

**Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования Московской области «Международный
университет природы, общества и человека «Дубна»
(университет «Дубна»)**

**Факультет естественных и инженерных наук
Кафедра Биофизики**

УТВЕРЖДАЮ

проректор по учебной работе

_____ С.В. Моржухина

«_____» _____ 20 г.

ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Теоретическая физика

Модуль: Квантовая механика

(наименование дисциплины)

по направлению (специальности)

140307.65 Радиационная безопасность человека и окружающей среды

(№, наименование направления, специальности)

Форма обучения: очная

Уровень подготовки: специалист

Курс (семестр): 4 курс (7 и 8 семестры)

г. Дубна, 2010 г.

Автор программы: Чижов Алексей Владимирович, д.ф.-м.н., профессор каф. биофизики
ФИО, ученое звание, кафедра _____
(подпись)

Программа составлена в соответствии с Государственным образовательным стандартом
высшего профессионального образования и учебным планом по направлению подготовки
(специальности) 140307.65 Радиационная безопасность человека и окружающей среды
(код и наименование направления подготовки (специальности))

Программа рассмотрена на заседании кафедры _____
(название кафедры)

Протокол заседания № _____ от «_____» _____ 20____ г.

Заведующий кафедрой _____ / проф. Красавин Е.А. /
(ученое звание) (подпись) (фамилия, имя, отчество)

СОГЛАСОВАНО

заведующий выпускающей кафедрой¹ _____ / _____ /
(ученое звание) (подпись) (фамилия, имя, отчество)
«_____» _____ 20__ г.

Рецензент: _____
(ученая степень, ученое звание, Ф.И.О., место работы, должность)

Руководитель библиотечной системы _____ / _____ /
(подпись) (ФИО)

¹ Для программ общеуниверситетских кафедр

1. Аннотация

Курс «Квантовая механика» входит в учебный план подготовки специалистов по направлению 140307.65 — «Радиационная безопасность человека и окружающей среды» и изучается студентами на четвертом курсе в седьмом и восьмом семестрах после получения ими элементарных знаний по дифференциальному и интегральному исчислению в курсе математического анализа, основных свойств функций распределения вероятности, понятия среднего значения и дисперсии в курсе теории вероятности и математической статистики, а также основ теории электромагнетизма, атомной физики, волновых процессов и оптики в курсе физики.

Курс состоит как из теоретических лекций, так и практических занятий (семинаров). Текущий контроль знаний студентов проводится в виде 2-х полусеместровых контрольных работ. Проверка полученных знаний и навыков осуществляется в конце седьмого семестра в виде зачета по практической и в конце восьмого в виде экзамена по теоретической части курса.

ТРЕБОВАНИЯ К ОБЯЗАТЕЛЬНОМУ МИНИМУМУ СОДЕРЖАНИЯ ОСНОВНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ ПО НАПРАВЛЕНИЮ ПОДГОТОВКИ ДИПЛОМИРОВАННОГО СПЕЦИАЛИСТА «ЯДЕРНЫЕ ФИЗИКА И ТЕХНОЛОГИИ»

СП.07 “Радиационная безопасность человека и окружающей среды”

СД. 02 Теоретическая физика

Квантовая механика. Квантовая система, ее состояния, изометрия, принцип суперпозиции, неравенства Гейзенберга, уравнения Шредингера, одномерный гармонический осциллятор, матрицы в квантовой механике, уравнение Паули, предельный переход к классической механике, теория стационарных возмущений в дискретном спектре, фазовая теория рассеяния в центрально-симметричном поле, квантование свободного электромагнитного поля.

2. Цель и задачи дисциплины

Цель дисциплины

Цель преподавания данной дисциплины состоит в изложении основных понятий и принципов квантовой механики и ее математического аппарата.

Задачи дисциплины

Основными задачами освоения дисциплины являются ознакомление студентов с физическими основами и математическим аппаратом нерелятивистской квантовой теории, а также получение студентами теоретических знаний и практических навыков в применении квантовой теории к исследованию простейших квантовых систем, таких как квантовая яма, квантовый осциллятор, атом водорода и др., а также для решения простейших задач в теории рассеяния и квантовых переходов.

