

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

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

УТВЕРЖДЕНО
решением Ученого совета ННГУ
протокол от
«31» мая 2023 г. №6

Рабочая программа дисциплины

Квантовая механика

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

бакалавриат

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

03.03.02 Физика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

профиль "Теоретическая физика"

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)

бакалавр

(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения

очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Год начала обучения

2022

(для обучающихся какого года начала обучения разработана Рабочая программа)

Нижний Новгород

1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП

Дисциплина «Квантовая механика» относится к базовой части Б1.Б блока Б1 «Дисциплины (модули)», является обязательной для освоения, преподается на третьем году обучения, в шестом семестре. Освоению дисциплины предшествует освоение дисциплин (модулей) «Математика», «Теоретическая механика», «Атомная физика», «Электродинамика», «Методы математической физики».

Целями освоения дисциплины «Квантовая механика» являются:

- формирование у студентов современного представления о методах квантового описания явлений, происходящих на атомных или субатомных масштабах;
- освоение студентами практически важных методов решения основных типов задач квантовой механики, актуальных для последующей специализации в рамках выбранного направления подготовки.

2. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины «Квантовая механика» составляет 7 зачетных единиц, всего 252 часа, из которых 115 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (3 часа – мероприятия промежуточной аттестации; 64 часа занятия лекционного типа, 48 часов занятия семинарского типа (практические занятия), в том числе 2 часа – мероприятия текущего контроля успеваемости), 137 часов составляет самостоятельная работа обучающегося (83 часа самостоятельная работа в течение семестра, 54 часа самостоятельная работа при подготовке к промежуточной аттестации).

Содержание дисциплины «Квантовая механика»

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	В том числе				Самостоятельная работа в течение семестра, часы
		контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) в течение семестра, часы, из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
1. Предмет квантовой механики. Пределы применимости классической механики. Переход к квантовому описанию.	9	4	1	—	5	4
2. Матаппарат квантовой механики. Основные понятия теории линейных операторов в гильбертовом пространстве. Постулаты квантовой механики.	9	4	2	—	6	3
3. Уравнение Шредингера. Уравнение Шредингера. Сохранение вероятности. Интегралы движения.	10	3	2	—	5	5
4. Законы сохранения в квантовой механике. Законы сохранения и операторы физических величин. Операторы импульса и момента импульса.	9	4	4	—	8	1
5. Одномерное движение. Решение стационарного уравнения Шредингера в одномерных потенциалах. Общие свойства одномерного движения.	23	5	8	—	13	10
6. Эволюция состояний во времени. Изменение квантовых состояний во времени. Функция Грина нестационарного уравнения Шредингера.	10	3	2	—	5	5
7. Центральное поле. Движение в центральном поле. Интегралы движения. Вырождение. Атом водорода.	12	3	4	—	7	5
8. Магнитное поле. Движение заряженной бесспиновой частицы в магнитном поле. Эффект Ааронова-Бома.	11	4	2	—	6	5
9. Теорема Блоха. Движение в периодическом поле.	9	4	—	—	4	5

Теорема Блоха. Модель Крони- Пенни.						
10. Теория представлений. Импульсное представление. Матричная формулировка квантовой механики.	12	4	3	—	7	5
11. Приближенные методы квантовой механики. Теория стационарных и нестационарных возмущений, квазиклассическое приближение, вариационный метод Рэлея-Ритца.	20	5	10	—	15	5
12. Атом во внешнем поле. Эффект Штарка для атома водорода. Основное состояние атома гелия (расчет вариационным методом).	5	3	—	—	3	2
13. Фотоны. Квантование электромагнитного поля. Фотоны. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом. Фотоэффект.	8	6	—	—	6	2
14. Спин. Понятие спина частицы. Процессии спина в постоянном однородном магнитном поле. Спиновый резонанс.	15	3	5	—	8	7
15. Многоэлектронные системы. Тождественность частиц. Фермионы и бозоны. Обменное взаимодействие.	17	3	2	—	5	12
16. Задача рассеяния. Теория рассеяния. Борновское приближение.	10	3	2	—	5	5
17. Основы релятивистской квантовой механики. Уравнение Дирака. Решение уравнения Дирака для свободной частицы. Позитроны.	6	3	1	—	4	2
В т.ч. текущий контроль	2	2				—
Промежуточная аттестация — зачет и экзамен						

3. Образовательные технологии

- 1) Чтение лекций;
- 2) сопровождение лекций написанием и выводом формул, построением графиков, изображением рисунков на доске;
- 3) методика «вопросы и ответы»;
- 4) выполнение практического задания у доски;
- 5) индивидуальная работа над практическим заданием;
- 6) работа в парах над практическим заданием;
- 7) работа в малых группах над практическим заданием;
- 8) методика «мозговой штурм».

