалавриат

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

03.03.03 Радиофизика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Фундаментальная радиофизика

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Бакалавр

(бакалавр / магистр / специалист)

Очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Нижегород

2022

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Данная дисциплина относится к базовой части ОПОП и обязательна для освоения в 5 и 6 семестрах.

Цель освоения дисциплины состоит в формировании у студента целостной системы знаний по основам квантовой механики, выработке навыков построения физических моделей и решения физических задач. Дисциплина является фундаментом для последующего изучения общепрофессиональных и специальных дисциплин.

2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине, характеризующие этапы формирования компетенций
ОПК-1 Способность к овладению базовыми знаниями в области математики и естественных наук, их использованию в профессиональной деятельности	З1 (ОПК-1) Знать методики получения базовых знаний в области квантовой механики. У1 (ОПК-1) Уметь овладевать базовыми знаниями в области квантовой механики и использовать их в профессиональной деятельности. В1 (ОПК-1) Владеть опытом получения базовых знаний в области квантовой механики и их использования в профессиональной деятельности.
ОПК-2 Способность самостоятельно приобретать новые знания, используя современные образовательные и информационные технологии	З1 (ОПК-2) Знать современные образовательные и информационные технологии для самостоятельного приобретения новых знаний в области квантовой механики. У1 (ОПК-2) Уметь самостоятельно приобретать новые знания в области квантовой механики, используя современные образовательные и информационные технологии. В1 (ОПК-2) Владеть опытом самостоятельного приобретения новых знаний в области квантовой механики с использованием современных образовательных и информационных технологий.

3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 6 зачетных единиц, всего 216 часа, из которых 115 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (80 часа - занятия лекционного типа, 32 часа - практические занятия, 3 часа – контрольные самостоятельные работы), 36 часов - экзамен, 65 часов составляет самостоятельная работа обучающегося.

Содержание дисциплины (модуля)

Наименование и краткое содержание	Э	В том числе
-----------------------------------	---	-------------

ние разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
1. Введение в курс квантовой механики.	22	4			4	9
2. Физические величины в классике и квантовой механике	8	4	2		6	1
3. Общая теория операторов физических величин.	19	8	2		10	4
4. Измерение в квантовой механике.	18	4	2		6	6
5. Уравнение Шредингера для свободной нерелятивистской частицы.	10	4	2		6	2
6. Представление Гейзенберга	8	4			4	2
7. Запутанные и независимые состояния.	6	4			4	1
8. Одномерное движение.	8	4	2		6	1
9. Точно решаемые потенциалы.	4	2			2	1
10. Гармонический осциллятор.	8	4	2		6	1
11. Оператор орбитального момента.	14	8	4		12	1
12. Движение в центральном поле.	6	4			4	1
13. Кулоново поле.	8	4	2		6	1
14. Теория возмущений.	14	8	4		12	1
15. Квазиклассическое приближение.	15	8	4		12	1
16. Спин.	11	4	4		8	2
17. Движение электрона в магнитном поле.	3	2	4			1
В т. ч. текущий контроль	3		3		3	
Промежуточная аттестация – экзамен						

4. Образовательные технологии

В процессе изучения дисциплины используются следующие образовательные технологии: проблемный метод изложения материала и диалогичная форма проведения занятий.

5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся включает следующие виды:

- разбор лекционного материала,
- изучение дополнительных разделов дисциплины с использованием учебной литературы,
- выполнение домашних заданий по решению задач.

Текущий контроль усвоения материала проводится путем проведения контрольных работ во время практических занятий и проверки выполнения домашних заданий.

Примеры контрольных заданий:

1. Докажите, что уравнение Шредингера сохраняет плотность вероятности.
2. Докажите, что собственные функции УШ инфинитного движения дважды вырождены.
3. Докажите, что собственные функции УШ свободного движения, соответствующие разным импульсам ортогональны.
4. Докажите, что собственные функции дискретного спектра невырождены.
5. Докажите, что собственные функции дискретного спектра УШ с четной ямой либо четны, либо нечетны.
6. Найдите собственную функцию УШ с линейным потенциалом.
7. Определите уровни энергии в симметричной прямоугольной яме конечной глубины.
8. Выведите граничные условия и определите коэффициент отражения от дельта-потенциала.
9. Напишите уравнение для собственных функций гармонического осциллятора и приведите его к безразмерному виду.
10. Найдите собственную функцию основного состояния гармонического осциллятора. Отнормируйте её.
11. Определите операторы рождения и уничтожения. Напишите гамильтониан гармонического осциллятора. Опишите их свойства.
12. Решая уравнение $a|0\rangle = 0$ в координатном представлении найдите собственную функцию основного состояния.
13. Используя операторы a, a^+ вычислите матричные элементы операторов x^2, p^2 в базисе собственных функций гармонического осциллятора.
14. Как преобразуются координаты при инфинитезимальном (бесконечно малом) вращении.
15. 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^2, l_z в представлении.
16. Собственные функции момента в сферических координатах. Напишите уравнение и его решение методом разделения переменных. Выражение через присоединенные полиномы Лежандра.
17. Четность состояния, оператор инверсии. Скаляры и псевдоскаляры, полярные и аксиальные векторы. Примеры.
18. Преобразование инверсии в сферических координатах. Связь четности с орби-

