



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Программа дисциплины «Специальная дисциплина» для подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия», образовательной программе Физика и астрономия

Правительство Российской Федерации

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"**

Программа дисциплины «Специальная дисциплина»

для подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре
по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия»
образовательная программа «Физика и астрономия»

Одобрена на заседании Академического совета аспирантской школы по физике, протокол
№ 5 от 12.10.2018

Москва – 2018

Настоящая программа не может быть использована другими подразделениями университета и другими вузами без разрешения разработчика программы.



ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Настоящая программа учебной дисциплины устанавливает минимальные требования к знаниям и умениям аспирантов, обучающихся в аспирантуре Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (далее - НИУ ВШЭ), и определяет содержание и виды учебных занятий и отчетности.

Программа предназначена для преподавателей, ведущих данную дисциплину и аспирантов.

Программа разработана в соответствии с:

- Образовательным стандартом НИУ ВШЭ подготовки научно-педагогических кадров по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия»
- Образовательной программой «Физика и астрономия»
- Учебным планом образовательной программы «Физика и астрономия»

ЦЕЛИ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью дисциплины является подготовка к сдаче и сдача кандидатского экзамена по специальности в соответствии с научной специальностью подготавливаемой научно-квалификационной работы (диссертации). Задачей является освоение материала в соответствии с программой экзамена по научной специальности подготавливаемой диссертации.

Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

В результате освоения дисциплины аспирант должен:

Знать: современные научные достижения и новые идеи, методы выполнения исследований в области диссертации

Уметь: критически анализировать и оценивать современные научные достижения, генерировать новые идеи при решении исследовательских и практических задач

Иметь навыки (приобрести опыт): критического анализа научных достижений, выполнения исследований в области диссертации

В результате освоения дисциплины аспирант приобретает следующие компетенции:

| Компетенция (указываются в соответствии с ОС НИУ ВШЭ) | Код по ОС НИУ ВШЭ | Дескрипторы – основные признаки освоения (показатели достижения результата) | Формы и методы обучения, способствующие формированию и развитию компетенции |
|--|-------------------|---|---|
| способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в | УК-1 | демонстрация навыков в процессе экзамена | освоение программы и подготовка к экзамену |



| | | | |
|--|--------|--|--|
| том числе в междисциплинарных областях | | | |
| способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области теоретической и прикладной физики с использованием современных физических методов исследования и информационно-коммуникационных технологий | ОПК-1 | демонстрация навыков в процессе экзамена | освоение программы и подготовка к экзамену |
| способность выполнять исследования в области физики в соответствии с научной специальностью диссертационного исследования | ПК-1-5 | демонстрация навыков в процессе экзамена | освоение программы и подготовка к экзамену |

МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

Настоящая дисциплина относится к обязательным дисциплинам вариативной части образовательной программы и осваивается на 2 году обучения в аспирантуре.

Программа «Специальная дисциплина» дифференцирована по областям знания научных специальностей образовательной программы. Аспирант осваивает один из блоков и сдает кандидатский экзамен по одному из блоков в соответствии с научной специальностью его научно-квалификационной работы (диссертации).

Научная специальность диссертации утверждается Академическим советом аспирантской школы на первом году обучения.

Для каждого блока предусмотрены тематический план, перечень вопросов к кандидатскому экзамену и учебно-методическое и информационное обеспечение.

| | | |
|--|---|--|
| Научная специальность, по которой подготавливается диссертация | Область знания научных специальностей образовательной программы | Тематический план, перечень вопросов к кандидатскому экзамену и учебно-методическое обеспечение. |
| Теоретическая физика | Теоретическая физика | Блок 1 |



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Программа дисциплины «Специальная дисциплина» для подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия», образовательной программе Физика и астрономия

| | | |
|------------------------------------|------------------------------------|--------|
| Физика конденсированного состояния | Физика конденсированного состояния | Блок 2 |
| Физика низких температур | Физика низких температур | Блок 3 |
| Оптика | Оптика | Блок 4 |



