

Программа курса
«Теоретическая физика»
для студентов-биофизиков
(4-й семестр, 44 часа)

Элементы вариационного исчисления.

Уравнение Эйлера. Частные интегралы уравнения Эйлера. Задачи на применение вариационного исчисления: кратчайшее расстояние между двумя точками на плоскости и на сфере, минимальная поверхность вращения, задача о брахистохроне.

Вариационные принципы классической механики.

Связи и их классификация. Обобщенные координаты и степени свободы. Принцип виртуальной работы и принцип Даламбера. Интегральный принцип Гамильтона для консервативных систем (принцип наименьшего действия).

Формализм классической механики

Уравнение Лагранжа. Функция Лагранжа. Обобщенная энергия (гамильтониан). Уравнения Гамильтона и Гамильтона – Якоби. Теорема Клаузиуса о вириале сил.

Обобщенно-потенциальные силы*.

Сила Лоренца. Вывод лагранжиана для заряженной частицы в электромагнитном поле. Диссипативная функция Рэля.

Система материальных точек.

Центр масс. Законы сохранения импульса, момента импульса и энергии для системы материальных точек.

Задача двух тел.

Общее решение задачи двух тел в квадратурах. Секторная скорость. Условия падения частицы на центр. Циклические координаты. Эффективная энергия. Качественный анализ кеплеровой задачи.

Малые колебания систем со многими степенями свободы.

Система двух связанных осцилляторов. Нормальные координаты и нормальные колебания. Связанность. Колебания трехатомной молекулы. Форма колебания. Кристаллы. Трансляционная инвариантность. Колебания кристаллической решетки. Фононы.*

Нелинейные колебания.

Метод последовательных приближений в решении ангармонического осциллятора с кубической нелинейностью. Неизохронность нелинейного осциллятора. Резонанс в случае нелинейного осциллятора. Переходный процесс установления колебаний.

Параметрические и автоколебательные системы.

Параметрическое воздействие на колебательные системы. Уравнение Хилла и уравнение Матьё. Параметрический резонанс. Определение и классификация автоколебательных систем. Общие характеристики. Автоколебательная система при внешнем гармоническом воздействии.

Колебания в распределенных системах.

Свободные и вынужденные колебания струны при различных граничных условиях (условиях закрепления концов струны). Колебания пластин. Электрические колебания в проводах (телеграфные уравнения).

Звуковые волны

Идеальная жидкость. Плоские звуковые волны в идеальной жидкости и газах. Скорость звука. Вязкая жидкость Уравнение Навье – Стокса. Звуковые волны в вязкой жидкости. Затухание звука. Дисперсия скорости звука. Поток энергии. Эффект Доплера. Источники звуковых волны.

Электромагнитные волны.

Уравнения Максвелла. Волновое уравнение. Электромагнитные волны в непроводящих и проводящих средах. Показатели поглощения и преломления. Поток энергии. Поляризация. Отражение и преломление на плоской границе. Граничные условия. Дисперсия. Волновой пакет. Эволюционное уравнение для огибающей в 1-м и 2-м приближении теории дисперсии. Фазовая и групповая скорости. Источники электромагнитного излучения. Излучение осциллирующего электрического диполя.

Предельный переход к геометрической оптике.

Принцип Ферма. Радиус кривизны светового луча. Уравнение эйконала и его физический смысл.

Диэлектрическая проницаемость.

Поляризация. Поляризуемость. Формула Клаузиуса – Моссоти. Полярные молекулы. Диэлектрическое насыщение. Функция Ланжевена. Формула Дебая. Теория Онзагера. Теория Кирквуда. Проблема статической диэлектрической проницаемости воды и льда.

Спектры. Релаксация. Рефракция.

Теория Лоренца. Форма полосы спектра поглощения. Теория Дебая диэлектрической релаксации полярных диэлектриков.

Неинерциальные системы отсчета*.

Силы инерции при ускоренном поступательном и вращательном движении системы отсчета. Сила Кариолиса. Маятник Фуко. Приливы. Обобщенный закон Галилея и гравитационная масса. Принцип эквивалентности гравитационных сил и сил инерции. Гравитационное смещение спектральных линий.

Основы специальной теории относительности*.

Пространство и время в механике Ньютона. Эфир. опыты Физо. Опыт Майкельсона – Морли. Обобщение преобразования Галилея. Относительность одновременности. Попытки «спасения» гипотезы эфира: гипотеза увлечения, гипотеза источника. Теория Лоренца. Постулат Эйнштейна. Релятивистская динамика частиц. Закон сохранения импульса. Сила и энергия в специальной теории относительности.

Основы квантовой механики.

Возникновение квантовых представлений

Корпускулярно – волновой дуализм. Основные экспериментальные факты, попытка интерпретация которых привела к возникновению корпускулярно – волнового дуализма: спектр излучения абсолютно черного тела, фотоэффект, эффект Комптона, гипотеза Л. Де Бройля и опыты по дифракции электронов.