Овладение квантовой механикой в таком объеме позволит студентам в будущем изучать другие разделы современной физики.

3. Требования к уровню освоения содержания дисциплины.

В ходе изучения дисциплины студенты получают:

- знания о принципах и методологии квантового подхода к изучению микрообъектов, способах решения квантовомеханических задач в различных приближениях, решении основных модельных задач квантовой механики;
- умение выбирать квантовомеханические подходы и методы, соответствующие поставленной задаче;
- навыки решения и анализа конкретных физических и биофизических задач, основываясь на полученных знаниях в квантовой механике.

4. Объем дисциплины и виды учебной работы (226 час):

Вид занятий	Всего часов	Семестры	
		VII	VIII
Общая трудоемкость	226	128	98
Аудиторные занятия:	119	68	51
Лекции		34	34
Практические занятия (ПЗ)		34	17
Семинары (С)			
Лабораторные работы (ЛР)			
Самостоятельная работа:	67	40	27
Курсовой проект (работа)			
Расчетно-графические работы			
Реферат			
Вид итогового контроля (зачет, экзамен)	Зачет, Экзамен	Зачет	Экзамен

5. Разделы (темы) дисциплины, содержание и виды занятий

№ п/п	Раздел (тема) дисциплины, содержание	Лекции	ПЗ (или С)	ЛР	самостоятельная работа студентов
1.	Квантовая система, ее состояния.	4	4		8
2.	Основные положения квантовой механики	12	12		10
3.	Матрицы в квантовой механике.	4	4		4
4.	Простейшие случаи движения микрочастиц	10	10		10
5.	Уравнение Паули	4	4		8
6.	Предельный переход к классической механике	6	4		6
7.	Теория стационарных возмущений в дискретном спектре	4	2		4
8.	Фазовая теория рассеяния в	8	4		6

	центрально-симметричном поле				
9.	Излучение, поглощение и рассеяние света атомными системами	8	4		5
10.	Системы из тождественных микрочастиц	4	2		3
11.	Квантование свободного электромагнитного поля	4	1		3

Практические занятия (семинары)

№ п/п	№ раздела дисциплины	Наименование практических занятий (семинаров)
1.	1	Корпускулярные свойства э/м излучения (решение задач).
2.	1	Волновые свойства частиц по гипотезе де Бройля (решение задач).
3.	2	Транспонирование, комплексное и эрмитово сопряжение линейных операторов (решение задач).
4.	2	Собственные функции и собственные значения самосопряженных операторов. Нормировка собственных функций (решение задач).
5.	2	Вычисление средних значений и дисперсий линейных операторов (решение задач).
6.	2	Коммутаторы, средние значения операторов координаты и импульса (решение задач).
7.	2	Вычисление вероятности значений физических величин (решение задач).
8.	2	Уравнения движения динамических переменных (решение задач).
9.	3	«х»-, «р»- и «Е»-представления. Унитарные операторы (решение задач).
10.	4	Состояния частицы в потенциальной яме с бесконечно высокими стенками и стенкой конечной глубины (решение задач).
11.	4	Состояния частицы в поле гармонического осциллятора (решение задач).
12.	4	Коммутационные свойства оператора момента импульса (решение задач).
13.	4	Квантовый ротатор (решение задач).
14.	4	Уровни энергии и волновые функции атома водорода (решение задач).
15.	5	Формализм спина $s=1/2$. Алгебра спиновых матриц (решение задач).
16.	5	Собственные векторы матриц Паули (решение задач).
17.	6	Вычисление энергии стационарных состояний в квазиклассическом приближении для потенциальной ямы и гармонического осциллятора
18.	6	Вычисление коэффициентов прохождения и отражения для потенциальных барьеров различных форм.
19.	7	Вычисление поправок к собственным функциям и собственным значениям в первых двух порядках теории возмущений.
20.	8	Вычисление амплитуды и полного сечения рассеяния в борновском приближении.