тальным моментом.

19. Сведите задачу двух тел к задаче движения одной частицы в центральном поле.
20. Разделите переменные УШ для центрального поля и напишите общее решение.
21. Напишите условие ортонормированности. Сколько квантовых чисел и каких образуют полный набор.
22. Определите уровни энергии частицы с моментом $l=0$, движущейся в сферической прямоугольной яме конечной глубины. Определите минимальную глубину ямы, необходимую для существования связанного состояния.
23. Определите уровни энергии и волновые функции сферического гармонического осциллятора путем разделения переменных в декартовых координатах. Каковы квантовые числа. Определите степень вырождения уровней.
24. Напишите УШ для движения в кулоновом поле и приведите его к безразмерному виду. Атомная система единиц.
25. Определите асимптотику радиальной функции движения в кулоновом поле вблизи центра.
26. Какова степень вырождения уровней при движении в кулоновом поле.
27. Выведите формулу для первой поправки к волновой функции, соответствующей невырожденной энергии
28. Выведите формулу для первой и второй поправок к энергии.
29. Используя теорию возмущений найдите первую поправку к частоте слабо ангармонического осциллятора из-за возмущения. Используйте операторы рождения и уничтожения
30. Выведите формулу для поправки к энергии в случае m кратного вырождения этого уровня. Секулярное уравнение.
31. Выведите формулу для поправки к энергии в случае 2 кратного вырождения этого уровня. Определите правильные волновые функции нулевого приближения.
32. Получите нестационарное уравнение Шредингера в представлении собственных функций невозмущенного гамильтониана.
33. Выведите формулу для первой поправки к волновой функции системы при произвольном нестационарном возмущении
34. Выведите формулу для первой поправки к волновой функции системы при гармоническом нерезонансном возмущении.
35. Выведите формулу для вероятности перехода при резонансном воздействии.
36. Золотое правило Ферми.
37. Выведите формулу главного члена квазиклассического асимптотического разложения.
38. Напишите локальные условия применимости квазиклассического приближения.
39. Напишите квазиклассическое решение для УШ, описывающее движение в однородном поле.
40. Напишите квазиклассическое решение для УШ, описывающее движение в однородном поле слева и справа от точки поворота.
41. Методом Цвана выведите граничные условия для перехода из полубесконечной классически запрещенной области в классически разрешенную. Каков набег фазы при отражении?
42. В квазиклассическом приближении определите уровни энергии в потенциальной яме. Правило квантование Бора-Зоммерфельда.
43. С помощью правила квантования Бора-Зоммерфельда определите уровни энер-

гии гармонического осциллятора. Сравнить с точным решением.

44. Методом Цвана выведите граничные условия для перехода из полубесконечной классически разрешенной области в классически запрещенную.

45. Понятие спина. Спиновая переменная. Аналог поляризации электромагнитных волн. Опыт Штерна-Герлаха.

46. Инфинитезимальное преобразование вращения и оператор спина. На какие переменные действует оператор спина.

47. Напишите коммутационные соотношения для операторов спина

48. Докажите, что оператор s^2 коммутирует с операторами проекций спина.

49. Что такое s^2, s_z представление.

50. Напишите матрицы Паули.

51. Напишите матрицу s^2 .

52. Напишите собственные функции операторов $s_{x,y,z}$ для $s=1/2$ в s^2, s_z представлении.

53. Прямым вычислением докажите антикоммутируемость матриц Паули.

54. Напишите матрицы конечных вращений $U_{x,y,z}$

55. На прибор Штерна-Герлаха с собственной осью z падает пучок, поляризованный по x . Что на выходе?

56. 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 φ ?

57. Напишите УШ бесспиновой заряженной частицы в магнитном поле

58. Напишите УШ заряженной частицы со спином $1/2$ в магнитном поле.