БЛОК 1 «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА»

Тематический план и виды учебной работы

| № | Название темы | Всего часов | Аудиторные часы | | Самостоятельная работа |
|---|---|-------------|-----------------|----------|------------------------|
| | | | Лекции | Семинары | |
| | Подготовка к сдаче кандидатского экзамена по специальности | | - | - | 2,5 |
| 1 | Механика | | - | - | 5 |
| 2 | Теория поля | | - | - | 5 |
| 3 | Электродинамика сплошных сред | | - | - | 5 |
| 4 | Механика сплошных сред и физическая кинетика | | - | - | 5 |
| 5 | Квантовая механика | | - | - | 5 |
| 6 | Статистическая физика | | - | - | 5 |
| 7 | Теория конденсированного состояния / Квантовая теория полей | | - | - | 5 |
| | Сдача кандидатского экзамена по специальности | | | 0,5 | - |
| | Итого | 38 | | | 37,5 |

Содержание (программа кандидатского экзамена)

1. Механика

1. Уравнения движения. Обобщенные координаты, принцип наименьшего действия, функция Лагранжа. Симметрии. Теорема Нетер. Законы сохранения энергии, импульса, момента импульса.

2. Интегрирование уравнений движения. Одномерное движение, приведенная масса, движение в центральном поле.

3. Распад частиц, упругие столкновения. Сечение рассеяния частиц, формула Резерфорда.

4. Малые колебания. Свободные и вынужденные одномерные колебания, параметрический резонанс. Колебания систем со многими степенями свободы, полярные координаты. Колебания при наличии трения.

5. Движение твердых тел. Угловая скорость, момент инерции и момент количества движения твердых тел. Эйлеровы углы и уравнение Эйлера.

6. Канонические уравнения, уравнение Гамильтона, скобки Пуассона, действие как функция координат, теорема Лиувилля, уравнение Гамильтона-Якоби, разделение переменных.

7. Принцип относительности. Скорость распространения взаимодействий. Интервал. Собственное время. Преобразование Лоренца. Преобразование скорости. Четырехмерные векторы. Четырехмерная скорость.

8. Релятивистская механика. Принцип наименьшего действия. Энергия и импульс. Распад частиц. Упругие столкновения частиц.