21.	8	Вычисление сечений рассеяния по формуле Резерфорда.
22.	9	Вычисление вероятностей переходов между состояниями системы в первых двух порядках теории возмущений.
23.	10	Вычисление времени жизни и ширины возбужденных состояний атомов.
24.	11	Построение волновых функций систем одинаковых бозонов и фермионов. Расчет энергии и потенциала ионизации основного состояния двухэлектронных атомов (ионов) по теории возмущений.

Содержание разделов дисциплин

1. Квантовая система, ее состояния. Основы квантовой теории. Физические предпосылки квантовой механики. Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Эффект Комптона. Теория Н. Бора. Волны де Бройля. Волновой пакет. Фазовая и групповая скорости. Волновая функция частицы и ее статистическое истолкование. **Принцип суперпозиции.**

2. Основные положения квантовой механики. Линейные самосопряженные операторы. Собственные значения и собственные функции операторов. Представление динамических переменных посредством операторов. Коммутация операторов. Полный набор физических величин. Соотношения неопределенностей. **Неравенства Гейзенберга.** Стационарное и зависящее от времени **уравнения Шредингера.** Стационарные состояния. Изменение средних со временем. Теоремы Эренфеста.

3. Матрицы в квантовой механике. Представление операторов матрицами и действия над ними. Определение среднего значения и спектра величины, представленной оператором в матричной форме. Уравнение Шредингера в матричной форме. Матрица плотности. Унитарные преобразования. **Изометрия.**

4. Простейшие случаи движения микрочастиц. Одномерный гармонический осциллятор, его спектр и волновые функции. Движение в поле центральной силы. Ротатор. Четность. Спектр и волновые функции атома водорода.

5. Уравнение Паули. Оператор спина электрона. Спиновые функции. Движение электрона в однородном магнитном поле: прецессия спина, расщепление спектральных линий.

6. Предельный переход к классической механике. Квазиклассическое приближение (метод Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна). Правила квантования Бора-Зоммерфельда. Прохождение микрочастиц через потенциальные барьеры.

7. Теория стационарных возмущений в дискретном спектре. Теория возмущений в случае невырожденных и вырожденных собственных значений. Снятие вырождения. Нестационарная теория возмущений.

8. Фазовая теория рассеяния в центрально-симметричном поле. Квантовое описание рассеяния. Амплитуда и сечение рассеяния. Борновское приближение. Формула Резерфорда. Фаза рассеянных волн и эффективное сечение. Матрица рассеяния. Общий случай рассеяния. Оптическая теорема.

9. Излучение, поглощение и рассеяние света атомными системами. Коэффициенты излучения и поглощения. Вероятность квантовых переходов. Правила отбора для дипольного излучения. Теория дисперсии и комбинационного рассеяния.

10. Системы из тождественных микрочастиц. Принцип тождественности микрочастиц. Симметричные и антисимметричные состояния. Бозе и Ферми частицы. Принцип Паули. Вторичное квантование.

11. Квантование свободного электромагнитного поля. Уравнения Максвелла и решение волнового уравнения. Обобщенные координаты и импульсы. Канонические перестановочные соотношения. Операторы рождения и уничтожения. Гамильтониан квантовомеханической системы, взаимодействующей с квантованным электромагнитным полем.

6. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

Основная литература

1. Д.И. Блохинцев. *Основы квантовой механики*. М.: “Лань”, 2004.
2. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Квантовая механика. Нерелятивистская теория*. Т. III, М.: “Наука”, 2004.
3. И.Е. Иродов. *Квантовая физика. Основные законы*. М.: “Лаборатория Базовых Знаний”, 2010. **Книгофонд**
4. И.Е. Иродов. *Задачи по квантовой физике*. М.: “Лаборатория Базовых Знаний”, 2002.

Дополнительная литература

1. А. С. Давыдов. *Квантовая механика*. М.: “Наука”, 1963.
2. В.М. Галицкий, Б.М. Карнаков, В.И. Коган. *Задачи по квантовой механике*. М.: “Наука”, 1981.