59. Опишите связь спина и магнитного момента частицы. Что такое гиромагнитное отношение, магнетон Бора, ядерный магнетон. Чему равно гиромагнитное отношение электрона.

60. Роль потенциалов в квантовой механике. Калибровочная инвариантность.

61. Удлиненные производные.

62. Напишите выражения для операторов компонент скоростей и получите коммутационные соотношения для них при конечном магнитном поле.

63. Напишите уравнения движения электрона в однородном магнитном поле в калибровке Ландау.

64. Приведите УШ электрона в магнитном поле к безразмерному виду. Магнитная длина.

65. Выведите волновые функции и значения энергии электрона в магнитном поле.

66. Какими квантовыми числами характеризуется состояние. Уровни Ландау.

Примерный список домашних заданий:

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

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

76. Покажите, что при переходе к классике возникает уравнение Гамильтона-Якоби.

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

$$\psi(x) = \cosh^{-1} \alpha(x - x_0)$$

76. Покажите, что УШ сохраняет вероятность.

76. Дана волновая функция $\psi(x)$. Отнормируйте и нарисуйте график плотности вероятности величины x , $\psi(x) = \theta(x + L/2) - \theta(x - L/2)$

76. 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).

76. Докажите, что
$$\int_{-\infty}^{\infty} p |\psi(p)|^2 dp = \int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(x) \{-i\hbar \nabla\} \psi(x) dx$$

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

76. Найдите $\psi(p)$ по данным $\psi(x)$. Найдите связь ширины в x и p представлениях $\psi(x) \sim \exp\{-u|x|\}$

76. Разложите $\delta(x)$ по собственным функциям оператора импульса

76. Докажите, что нормировка сохраняется при замене представления

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x)|^2 dx = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(p)|^2 dp$$

76. Найдите $\psi(p)$ по данным $\psi(x)$. Найдите связь ширины в x и p представлениях

$$\psi(x) \sim \exp\left\{-\frac{(x-x')^2}{4b^2} + iux\right\}$$

76. Запишите общее решение нестационарного уравнения Шредингера с помощью разложения по стационарным состояниям

76. Докажите, что оператор кинетической энергии эрмитов.

76. Запишите нестационарное уравнение Шредингера в энергетическом представлении. Найдите его общее решение. Как выглядит оператор \hat{H} в энергетическом представлении

76. Найдите стационарные состояния в бесконечно глубокой яме. Найдите силу с которой частица действует на стенку.

Литература:

Задачи по физике твердого тела, под ред. Г. Дж. Голдсмида, М.: "Наука", 1976г.

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине (модулю), включающий:

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования.

Описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования приведено в приложении 1.

6.2. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Итоговый контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в виде экзамена, на котором определяется:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала;
- способность студентов использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Экзамен проводится в устной форме и заключается в ответе студентом на теоретические вопросы курса (с предварительной подготовкой), решении задачи (с предварительной подготовкой) и последующем собеседовании в рамках тематики курса. Собеседование проводится в форме вопросов, на которые студент должен дать краткий ответ.

Превосходно	Превосходная подготовка без недочетов
Отлично	Подготовка, уровень которой существенно выше среднего с очень незначительными погрешностями
Очень хорошо	В целом хорошая подготовка с некоторыми ошибками
Хорошо	Хорошая подготовка, но с рядом заметных ошибок
Удовлетворительно	Подготовка, удовлетворяющая минимальным требованиям
Неудовлетворительно	Необходима дополнительная подготовка для успешного прохождения испытания
Плохо	Подготовка совершенно недостаточная

6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине, характеризующих этапы формирования компетенций

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются: индивидуальное собеседование (ОПК - 1, 2), домашние задания (ОПК - 2), контрольные работы (ОПК - 1) и разноуровневые задачи и задания (ОПК – 1,2).

Для оценивания результатов обучения в виде умений используются: индивидуальное собеседование (ОПК – 1, 2), практические контрольные задания и разноуровневые задачи и задания.

Для оценивания результатов обучения в виде владений используются: индивидуальное собеседование (ОПК – 1, 2), комплексные практические задания (ОПК – 1,2).

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

Контрольные вопросы для промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:

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 n 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_α .
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 ангармонического 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_α , описывающий преобразование волновой функции частицы при вращении системы координат на угол α относительно оси, направление которой в пространстве определяется единичным вектором \mathbf{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. Инфинитезимальное 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 $1/2$.
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, $U(x) = 0; \quad x < 0; U(x) = U_0; \quad 0 < x < a; U(x) = 0; \quad x > a$ Рассмотреть случаи $U_0 > 0$ и $U_0 < 0$.
31. Спин $1/2$. Матрицы Паули. Коммутационные и антикоммутиационные соотношения. Алгебра матриц Паули. Собственные числа и собственные функции операторов проекций спина.
32. С помощью теории возмущений найдите поправки к энергиям для слабо агармонического 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.
41. Нестационарная теория возмущений. Общая теория.