Опτικο-механическая аналогия. Движение материальной точки и волновой процесс (аналогия).

Волны материи. Волновые пакеты. Фазовая и групповая скорости. Временная и пространственная локализации волновых пакетов. Соотношение неопределенностей как проявление волновых свойств частиц. Расплывание волновых пакетов.

Уравнение Шредингера

Уравнение Гамильтона – Якоби для дебройлевских волн. Введение операторов. Волновая функция. Уравнение Шредингера. Стационарные состояния. Физический смысл волновой функции. Статистическая интерпретация. Плотность и ток вероятности. Принцип линейной суперпозиции состояний. Нормировка.

Математический аппарат квантовой механики

Линейные операторы в теории Шредингера. Среднее значение оператора. Наблюдаемые величины. Самосопряженные операторы. Операторы координаты, импульса и момента импульса. Произведение операторов. Коммутатор. Собственные функции и собственные значения операторов. Дискретный и непрерывный спектр собственных значений. Нормировка волновых функций в случаях дискретного и непрерывного спектров по методу Борна. Собственные функции и собственные значения операторов импульса, проекции момента импульса и квадрата полного момента. Свойства собственных функций операторов. Ортогональность и полнота системы собственных функций. Нормировка волновой функции на δ – функцию в случае непрерывного спектра (метод Дирака). Вывод соотношения неопределенностей. Принцип дополнительности Бора. Оператор инверсии. Закон сохранения четности.

Модель прямоугольных потенциалов

Решение уравнения Шредингера для прямоугольных потенциалов. Граничные условия для волновой функции. Системы: прямоугольная ступенька высоты U_m ($E > U_m$, $E < U_m$); прямоугольный барьер высоты U_m ($E > U_m$, $E < U_m$); прямоугольная потенциальная яма конечной глубины U_m ($E > U_m$, $E < U_m$). Коэффициент прозрачности барьера (туннельный эффект). Дискретный спектр оператора энергии для бесконечно глубокой ямы.

Точно решаемые задачи

Гармонический осциллятор. Собственные функции. Энергетический спектр. Нулевые колебания. Представление чисел заполнения.

Центральное поле. Движение частицы в поле центральных сил. Операторы проекции момента и квадрата момента. Сферический ротатор. Теория водородоподобного атома. Собственные функции, энергетический спектр.

Квазиклассическое приближение

Метод ВКБ. Туннельный эффект. Формула Гамова.

Методы приближенного решения

Стационарная теория возмущений. Методы приближенного решения уравнения Шредингера. Стационарная теория возмущений для невырожденных систем. Стационарная теория возмущений для вырожденных систем.

Вариационный метод. Понятие о вариационных методах в квантовой механике. Метод Ритца.

Нестационарная теория возмущений (теория переходов). «Золотое» правило Ферми. Правила отбора для дипольных переходов.

Элементарная теория излучения.

Спонтанные и вынужденные переходы. Коэффициенты Эйнштейна. Правила отбора. Вывод формулы Планка по Эйнштейну. Спектр излучения. Форма линии. Распад возбужденного состояния квантовой системы. Правила отбора для дипольных переходов.

Спин

Открытие спина. Магнетон Бора. Оператор спина. Уравнение Паули. Свойства матриц Паули. Понятие об ЭПР. Уравнение Шредингера для системы, состоящей из тождественных частиц. Симметричные и антисимметричные волновые функции.

Многоэлектронные атомы и периодический закон*

Схема Юнга. Многоэлектронные атомы. Векторная модель атома. Векторное сложение двух моментов количества движения. Периодическая система химических элементов Менделеева.

Элементарная теория химических сил*.

Модель иона молекулы водорода.

Примечание. Пункты программы, отмеченные звездочкой*, являются факультативными. В лекционный материал эти пункты включаются при условии достаточности времени.

Список литературы

1. Г. Голдстейн. Классическая механика. М.: Наука, 1975. – 416 с.
2. И. И. Ольховский. Курс теоретической механики для физиков. М.: МГУ, 1978. – 575 с.