4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся предполагает изучение конспектов лекций, выделенных разделов основной литературы, а также дополнительной литературы, выполнение практических заданий, отвечающих изучаемым разделам дисциплины, подготовку к промежуточной аттестации.

Перечень основной и дополнительной литературы для самостоятельного изучения приведен в п. 7 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Контрольные вопросы для промежуточной аттестации, примеры практических заданий приведены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

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

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине
ОПК-1: Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности	Демонстрация способности применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности

6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине

6.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Промежуточной аттестацией для дисциплины «Квантовая механика» является **зачет и экзамен**.

По итогам зачета выставляются оценки «Не зачтено» (означает отсутствие аттестации) или «Зачтено» (означает прохождение первого этапа промежуточной аттестации – зачета). В случае прохождения зачета обучающийся допускается ко второму этапу промежуточной аттестации – экзамену.

По итогам экзамена выставляется оценка по семибалльной шкале: оценки «Плохо» и «Неудовлетворительно» означают отсутствие аттестации, оценки «Удовлетворительно», «Хорошо», «Очень хорошо», «Отлично» и «Превосходно» выставляются при успешном прохождении аттестации.

6.2. Процедуры и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- индивидуальное собеседование (промежуточная аттестация).

Контрольные вопросы для индивидуального собеседования представлены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Для оценивания результатов обучения в виде умений и навыков используются следующие процедуры и технологии:

- выполнение практических заданий (текущий контроль, промежуточная аттестация).

Примеры практических заданий для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации представлены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Критериями оценивания на зачете являются наличие умений и владений (навыков), перечисленных в п. 5 настоящей Рабочей программы дисциплины. Критериями оценивания на экзамене являются полнота знаний, наличие умений и владений (навыков), перечисленных в п. 5 настоящей Рабочей программы дисциплины.

«Не зачтено» – обучающийся не показал минимально допустимый уровень умений и навыков выполнения практических заданий;

«Зачтено» – обучающийся успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий базового уровня сложности;

«Плохо» – обучающийся не продемонстрировал никаких знаний об основных теоретических разделах курса, не показал никаких умений и навыков выполнения практических заданий;

«Неудовлетворительно» – обучающийся не продемонстрировал представления об основных теоретических разделах курса, не показал минимально допустимый уровень умений и навыков выполнения практических заданий;

«Удовлетворительно» – обучающийся продемонстрировал изложение формулировок основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий базового уровня сложности;

«Хорошо» – обучающийся продемонстрировал связное изложение основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий;

«Очень хорошо» – обучающийся продемонстрировал связное изложение практически всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий;

«Отлично» – обучающийся продемонстрировал связное изложение всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий повышенного уровня сложности;

«Превосходно» – обучающийся продемонстрировал уровень знаний в объеме, превышающем стандартную программу подготовки, и продемонстрировал творческий подход к выполнению практических заданий повышенного уровня сложности.

6.3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

6.3.1. При проведении экзамена обучающимся предлагаются следующие контрольные вопросы, охватывающие программу дисциплины «Квантовая механика»:

1. Операторы физических величин в квантовой механике. Основные свойства операторов. Операторы координаты и импульса.
2. Законы сохранения в квантовой механике (интегралы движения).
3. Соотношение неопределенностей.
4. Оператор момента импульса.
5. Стационарное и нестационарное уравнение Шредингера. Уравнение непрерывности.
6. Прямоугольная потенциальная яма. Стационарные состояния.
7. Прямоугольная потенциальная яма и барьер. Коэффициент прозрачности.
8. Гармонический осциллятор. Волновая функция и спектр.
9. Гармонический осциллятор. Операторы рождения и уничтожения.
10. Общие свойства одномерного движения.
11. Изменение квантовых состояний во времени. Функция Грина свободной частицы.
12. Движение в центральном поле. Интегралы движения.
13. Атом водорода. Спектр энергий. Классификация состояний.
14. Движение бесспиновой частицы в постоянном однородном магнитном поле.
15. Импульсное представление. Матричная формулировка квантовой механики.
16. Стационарная теория возмущений для невырожденных уровней.
17. Стационарная теория возмущений при наличии вырождения.
18. Возмущения, зависящие от времени.