2. Теория поля



1. Заряд в электромагнитном поле. Четырехмерный потенциал поля. Уравнения движения заряда в поле, калибровочная (градиентная) инвариантность. Тензор электромагнитного поля. Преобразование Лоренца для поля. Инварианты поля.
 2. Действие для электромагнитного поля. Уравнения электромагнитного поля. Четырехмерный вектор тока. Уравнение непрерывности. Плотность и поток энергии. Тензор энергии-импульса. Тензор энергии-импульса электромагнитного поля.
 3. Постоянное электромагнитное поле. Закон Кулона. Электростатическая энергия зарядов. Дипольный момент. Мультипольные моменты. Система зарядов во внешнем поле. Постоянное магнитное поле. Магнитный момент. Теорема Лармора.
 4. Электромагнитные волны. Волновое уравнение. Плоские волны. Монохроматическая плоская волна. Спектральное разложение. Поляризация характеристики излучения. Разложение электростатического поля.
 5. Поле движущихся зарядов. Запаздывающие потенциалы. Потенциалы Лиенара-Вихерта. Излучение электромагнитных волн. Поле системы зарядов на далеких расстояниях. Мультипольное излучение. Излучение быстро движущегося заряда. Рассеяние свободными зарядами.
 6. Движение частицы в гравитационном поле. Метрика. Ковариантное дифференцирование. Символы Кристоффеля. Действие для частицы в гравитационном поле.
 7. Уравнения гравитационного поля. Тензор кривизны. Действие для гравитационного поля. Тензор энергии-импульса. Уравнения Эйнштейна.
 8. Нерелятивистский предел уравнений Эйнштейна. Закон Ньютона. Центральносимметричное гравитационное поле. Метрика Шварцшильда. Гравитационный коллапс.
 9. Наблюдаемые эффекты ОТО в ньютоновом и постньютоновом приближении (гравитационное красное смещение, отклонение луча света, задержка сигнала, прецессия гироскопа, прецессия орбит планет). Гравитационные линзы.
 10. Релятивистская космология. Открытая, закрытая и плоская модели. Закон Хаббла. Расширение Вселенной на радиационно-доминированной, пылевидной и вакуумдоминированной стадиях.
 11. Физические процессы в ранней Вселенной. Закалка нейтрино. Первичный нуклеосинтез. Рекомбинация, реликтовые фотоны.
3. Электродинамика сплошных сред
 1. Электростатика диэлектриков и проводников. Диэлектрическая проницаемость и проводимость. Термодинамика диэлектриков. Магнитные свойства. Постоянное магнитное поле. Магнитное поле постоянных токов. Термодинамические соотношения. Диа-, пара-, ферро- и антиферромагнетики.
 2. Сверхпроводники. Магнитные свойства. Сверхпроводящий ток. Критическое поле.
 3. Уравнения электромагнитных волн. Уравнения поля в отсутствие дисперсии. Дисперсия диэлектрической проницаемости. Соотношения Крамерса-Кронига. Плоская монохроматическая волна. Распространение электромагнитных волн. Отражение и преломление. Принцип взаимности.
 4. Электромагнитные волны в анизотропных средах. Эффекты Керра и Фарадея. Пространственная дисперсия. Естественная оптическая активность.
 5. Магнитная гидродинамика. МГД волны. Проблема динамо.
 6. Нелинейная оптика. Нелинейная проницаемость. Самофокусировка. Генерация второй гармоники.
 7. Ионизационные потери быстрых частиц. Излучение Черенкова. Рассеяние электромагнитных волн в средах. Рэлеевское рассеяние.
 4. Механика сплошных сред и физическая кинетика



1. Идеальная жидкость. Уравнение непрерывности. Уравнение Эйлера. Поток энергии. Поток импульса. Сохранение циркуляции скорости. Потенциальное обтекание тел: присоединенная масса, сила сопротивления, эффект Магнуса.
 2. Вязкая жидкость: уравнения движения вязкой жидкости. Диссипация энергии в несжимаемой жидкости.
 3. Переход к турбулентности. Неустойчивости ламинарных течений. Теория Ландау-Хопфа. Типы аттракторов. Странный аттрактор. Переход к турбулентности путем удвоения периодов. Развитая турбулентность. Спектр турбулентности в вязком интервале. Колмогоровский спектр.
 4. Звук. Звуковые волны. Геометрическая акустика.
 5. Одномерное движение сжимаемого газа. Характеристики. Инварианты Римана. Простая волна Римана. Образование ударных волн. Ударная адиабата. Слабые разрывы. Теория сильного взрыва.
 6. Ударные волны слабой интенсивности. Уравнение Бюргерса.
 7. Звуковые волны со слабой дисперсией. Уравнение КДВ. Солитоны и их взаимодействие. Бесстолкновительные ударные волны.
 8. Гидродинамика сверхтекучей жидкости. Двухжидкостное описание.
 9. Кинетическая теория газов. Кинетическое уравнение Больцмана. H -теорема. Теплопроводность и вязкость газов. Симметрии кинетических коэффициентов. Диффузионное приближение. Уравнение Фоккера-Планка.
 10. Бесстолкновительная плазма. Уравнения Власова. Диэлектрическая проницаемость бесстолкновительной плазмы. Затухание Ландау. Ленгмюровские и ионно-звуковые волны. Пучковая неустойчивость: гидродинамическая и кинетическая стадии. Квазилинейная теория.
 11. Столкновения в плазме. Интеграл столкновений Ландау. Длина пробега частиц в плазме.
- ### 5. Квантовая механика
1. Основные положения квантовой механики. Принцип неопределенности. Принцип суперпозиции. Операторы. Дискретный и непрерывный спектры. Гамильтониан. Стационарные состояния. Гейзенберговское представление. Соотношения неопределенности.
 2. Уравнение Шредингера. Основные свойства уравнения Шредингера. Одномерное движение. Одномерный осциллятор. Плотность потока. Квазиклассическая волновая функция. Прохождение через барьер.
 3. Момент количества движения. Собственные функции и собственные значения момента количества движения. Четность. Сложение моментов. Разложение Клебша-Гордана.
 4. Движение в центральном поле. Сферические волны. Разложение плоской волны. Радиальное уравнение Шредингера. Атом водорода.
 5. Теория возмущений. Возмущения, не зависящие от времени. Периодические возмущения. Квазиклассическая теория возмущений.
 6. Спин. Оператор спина. Тонкая структура атомных уровней.
 7. Тождественность частиц. Симметрия при перестановке частиц. Вторичное квантование для бозонов и фермионов. Обменное взаимодействие.
 8. Атом. Состояние электронов атома. Уровни энергии. С амосогласованное поле. Уравнение Томаса-Ферми. Тонкая структура томных уровней. Периодическая система Менделеева.
 9. Движение в магнитном поле. Уравнение Шредингера для движения в магнитном поле. Плотность потока в магнитном поле.