7. Технические и электронные средства обучения

В ходе изучения курса предусмотрено использование компьютера для выполнения расчетов с применением программных пакетов MathCAD.

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

(указываются специализированные лаборатории и классы, основные приборы, установки)

Специализированный класс, оборудованный компьютерами с программным обеспечением MathCAD и мультимедийным оснащением.

9. Формы контроля

Перечень примерных контрольных вопросов и заданий для самостоятельной работы:

1. Физические предпосылки квантовой механики. Фотоэффект и рассеяние Комптона.
2. Волны де Бройля и их статистическое толкование. Фазовая и групповая скорости.
3. Представление динамических переменных посредством операторов. Операторы координаты, импульса и момента импульса микрочастицы.
4. Средние значения. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.
5. Уравнение Шредингера. Стационарные состояния.
6. Изменение динамических переменных во времени. Квантовые уравнения Гамильтона.
7. Переход от квантовых уравнений движения к классическим. Теоремы Эренфеста.
8. Линейный гармонический осциллятор. Четность волновых функций.
9. Осциллятор в представлении чисел заполнения. Операторы рождения и уничтожения.
10. Собственные функции и собственные значения ротатора.
11. Движение в поле центральных сил. Сохраняющиеся величины.
12. Водородоподобный атом. Уровни энергии и волновые функции электрона в кулоновском поле.
13. Матричное представление операторов. Унитарные преобразования.
14. Оператор спина электрона и спиновые функции.
15. Уравнение Паули. Движение электрона в однородном магнитном поле.
16. Квазиклассическое приближение.
17. Правила квантования Бора-Зоммерфельда.
18. Стационарная теория возмущений: вырожденный и невырожденный случаи.
19. Амплитуда и сечение упругого рассеяния в борновском приближении.
20. Упругое рассеяние атомами быстрых заряженных микрочастиц. Формула Резерфорда.

21. Точная теория упругого рассеяния. Парциальные волны: амплитуда и сечение рассеяния.
22. Матрица рассеяния для упругого и неупругого рассеяния. Оптическая теорема.
23. Нестационарная теория возмущений.
24. Поглощение и излучение света. Коэффициенты излучения и поглощения.
25. Правила отбора для дипольного излучения.
26. Прохождение микрочастиц через потенциальные барьеры.
27. Принцип тождественности микрочастиц. Симметричные и антисимметричные состояния.
28. Частицы Бозе и частицы Ферми. Принцип Паули.