42. Для сферически симметричного кулоновского потенциала $U(r)=-\gamma/r$ ($\gamma>0$) оценить энергию основного состояния, пользуясь пробной функцией вида $\Psi(r)\sim\exp(-\alpha r^2/2)$, где α - вариационный параметр. Сравните результат с точным решением.
43. Существование связанного состояния в 2D мелкой прямоугольной яме. Зависимость энергии связи от глубины ямы
44. Нестационарная теория возмущений. Золотое правило Ферми.
45. Найти собственные значения энергии и волновые функции частицы в потенциале ($\alpha>0$)
 $U(x)=\alpha\delta(x); \quad |x|<a;$
 $U(x)=\infty; \quad |x|>a.$
 Отдельно рассмотрите случай $m\alpha a/\hbar^2 \gg 1$.
46. Одномерное уравнение Шредингера. Решение задач с дельта-функцией в потенциале. Граничные условия.
47. Стационарная теория возмущений. Общая теория.
48. Найти собственные значения оператора $f=aI+b\sigma$ (a - число, b - вектор, σ - вектор из матриц Паули, I -единичная матрица).
49. Движение в центральном поле. Общие свойства. Центробежная энергия.
50. Квазиклассическое приближение. Задача о потенциальной яме. Правила квантования Бора-Зоммерфельда.
51. Найти собственные значения и собственные функции операторов проекций спина для частицы со спином $s=1/2$.
52. Покажите, что произвольная функция от матриц Паули $f=aI+b\sigma$ сводится к линейной и найдите её.
53. Нестационарная теория возмущений. Резонансный случай.
54. Определить коэффициенты отражения и прохождения частиц в случае потенциала $U(x)=\alpha\delta(x)$. Рассмотреть предельные случаи $E\rightarrow\infty$ и $E\rightarrow 0$.
55. С помощью прямого вариационного принципа оцените энергию атома водорода.
56. Квазиклассическое приближение. Выведите формулу для набега фазы при отражении от линейного слоя.
57. Для двумерной потенциальной ямы конечной глубины:
 $U(r)=-U_0; \quad r>R;$
 $U(r)=0; \quad r<R,$
- Оценить энергию основного состояния используя пробную функцию вида
 $\Psi(r)\sim\cos(\pi r/(2R)); \quad r<R;$
 $\Psi(r)=0; \quad r>R.$
58. Туннельный эффект. Квазиклассическое приближение. Задача о прохождении через барьер.
59. Какова интенсивность и поляризация выходящих из анализатора Штерна-Герлаха электронных пучков, если падающий пучок поляризован вдоль некоторой оси, не совпадающей с осью анализатора.
60. 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 .
61. С помощью правила Бора-Зоммерфельда найдите уровни энергии в треугольной яме.
62. Сведение задачи двух тел к движению в центральном поле.
63. На плоский ротатор, имеющий дипольный момент p , наложено однородное электрическое поле, меняющееся по времени $E=E_0 \exp(-|t|/\tau)$. До включения поля ротатор имел определенное значение проекции момента импульса m . Вычислить в