10. Столкновения частиц. Общая теория. Формула Бора. Резонансное рассеяние. Столкновение тождественных частиц. Упругое рассеяние при наличии неупругих процессов. Матрица рассеяния. Формула Брейта-Вигнера.

6. Статистическая физика

1. Основные принципы статистики. Функция распределения и матрица плотности. Статистическая независимость. Теорема Лиувилля. Роль энергии. Закон возрастания энтропии. Микроканоническое распределение. Распределение Гиббса. Распределение Гиббса с переменным числом частиц.

2. Термодинамические величины. Температура. Работа и количество тепла. Термодинамические потенциалы. Термодинамические неравенства. Принцип Ле-Шателье. Теорема Нернста. Системы с переменным числом частиц. Свободная энергия в распределении Гиббса. Вывод термодинамических соотношений.

3. Термодинамика идеальных газов. Распределение Больцмана. Столкновение молекул. Неравновесный идеальный газ. Закон равнораспределения. Одноатомный идеальный газ.

4. Распределение Ферми и Бозе. Вырожденный идеальный ферми-газ. Свойства вещества при больших плотностях. Вырожденный бозе-газ. Конденсация Бозе-Эйнштейна. Равновесное тепловое излучение. Формула Планка. Светимость абсолютно черного тела.

5. Неидеальные газы и конденсированные среды. Фононные спектры и термодинамические свойства газа. Термодинамические свойства неидеального классического газа.

6. Равновесие фаз. Формула Клапейрона-Клаузиуса. Критическая точка.

7. Системы с различными частицами. Правило фаз. Слабые растворы. Смесь идеальных газов. Смесь изотопов. Химические реакции. Условие химического равновесия. Закон действующих масс. Теплота реакции. Ионизационное равновесие.

8. Слабонеидеальный бозе-газ. Модель Боголюбова. Спектр возбуждений. Сверхтекучесть. Квантовые вихри.

9. Твердые тела. Кристаллические структуры. Поверхность Ферми. Зонная структура. Квазичастицы.

10. Колебания решетки. Теория упругости. Звук в твердых телах. Процессы распада и слияния фононов. Рассеяние фононов на примесях. Кинетическое уравнение для фононов. Теплопроводность.

11. Сверхпроводимость. Куперовское спаривание. Теория Бардина-Купера-Шриффера (БКШ). Теория Лондонов. Теория Гинзбурга-Ландау. Ток, калибровочная инвариантность, квантование потока. Сверхпроводники первого и второго рода. Эффект Джозефсона.

12. Флуктуации. Распределение Гиббса. Флуктуации основных термодинамических величин. Формула Пуассона. Временные флуктуации. Симметрии кинетических коэффициентов. Флуктационно-диссипативная теорема.