Задачи к зачету по квантовой механике ч. I

1. Для операторов \hat{p}_x , \hat{T}_a , \hat{M}_z , \hat{I} , $\hat{M}_z = i\frac{\partial}{\partial \phi}$ найти эрмитово сопряжённые, транспонированные, обратные, сопряжённые, с.ф. и с.л., ядра.
2. Вычислить коммутаторы $[\hat{l}_i; \hat{l}_j]$, $[\hat{l}_i; \hat{x}_j]$, $[\hat{l}_i; \hat{p}_j]$, $[\hat{l}_i; \hat{I}^2]$, $[\hat{l}_i; \hat{H}]$ для свободной частицы, частицы в однородном поле, в поле осциллятора $U(x) = \frac{m\omega^2 x^2}{2}$.
3. Для свободной частицы в состоянии с волновой функцией при $t = 0$: $\psi(x) = C \exp\{ipx/\hbar - (x - x_0)^2/2a^2\}$ найти средний импульс, координату и их флуктуации в начальный момент времени, проверить соотношение неопределённости. Найти зависимость волновой функции от времени. Вычислить средние значения координаты, импульса, их флуктуаций и проверить соотношение неопределённости в произвольный последующий момент времени.
4. Для частицы в бесконечной прямоугольной яме найти спектр и собственные волновые функции. Вероятности для различных энергий в состояниях с в.ф. $\psi_1(x) = Ax(x-a)$, $\psi_2(x) = B \sin^2(\frac{\pi x}{a})$, среднюю энергию, её флуктуацию; средние координату и импульс, их флуктуации в этих и в стационарных состояниях.
5. Найти собственные функции и ядро оператора импульса в координатном представлении. На примере ямы постоянной силы показать переход в уравнении Шредингера из координатного в импульсное представление. Найти волновую функцию $\phi(p)$ для ямы постоянной силы в импульсном представлении. Получить из $\phi(p)$ волновую функцию в координатном представлении. Показать, что это функция Эйри.
6. Найти волновые функции и уровни энергии частицы в конечной прямоугольной потенциальной яме глубиной U_0 и шириной a .
7. Найти приближённое значение энергии основного состояния частицы в бесконечной прямоугольной яме ширины a , ($x \in (0, a)$) вариационным методом, используя пробные функции $\Psi_1(x) = Ax(x-a)$, $\Psi_2(x) = B \sin^2(\pi x/a)$, $\Psi_3(x) = C(a/2 - |x - a/2|)$. Какая из этих функций и по какой причине даёт наиболее близкое к правильному значение энергии? Оценить энергию первого возбуждённого состояния в той же яме, взяв какую-нибудь пробную функцию с одним нулём на интервале $x \in (0, a)$.
8. Для частицы в периодическом потенциале вида $U(x) = \alpha \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - na)$ (идеальный бесконечный одномерный "кристалл") найти спектр энергий и волновые функции.
9. Доказать независимость значения коэффициента отражения при данной энергии от направления падения частиц на потенциал. Продемонстрировать это свойство в явном виде на примере прохождения с разных сторон барьеров вида $U_1(x) = \alpha\delta(x)$, $U_2(x) = \{U_0, x \geq 0; 0, x < 0\}$.
10. Для одномерного гармонического осциллятора найти матричные элементы координаты и импульса, их квадратов. Разобраться с вычислением средних от координат и импульсов в какой-либо степени в каком-либо стационарном состоянии осциллятора.
11. Найти кратности вырождения энергетических уровней в одномерном гармоническом осцилляторе, на который наложено однородное поле, в двумерном и трёхмерном гармоническом осцилляторе.
12. Показать, как получаются выражения для операторов проекций момента импульса на оси x, y, z из выражений для оных в декартовых координатах переходом в сферические координаты, показать, как угловая часть лапласиана связана с оператором квадрата момента.
13. Для частицы с угловой зависимостью волновой функции в трёхмерном пространстве $\psi(\theta, \phi) = A(1 + 2\cos^2\theta + 3\cos\theta \sin\theta e^{-i\phi})$ найти возможные значения проекций момента и квадрата момента, их вероятности и средние значения.
14. Частица находится в состоянии с определёнными значениями $l^2 = 6\hbar$ и $l_z = 2\hbar$. Какие значения может принимать при этом l_x и с какими вероятностями? Задачу решить двумя способами: разложением сферической функций по базису в новых координатах и матричным методом в l_z -представлении.
15. Найти среднее расстояние и его флуктуацию между электроном и ядром в атоме водорода в основном и первом возбуждённом состояниях. Найти среднее значение радиальной проекции импульса и объяснить полученный результат.
16. Найти полярный и азимутальный углы оси, на которую проекция спина в состоянии с в.ф. $\Psi = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ e^{i\phi} \sin \alpha \end{bmatrix}$ имеет определённые значения $+1/2$ и $-1/2$.