19. Вероятность перехода в непрерывный спектр под влиянием периодического возмущения.
20. Взаимодействие поля с веществом. Понятие о спонтанном и вынужденном излучении. Правила отбора.
21. Квазиклассическое приближение. Волновые функции. Правила квантования Бора-Зоммерфельда.
22. Вариационный метод в квантовой механике.
23. Движение в периодическом поле. Теорема Блоха. Модель Кронига-Пенни.
24. Спин. Операторы спина. Собственные функции операторов проекций спина. Матрица поворота.
25. Прецессия спина в магнитном поле. Спиновый резонанс.
26. Тождественность частиц. Волновые функции фермионов и бозонов.
27. Теория рассеяния. Борновское приближение.
28. Уравнение Дирака. Решение уравнения Дирака для свободной частицы. Позитрон.

6.3.2. При проведении зачета обучающимся предлагаются следующие вопросы:

1. Собственные функции и собственные значения операторов координаты, импульса и моментов импульса.
2. Стационарное и нестационарное уравнение Шредингера.
3. Прямоугольная потенциальная яма. Стационарные состояния.
4. Гармонический осциллятор. Волновая функция и спектр.
5. Атом водорода. Спектр. Вырождение.
6. Теория возмущений (стационарная и нестационарная).
7. Прямой вариационный метод.
8. Квазиклассическое приближение.
9. Спин.

6.3.3. Примеры практических заданий для практических занятий, самостоятельной работы обучающихся, проведения текущего контроля и промежуточной аттестации:

1. Найти частное решение временного уравнения Шредингера для свободно движущейся частицы массы m .
2. В некоторый момент времени частица находится в состоянии, описываемом волновой функцией, координатная часть которой имеет вид $\psi(x) = A \exp\left(-\frac{x^2}{a^2} + ikx\right)$, где A и a - некоторые постоянные, а k - заданный параметр, имеющий размерность обратной длины. Найдите для данного состояния средние значения координаты $\langle x \rangle$ и проекции импульса частицы $\langle p_x \rangle$.

3. Частица находится в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной a с бесконечно высокими стенками. В каких точках интервала $0 < x < a$ плотность вероятности обнаружения частицы одинакова для основного и второго возбуждённого состояний?
4. Найти уровни энергии частицы в поле:

$$U(x) = \begin{cases} \infty, & x < 0, x > a \\ -U_0 \delta(x - a/2), & 0 < x < a \end{cases}$$

Изобразить волновую функцию основного и первого возбужденного состояний.

5. Какие значения энергии и с какой вероятностью можно получить при измерении у частицы, находящейся в бесконечно-глубокой яме шириной a в состоянии

$\Psi(x, t=0) = C \sin^3(8\pi x/a)$? Найти волновую функцию в произвольный момент времени.

6. Волновая функция линейного гармонического осциллятора с массой m и частотой ω имеет вид:

$$\Psi(x, t=0) = C (\varphi_2(x) + 2\varphi_3(x)),$$

где $\varphi_n(x)$ – собственные функции гамильтониана. Найти среднее значение потенциальной энергии в момент времени t в этом состоянии. Является ли это состояние стационарным?

7. Частица находится в двумерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками. Координаты x и y частицы лежат в пределах $0 < x < a$, $0 < y < b$, где a и b – стороны ямы. Определите вероятность нахождения частицы с наименьшей энергией в области: а) $0 < x < \frac{a}{4}$; б) $0 < y < \frac{b}{4}$; в) $0 < x < \frac{a}{4}, 0 < y < \frac{b}{4}$

8. Пользуясь решением задачи о гармоническом осцилляторе, найдите энергетический спектр частицы массой m_0 в потенциальной яме вида

$$U(x) = \begin{cases} \infty, & x < 0 \\ \frac{kx^2}{2}, & x > 0 \end{cases} \quad \text{Здесь } k = m_0 \omega_0^2, \text{ а } \omega_0 - \text{собственная частота}$$

гармонического осциллятора.

9. Волновая функция основного состояния электрона в атоме водорода имеет вид $\psi(r) = A \exp\left(-\frac{r}{a}\right)$, где r – расстояние электрона до ядра, a – боровский радиус. Определите наиболее вероятное расстояние $r_{\text{вер}}$ электрона от ядра.

L^2 для частицы, находящейся в состоянии,

$\psi(\theta, \varphi) = A \sin \theta \cos \varphi$, где θ – полярный угол, φ – азимутальный угол, A – некоторая нормировочная постоянная.