13. Фазовые переходы второго рода. Теория Ландау. Критические индексы. Масштабная инвариантность. Флуктуации в окрестности критической точки.

7. Теория конденсированного состояния (раздел для специалистов по теории твердого тела)

1. Неидеальный бозе-газ. Симметрия волновой функции системы бозонов, бозе-конденсат. Слабонеидеальный бозе-газ. Модель Боголюбова. Спектр возбуждений. Сверхтекучесть. Двухжидкостное описание. Критерий Ландау. Теория Фейнмана. Квантовые вихри. Корреляции в положении частиц бозе-газа.



2. Типы и симметрия твердых тел. Кристаллические структуры. Симметрия кристаллов. Свойства обратной решетки. Зона Бриллюэна. Теорема Блоха.
 3. Зонная структура и типы связи. Квазичастицы. Электронная теплоемкость.
 4. Поверхность Ферми. Диамагнитный и циклотронный резонанс. Открытые орбиты. Квантование орбит. Эффект де Гааза-ван Альфена.
 5. Колебания решетки. Теория упругости. Звук в твердых телах. Акустические и оптические ветви. Модель Дебая. Удельная теплоемкость решетки. Квантование фононов. Ангармонизм и тепловое расширение. Фактор Дебая- Уоллера.
 6. Процессы распада и слияния фононов. Рассеяние фононов на примесях. Кинетическое уравнение для фононов в диэлектрике. Теплопроводность. Электрон-фононное взаимодействие и проблема полярона.
 7. Магнетизм. Обменное взаимодействие. Магнитные свойства изолированного атома. Правило Хунда. Гамильтониан Гейзенберга. Модель Хаббарда. Природа магнетизма металлов. Спиновый парамагнетизм Паули и орбитальный диамагнетизм Ландау. Магнитные примеси в металле. Обменное взаимодействие через электроны проводимости (РККИ). Эффект Кондо.
 8. Магнитный порядок. Ферромагнетизм и антиферромагнетизм. Метод среднего поля для ферромагнетика. Доменная структура. Гистерезис ферромагнетиков. Спиновые волны (магноны). Квантовые флуктуации и спиновые волны в антиферромагнетике. Вклад магнонов в термодинамику магнетиков. Динамика магнитного момента в ферромагнетике. Уравнение Ландау-Лифшица.
 9. Сверхпроводимость. Куперовское спаривание. Теория Бардина-Купера-Шриффера (БКШ). Теория Лондонов. Нелокальная электродинамика сверхпроводника: лондоновский и пиппардовский случай. Эффекты четности числа электронов в сверхпроводниках малых размеров.
 10. Теория сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау. Ток, калибровочная инвариантность, квантование потока. Сверхпроводники первого и второго рода. Верхнее и нижнее критические поля. Вихревая решетка. Эффект Джозефсона. Эффект близости. Флуктуационные эффекты вблизи сверхпроводящего перехода. Туннельные эффекты в сверхпроводниках.
 11. Функции Грина. Корреляционные функции. Термодинамический предел и квазисредние. Основные принципы диаграммной техники. Уравнение Дайсона. Вершинная функция. Многочастичные функции Грина. Диаграммная техника при конечных температурах. Кинетические уравнения.
 12. Динамика критических явлений. Уравнения ренормгруппы.
 13. Особенности электронных свойств систем пониженной размерности. Энергетические спектры и плотность квантовых состояний. Квантовый эффект Холла в двумерном электронном газе. Эффекты локализации электронов в одно- и двумерных системах, перколяционные явления.
8. Квантовая теория полей (раздел для специалистов по теории элементарных частиц и физике высоких энергий)
1. Квантование свободных полей. Симметрии лагранжиана и теорема Нетер. Алгебра токов. Дискретные симметрии. СРТ теорема и связь спина со статистикой.
 2. Квантовая электродинамика. Правила Фейнмана. Перенормировки. Тожества Уорда-Такахаша.
 3. Квантовоэлектродинамические расчеты: Комптон-эффект, электрон-позитронная аннигиляция, рождение пар. Тормозное излучение и инфракрасная катастрофа. Аномальный магнитный момент электрона. Лэмбовский сдвиг.