Перечень вопросов, выносимых на экзамен

1. Гипотеза Планка в теории теплового излучения.
2. Фотоэффект. Уравнение Эйнштейна.
3. Эффект Комптона.
4. Теория Н. Бора.
5. Волны де Бройля и их статистическое толкование. Фазовая и групповая скорости.
6. Вероятностная интерпретация волновой функции. Принцип суперпозиции состояний.
7. Представление динамических переменных посредством операторов. Собственные значения и собственные функции линейных операторов. Нормировка, ортогональность и полнота собственных функций.
8. Операторы координаты, импульса и энергии. Канонические коммутационные соотношения.
9. Постулаты квантовой механики. Вычисление средних значений динамических переменных.
10. Условие одновременной измеримости различных динамических переменных. Полный набор наблюдаемых.
11. Соотношения неопределенностей Гейзенберга между произвольными физическими величинами. Интерпретация соотношений неопределенностей для координаты и импульса, энергии и времени.
12. Стационарное уравнение Шредингера. Ортогональность собственных функций.
13. Уравнение Шредингера, зависящее от времени. Плотность заряда и плотность тока.
14. Изменение динамических переменных во времени. Квантовые уравнения Гамильтона. Интегралы движения.
15. Переход от квантовых уравнений движения к классическим. Теоремы Эренфеста.
16. Частица в прямоугольной потенциальной яме. Квантование энергии.
17. Линейный гармонический осциллятор. Четность волновых функций.
18. Оператор момента импульса. Собственные функции и собственные значения. Пространственный ротатор.
19. Движение в поле центральных сил. Сохраняющиеся величины.
20. Водородоподобный атом. Уровни энергии и волновые функции электрона в кулоновском поле. Степень вырождения энергетических уровней электронов.

21. Матричное представление операторов. Среднее значение и спектр оператора. Унитарные преобразования операторов от одного представления к другому.
22. Оператор спина электрона и спиновые функции.
23. Уравнение Паули. Движение электрона в однородном магнитном поле. Прецессия спина.
24. Метод Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна.
25. Правила квантования Бора-Зоммерфельда.
26. Стационарная теория возмущений в случае невырожденных собственных значений. Поправки к собственным функциям и собственным значениям.
27. Стационарная теория возмущений в случае вырожденных собственных значений. Снятие вырождения.
28. Постановка задачи в теории столкновений микрочастиц. Дифференциальное сечение рассеяния.
29. Амплитуда и сечение рассеяния в борновском приближении.
30. Упругое рассеяние атомами быстрых заряженных микрочастиц. Формула Резерфорда.
31. Нестационарная теория возмущений. Поправки к волновым функциям.
32. Поглощение и излучение света атомными системами. Вероятности излучения и поглощения. Время жизни и ширина уровня.
33. Правила отбора для дипольного излучения в случае квантового осциллятора и оптического электрона атома.
34. Прохождение микрочастиц через потенциальные барьеры. Коэффициенты прохождения и отражения. Туннельный эффект.
35. Принцип тождественности микрочастиц. Симметричные и антисимметричные состояния. Принцип Паули.
36. Волновые функции для системы частиц Ферми и частиц Бозе. Обменная энергия взаимодействия электронов.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ

Рабочей программой дисциплины «Квантовая механика» предусмотрена самостоятельная работа студентов в объеме 107 часов.

Самостоятельная работа проводится с целью углубления знаний по дисциплине и предусматривает:

- изучение отдельных разделов тем дисциплины;
- чтение студентами рекомендованной литературы и усвоение теоретического материала дисциплины;
- выполнение домашних заданий;
- работу с Интернет-источниками;
- подготовку к различным формам контроля.

Последовательность всех контрольных мероприятий изложена в календарном плане, который доводится до сведения каждого студента в начале семестра, а также размещен на сайте кафедры.

Планирование времени на самостоятельную работу, необходимого на изучение настоящей дисциплины, студентам лучше всего осуществлять на весь семестр, предусматривая при этом регулярное повторение пройденного материала. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо регулярно дополнять сведениями из литературных источников, представленных в рабочей программе.

По каждой из тем для самостоятельного изучения, приведенных в рабочей программе дисциплины «Квантовая механика», следует сначала прочитать рекомендованную литературу и при необходимости составить краткий конспект основных положений, терминов, сведений, требующих запоминания и являющихся основополагающими в этой теме и для освоения последующих разделов курса.

Для расширения знаний по дисциплине рекомендуется использовать Интернет-ресурсы: проводить поиск в различных системах и использовать материалы сайтов, рекомендованных преподавателем на лекционных занятиях.

МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ КОНТРОЛЕ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ

1. Устный опрос на лекционных занятиях.
2. Проверка выполнения домашних заданий на практических занятиях.

ПРИЛОЖЕНИЕ

К УМК приложены распечатанные слайды лекций.