- первом порядке теории возмущений вероятности измерения различных значений проекции момента импульса и энергии ротатора при $t \rightarrow +\infty$.
64. По теории возмущений найдите поправку к волновым функциям гармонического осциллятора из-за наложения однородного поля. Сравните с точным решением.
 65. Квазиклассическое приближение. Метод Цвана. Правило сшивки из классически запрещенной области.
 66. 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.
 67. Покажите, что матрицы Паули антикоммутируют между собой.
 68. Связанные состояния электрона в атоме водорода. Спектр и собственные функции. Выражение для собственных значений энергии. Связь главного и радиального квантовых чисел
 69. Найти энергию и волновую функцию локализованного состояния в потенциале $U(x)=-\alpha\delta(x)$.
 70. Найдите явно нормированные 0 и 1 собственные функции гармонического осциллятора с помощью операторов рождения и уничтожения.
 71. Свободное движение в сферических координатах. Сферические функции Бесселя и их выражения через элементарные функции.
 72. 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.
 73. Оператор четности. Закон сохранения четности. Связь четности с орбитальным моментом.
 74. Сферический гармонический осциллятор. Решение в декартовой и сферической системе координат. Собственные функции.
 75. Частица находится внутри непроницаемого эллипсоида вращения, т.е. $U(\mathbf{r})=0$; $(x^2+y^2)/a^2+z^2/b^2 < 1$, $U(\mathbf{r})=\infty$; $(x^2+y^2)/a^2+z^2/b^2 > 1$, причем $\varepsilon=(a-b)/a \ll 1$. Найти в первом порядке теории возмущений сдвиг энергетического уровня основного состояния частицы по отношению к уровню энергии частицы в непроницаемой сфере радиуса a .
 76. Оператор орбитального момента. Пространственный симметричный ротатор.
 77. Гармонический осциллятор. Подход операторов рождения и уничтожения. Вычисление собственных функций, нормировок и матричных элементов.
 78. 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.
 79. Сферические гармоники. Определения, нормировки. Явные выражения для момента 0 и 1.
 80. Связанные состояния электрона в атоме водорода. Спектр и собственные функции. Выражение для собственных значений энергии. Наличие дополнительного вырождения.
 81. Найти спектр частицы, находящейся в потенциале вида $U(x,y)=k(x^2+y^2)/2+\alpha xy$ ($|\alpha|<k$).
 82. С помощью представления повышающего оператора l_+ в сферической системе координат, найдите сферическую гармонику $Y_{l,l}(\theta, \varphi)$
 83. Кулоново поле. Безразмерные переменные, кулонова система единиц. Наличие дополнительного вырождения.

84. Найти приближенное значение энергии основного состояния частицы в потенциальной яме вида $U(x)=kx^2/2$ (гармонический осциллятор), используя пробную функцию вида $\Psi_a(x)\sim(1+x^2/a^2)^{-1}$, где a - вариационный параметр. Сравните результат с точным решением.
85. Как с помощью операторов момента построить выражения для сферических гармоник.
86. Оператор конечных вращений. Определение интенсивностей пучков в опытах Штерна-Герлаха при вращении анализатора.
87. Найти приближенное значение энергии основного состояния частицы в потенциальной яме вида $U(x)=kx^2/2$ (гармонический осциллятор), используя пробную функцию вида $\Psi_a(x)\sim(1+x^2/a^2)^{-1}$, где a - вариационный параметр. Сравните результат с точным решением.

Типовые контрольные задания:

Для оценки сформированности компетенции ОПК-1 используются контрольные задания, примеры которых приведены в пункте 5.

Полный комплект оценочных средств представлен в ФОНДЕ оценочных средств по дисциплине «Физика конденсированного состояния»

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Учебно-методическое обеспечение дисциплины

7.1. Рекомендуемая литература.

а) основная литература:

1. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц, Квантовая механика, т. 3, Москва, "Наука", 1989
2. Л.Шифф, Квантовая механика, Москва, ИЛ, 1967
3. А. Мессиа, Квантовая механика, т.1,2, М. Наука, 1978
4. А. С. Давыдов, Квантовая механика, М. Наука, 1973
5. Д.И.Блохинцев, Основы квантовой механики, Москва, "Наука", 1976.
6. В.Г. Левич, Ю.А. Вдовин, В.А. Мямлин, Курс теоретической физики, т.2
7. Л.И. Мандельштам, Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике.

б) дополнительная литература:

1. Р. Фейнман, Лейтон, Сэндс, Фейнмановские лекции по физике (ФЛФ), т. 3,8,9
2. Э. Ферми, Квантовая механика, М. Мир, 1968
3. Г. Бете, Квантовая механика, М. Мир, 1965
4. П. Дирак, Принципы квантовой механики, М. Наука, 1979
5. В. Балашов, В. Долинов, Курс квантовой механики, изд. МГУ, Москва

Задачники:

1. А.М. Галицкий, Б.М. Карнаков, В.И. Коган, Задачи по квантовой механике. Москва, "Наука", 1981.

2. М.Ш. Гольдман, В.Л. Кривченков, М. Наука, 1968
3. З. Флюгге, Задачи по квантовой механике, т. 1,2 М. Мир, 1974

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Для обучения дисциплине имеются специальные помещения для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО с учетом рекомендаций и ОПОП ВПО по направлению 03.03.03 Радиофизика.

Автор _____ Курин В.В.

Рецензент _____ Мельников А.С.

Заведующий кафедрой _____ Бакунов М.И.

Программа одобрена на заседании методической комиссии радиофизического факультета

от «9» декабря 2021 года, протокол № 07/21