4. Представление Челлена--Лемана. Формула Лемана-Симанчика-Циммермана. Аналитические свойства амплитуд рассеяния. Правила Кутковского. Правила Ландау для особенностей фейнмановских диаграмм.
5. Ренормгруппа. Бета-функция и аномальные размерности. Операторное разложение. Аномальные размерности составных операторов.
6. Калибровочные теории поля. Квантование по Фаддееву-Попову и духи. Тождества Славнова-Тейлора. Квантовая хромодинамика и асимптотическая свобода.
7. Спонтанное нарушение симметрии, теорема Голдстоуна, явление Хиггса.
8. Кварковая модель. Спектроскопия адронов и составляющие кварки. Чармоний, боттомоний.
9. КХД и киральная симметрия сильных взаимодействий. Частичное сохранение аксиального тока. Пионы как голдстоуновские частицы. Киральная аномалия Адлера-Белла-Джакива.
10. Стандартная модель. W- и Z-бозоны, их распады. Хиггсовский бозон. Поколения лептонов и кварков. Матрица Каббиво-Кобаяши-Маскава.
11. Бета-распад нейтрона, распад мюона, распады тяжелых кварков. Нелептонные слабые распады.
12. Нарушение CP инвариантности. Осцилляции нейтральных каонов и тяжелых мезонов.
13. Глубоконеупругое рассеяние и партонная модель. Нарушение скейлинга и уравнения эволюции Грибова-Липатова-Докшицера-Алтарелли-Паризи. Электрон-позитронная аннигиляция в адроны. Рождение адронных струй и существование глюонов.
14. Топологические свойства теории поля. Инстантоны. Монополи 'т Хоофта-Полякова. Действие Новикова-Весса-Зумино-Виттена.
15. Вне стандартной модели: великое объединение, распад протона, осцилляции нейтрино.
16. Суперсимметрия. Суперполя. Суперсимметричные лагранжианы. Формализм Бекки-Руэ-Стора-Тютина. Теоремы об отсутствии перенормировок.
17. Физика частиц и ранняя Вселенная. Космологические фазовые переходы. Темная материя, ограничения на свойства массивных нейтрино.
18. Фазовые переходы в КХД. Кварк-глюонная плазма.

Основная литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М., ФМЛ, 2001.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М., Наука, 2003.
3. Давыдов А. С. Квантовая механика. М.: Наука, 1973.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М., ФМЛ, 2001.
5. Шифф Л. Квантовая механика. М. ИЛ. 1957.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. М.: ФМЛ, 2001.
7. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П., Квантовая электродинамика. М.: ФМЛ, 2001.
8. Ициксон К., Зюбер Ж.-Б., Квантовая теория поля. В 2-х томах. М.: Мир, 1984.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Ч.1. М.: ФМЛ, 2001.
10. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П., Статистическая физика. Ч.2. М.: Наука, 2000.
11. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П., Физическая кинетика. М.: Наука, 2001.
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., Гидродинамика. М.: ФМЛ, 2001.
13. Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Квантовые поля. М.: Наука, 1993.

Дополнительная литература

1. Гантмахер Ф. Р. Лекции по аналитической механике. М.: Физматлит, 2001.



2. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д., Строение и эволюция вселенной. М.: Наука, 1975.
3. Вигнер Е., Теория групп и ее приложение к квантовой механике. М.: ИЛ, 1961.
4. Абрикосов А.А., Основы теории металлов. М.: Наука, 2000.
5. Пескин М., Шредер Д. Введение в квантовую теорию поля. Москва-Ижевск: РиХД, 2001.
6. Киттель Ч., Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 2000.
7. Абрикосов А.А., Горьков Л.П., Дзялошинский И.Е. , Методы квантовой теории поля в статистической физике. М.: Физматгиз, 1962.
8. Окунь Л.Б., Кварки и лептоны. М.: Наука, 1990.