3. Г. С. Горелик. Колебания и волны. М.: ГИФМЛ, 1959. – 572 с.
4. В. В. Мигулин, В. И. Медведев, Е. Р. Мустель, В. Н. Парыгин. Основы теории колебаний. М.: Наука, 1988. – 392 с.
5. М. Б. Виноградова, О. В. Руденко, А. П. Сухоруков. Теория волн. М.: Наука, 1979. – 383 с. (Глава 1.).
6. И. Е. Тамм Основы теории электричества. М.: Наука, 1976. – 616 с.
7. В. Браун. Диэлектрики. М.: ИЛ, 1961. – 326 с.
8. Д. В. Сивухин. Общий курс физики. Т.1. Механика. М.: Наука, 1979. – 519 с.
9. Д. В. Сивухин. Общий курс физики. Т.4. Оптика. М.: Наука, 1980. – 752 с.
10. А. Р. Хиппель. Диэлектрики и волны. М.: ИЛ, 1960 – 438 с.
11. Д. Бом. Специальная теория относительности. м.: Мир, 1967. – 285 с.
12. П. Девис. Пространство и время в современной картине Вселенной. М.: Мир, 1979. – 288 с.
13. П. М. Красильников. Основы квантовой механики. Электронный вариант курса лекций находится по адресу: <http://erg.biophys.msu.ru/wordpress/study>
14. П. М. Красильников. Задачи по квантовой механике. Электронный вариант сборника задач находится по адресу: <http://erg.biophys.msu.ru/wordpress/study>
15. М. Борн. Атомная физика. М.: Мир, 1979. – 484 с.
16. Э. В. Шпольский. Атомная физика. (в 2-х томах). М.: Наука, 1974. Т.1. – 576 с., Т.2. – 448 с.
17. Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 8 и 9. Квантовая механика. М.: Мир, 1978. – 523 с.
18. А. С. Давыдов. Квантовая механика. М.: ГИФМЛ, 1963. – 748 с.
19. А. А. Соколов, И. М. Тернов, В. Ч. Жуковский. Квантовая механика. М.: Наука, 1979. – 528 с.
20. Д. Бом. Квантовая теория. М.: ГИФМЛ, 1961. – 728 с.
21. Д. В. Сивухин. Общий курс физики. Т.5. Часть 1. Атомная физика. М.: Наука, 1986. – 416 с.
22. Сборник задач по биофизике. Под ред. А. Б. Рубина. М.: КДУ, 2011. – 184 с. Раздел 3. Молекулярная биофизика.
23. И. И. Гольдман, В. Д. Кривченков. Сборник задач по квантовой механике. М.: УНЦ ДО, 2001. – 276 с.

Промежуточная аттестация

В качестве промежуточной аттестации проводится три контрольные работы, которые содержат задачи по следующим темам:

- кинематика материальной точки в различных ортогональных координатах;
- уравнения движения; законы сохранения;
- движение заряженной частицы в скрещенных электрическом и магнитном полях;
- качественное исследование движения частицы в центральных полях;
- малые колебания систем с одной и двумя степенями свободы;
- нелинейные колебания с квадратичной и кубической нелинейностями;
- отражение, преломление, интерференция волн; дифракционная решетка;
- диполь в электрическом поле;
- излучение абсолютно черного тела;
- волновые пакеты;
- свойства операторов;
- нормировка волновых функций;
- прямоугольные потенциалы;
- расчет проницаемости потенциального барьера по формуле Гамова;

- гармонический осциллятор и свойства полиномов Эрмита;
- квантовый ротатор и сферические функции;
- квантовые переходы и спектры.

Список экзаменационных вопросов

1. Законы сохранения для системы материальных точек. Центр масс.
2. Вывод уравнения Лагранжа из принципа виртуальной работы.
3. Вывод лагранжиана для заряженной частицы в электромагнитном поле.
4. Обобщенная энергия. Теорема Клаузиуса о вириале сил.
5. Интегральный принцип Гамильтона для консервативных систем. Действие.
6. Вывод уравнения Лагранжа из принципа наименьшего действия.
7. Задача двух тел.
8. Система двух связанных осцилляторов. Связанность.
9. Метод последовательных приближений на примере осциллятора с квадратичной и кубической нелинейностью.
10. Параметрические и автоколебательные системы. Параметрический резонанс.
11. Упругие волны. Волновое уравнение для распространения звука в вязкой среде.
12. Волновое уравнение для электромагнитных волн в проводящей среде.
13. Волновой пакет. Фазовая и групповая скорости.
14. Формула Клаузиуса – Моссоти.
15. Функция Ланжевена.
16. Формула Дебая.
17. Лоренцева форма полосы поглощения.
18. Силы инерции при ускоренном поступательном и вращательном движении системы отсчета
19. Спектральная плотность излучения абсолютно черного тела. Формула Планка.
20. Теория эффекта Комптона.
21. Временная и пространственная локализация волновых пакетов.
22. Расплывание волновых пакетов.
23. Плотность и ток вероятности. Стационарное уравнение Шредингера.
24. Среднее значение операторов. Самосопряженные операторы. Коммутатор.
25. Собственные функции и собственные значения операторов.
26. Нормировка волновых функций в случае непрерывного спектра.
27. Квантовый гармонический осциллятор.
28. Квантовый сферический ротатор.
29. Стационарная теория возмущений.
30. Двухуровневая система.
31. Вариационный метод.
32. Нестационарная теория возмущений. «Золотое правило» Ферми.
33. Квантовые переходы. Правила отбора для дипольных переходов.
34. Открытие спина элементарных частиц.
35. Тождественность элементарных частиц, принцип запрета Паули и таблица Менделеева.