11. Найти возможные значения энергии частицы m , находящейся в сферически-симметричной потенциальной яме $U(r) = 0$ при $r < r_0$ и $U(r_0) = \infty$, для случая, когда движение частицы описывается волновой функцией $\psi(r)$, зависящей только от радиуса r . Указание: При решении уравнения Шредингера воспользоваться подстановкой $\psi(r) = \frac{\chi(r)}{r}$.
12. Найти расщепление низшего вырожденного уровня атома водорода, обусловленное слабым возмущением вида $V(r) = k/r^2$ где r – переменная сферической системы координат.
13. Используя прямой вариационный метод, оценить энергию основного состояния частицы в поле $U(x) = U_0 |x|^3$ в классе пробных функций $\varphi(x, b) = A \exp(-b |x|)$, (b – вариационный параметр).
14. Найти квазиклассические уровни энергии частицы в поле $U(x) = kx^{2/3}$.
15. Заряженная частица находится в основном состоянии в кубе со стороной a с непроницаемыми стенками. В момент времени $t = -\infty$ включается электрическое поле с напряженностью $E_x = E_0 / (1 + t^2 / \beta^2)$, $\beta = \text{const}$. Используя теорию возмущений, определить вероятность того, что при $t \rightarrow \infty$ частица окажется в первом возбужденном состоянии.
16. На плоский ротор с моментом инерции I и дипольным моментом \vec{d} , находящийся в состоянии с $l_z = 4\hbar$, действует электрическое поле, лежащее в плоскости ротора и изменяющееся со временем по закону $E = E_0 \exp(-\alpha t)$, $t > 0$. Найти вероятности различных значений l_z к моменту окончания действия поля.
17. При измерении проекции спина на ось z для электрона, находящегося в магнитном поле $\vec{H} = (H_0, 0, 0)$, было получено значение $S_z = \hbar/2$. Каков будет результат измерения этой проекции спустя время t ?
18. Для электрона в состоянии с $S_x = \hbar/2$ найти вероятности различных значений проекции спина на направление $\vec{n} = (\sqrt{8}/3, -1/3, 0)$.

6.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

1. Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утвержденное приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 №55-ОД.

2. Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. – Теоретическая физика Т.3. Квантовая механика (нерелятивистская теория). – М. – 1989. – 767 с. Фонд ФБ ННГУ, 15 экз.
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=466692>
2. Левич В.Г., Вдовин Ю.А., Мямлин В.А. – Курс теоретической физики, Том II. – М.: Наука. – 1971. – 936 с. Фонд ФБ ННГУ, 15 экз.
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=72317>
3. Давыдов А.С. – Квантовая механика (М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит. – 1963. – 748 с. Фонд ФБ ННГУ, 10 экз.
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=43508>; М.: Наука. – 1973. – 703 с. Фонд ФБ ННГУ, 3 экз.
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=70122>)
4. Флюгге З. – Задачи по квантовой механике, т. 1,2 – М.: Мир, 1974. – 341 с., 315с. Фонд ФБ ННГУ, 15 экз.
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=70158>
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=70159>

б) дополнительная литература:

1. Шифф Л.И. – Квантовая механика. – М.: Изд-во иностр. лит. – 1959. – 473 с. Фонд ФБ ННГУ, 6 экз.
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=70608>
2. Блохинцев Д.И. – Основы квантовой механики. – СПб: «Лань». – 2004. – 672 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/619>
3. Демидович Б.П. – Математические основы квантовой механики. – СПб: «Лань». – 2005. – 200 с. Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/604>
4. Елютин П.Б., Кривченков В.Д. – Квантовая механика (с задачами). – М.: Физматлит. – 2000. – 304 с. Режим доступа: ЭБС «Консультант студента» <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN5922100777.html>

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

Интернет-ресурсы Фундаментальной библиотеки ННГУ
<http://www.lib.unn.ru/>.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Материально-техническое обеспечение дисциплины обусловлено наличием учебных аудиторий для проведения занятий, оборудованных специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории. Ресурс мела и маркеров для доски в учебных аудиториях регулярно возобновляется.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся (на базе Фундаментальной библиотеки ННГУ) оснащены компьютерной техникой с подключением к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ.

Программа составлена в соответствии с требованиями самостоятельно установленного ННГУ образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.03.02 Физика.

Автор:

доцент кафедры теоретической физики

физического факультета,

к. ф.-м. н., доцент

_____ / Максимова Г.М. /

Рецензент:

Зав. кафедрой теоретической физики

физического факультета,

д. ф.-м. н., доцент

_____ / Бурдов В.А. /

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии
физического факультета ННГУ от « » _____ 2021 года,
протокол № б/н.

Председатель

Учебно-методической комиссии

физического факультета ННГУ

_____ / Перов А.А. /