БЛОК 2 «ФИЗИКА НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР»

Тематический план и виды учебной работы

| № | Название темы | Всего часов | Аудиторные часы | | Самостоятельная работа |
|---|--|-------------|-----------------|----------|------------------------|
| | | | Лекции | Семинары | |
| | Подготовка к сдаче кандидатского экзамена по специальности | | - | - | 4,5 |
| 1 | Техника низких температур | | - | - | 5,5 |
| 2 | Термодинамика и статистическая физика | | - | - | 5,5 |
| 3 | Низкотемпературная физика твердого тела | | - | - | 5,5 |
| 4 | Сверхтекучесть | | - | - | 5,5 |
| 5 | Сверхпроводимость | | - | - | 5,5 |
| 6 | Низкотемпературный магнетизм | | - | - | 5,5 |
| | Сдача кандидатского экзамена по специальности | | | 0,5 | - |
| | Итого | 38 | | | 37,5 |

Содержание (программа кандидатского экзамена)

1. Техника низких температур

1.1. Эффект Пельтье. Дросселирование газов и эффект Джоуля-Томсона.

Температура инверсии. Детандер, расширение газов при постоянной энтропии.

Рефрижератор растворения. Фазовая диаграмма смеси ^3He и ^4He . Процесс Стирлинга.

Охлаждение по методу Померанчука. Метод адиабатического размагничивания. Ядерное размагничивание. Тепловые контакты и теплоизоляция. Криостаты.

1.2. Газовый термометр. Термопары. Металлические, полупроводниковые и угольные термометры сопротивления. Магнитная термометрия.

1.3. Методы получения сильных магнитных полей. Стационарные магнитные поля, электромагниты. Сверхпроводящие соленоиды. Импульсные поля.

1.4. Методы получения высоких давлений. Камеры высокого давления. Наковальни Бриджмена.

2. Термодинамика и статистическая физика

2.1. Абсолютная температура. Термодинамическая и эмпирическая шкалы температуры, их взаимосвязь. Равновесные и неравновесные состояния макроскопических систем. Параметры состояния. Обратимые и необратимые процессы. 1-е, 2-е и 3-е начала термодинамики. Термодинамические потенциалы. Энтропия. Дифференциальные



соотношения между производными термодинамических величин. Уравнения состояния. Изотермические и адиабатические процессы. Цикл Карно. Термодинамическое равновесие. Условия равновесия фаз. Химический потенциал. Уравнение Клапейрона – Клаузиуса. Тройная точка, критическая точка.

2.2. Понятие функции распределения. Каноническое распределение Гиббса. Статистическое истолкование термодинамики. Вычисление свободной энергии методами статистической физики. Теорема равномерного распределения энергии по степеням свободы. Термодинамические функции идеального газа. Распределение Максвелла – Больцмана.

2.3. Равновесные фазовые переходы. Фазовые переходы 1-го рода. Скрытая теплота перехода. Метастабильные состояния. Переохлаждение и перегрев. Фазовые переходы 2-го рода. Скачок теплоемкости. Изменение симметрии и параметр порядка. Критические индексы. Фазовые переходы 2.5 рода.

2.4. Статистика Ферми – Дирака. Статистика Бозе – Эйнштейна. Бозе – Эйнштейновская конденсация, свойства Бозе – конденсата.

3 - 6. Физика конденсированного состояния

3. Низкотемпературная физика твердого тела.

3.1. Трансляционная симметрия кристаллов. Концепция кваичастиц. Теорема Блоха. Элементарная ячейка и Зона Бриллюэна. Энергетический спектр электронов в твердых телах. Основные методы расчета зонной структуры. Разрешенные и запрещенные зоны. Энергия Ферми. Поверхность Ферми. Металлы полупроводники, диэлектрики. Электроны и дырки в полупроводниках, примесные уровни.

3.2. Фононный спектр в кристаллах. Тепловое расширение твердых тел. Теплоемкость твердых тел. Температура Дебая. Теплопроводность твердых тел.

3.3. Гальваномагнитные явления. Магнитосопротивление. Эффект Холла. Квантование орбитального движения, уровни Ландау. Формула Лифшица – Онсагера. Температура Дингла. Квантовые осцилляции термодинамических величин, эффект де Хааза - ван Альфена. Квантовые осцилляции кинетических величин, эффект Шубникова - де Хааза. Ультраквантовый предел.

3.4. Высокочастотные свойства твердых тел. Скин – эффект. Аномальный скин – эффект. Поверхностный импеданс. Геликоны. Альфеновские волны. Затухание Ландау. Циклотронный резонанс. Плазменные колебания.



3.5. Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс. Ядерный квадрупольный резонанс. Эффект Мессбауэра.

3.6. Целочисленный и дробный квантовые эффекты Холла. Композитные фермионы, дробная статистика.

4. Сверхтекучесть.

4.1. Жидкий гелий. Сверхтекучесть ^4He и ^3He . Теория сверхтекучести Ландау. Сверхтекучая и нормальная компоненты. Параметр порядка в сверхтекучем ^4He и сверхтекучем ^3He . Фазовые диаграммы ^4He и ^3He . Фононы и ротоны. Квантованные вихри в гелии. Сверхтекучесть в пленках.

4.2. Твердый гелий, фазовая диаграмма. Антиферромагнетизм ^3He .

5. Сверхпроводимость.

5.1. Критическая температура. Критический ток. Критическое магнитное поле. Эффект Мейснера. Термодинамика сверхпроводников, формула Рутгерса. Линейная электродинамика сверхпроводников, уравнения Лондонов.

5.2. Нелинейная электродинамика сверхпроводников, уравнение Пиппарда. Скин – эффект и поверхностный импеданс в сверхпроводниках. Квантование магнитного потока. Теория сверхпроводимости Гинзбурга-Ландау. Глубина проникновения и длина когерентности, Параметр Гинзбурга-Ландау. Энергия границы раздела нормальной и сверхпроводящей фаз.

5.3. Сверхпроводники первого рода. Промежуточное состояние. Сверхпроводники второго рода. Смешанное состояние. 1-е и 2-е критические поля. Вихри Абрикосова. Пиннинг вихрей и крип магнитного потока.

5.4. Изотопический эффект. Взаимодействие Фрелиха, куперовские пары. Модель Бардина-Купера-Шриффера. Спектр элементарных возбуждений в сверхпроводниках. Энергетическая щель. Плотность состояний на уровне Ферми. Электрон-фононное взаимодействие.

5.5. Туннельный эффект в сверхпроводниках. Переход металл – изолятор – металл. Переход нормальный металл – изолятор – сверхпроводник. Переход сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник. Андреевское отражение. Стационарный эффект Джозефсона. Нестационарный эффект Джозефсона. Квантовые интерферометры (СКВИДы). Использование СКВИДа как трансформатора потока.



5.6. Сверхпроводниковые приемники излучения. Детектирование электромагнитных волн. Сверхпроводниковый болометр.

6. Низкотемпературный магнетизм.

6.1. Атомный магнетизм. Принцип Паули. Спиновый магнитный момент. Орбитальный магнитный момент. Спин-орбитальное взаимодействие. Диамагнетизм и парамагнетизм. Закон Кюри. Диамагнетизм Ландау. Парамагнетизм Паули. Парамагнетизм Ван Флека. Парамагнетизм коллективизированных электронов. Эффект Кондо.

6.2. Основные типы магнитного упорядочения. Закон Кюри – Вейсса. Ферромагнетизм. Критерий Стонера. Ферримагнетизм. Антиферромагнетизм. Слабый ферромагнетизм антиферромагнетиков, взаимодействие Дзялошинского. Состояние спинового стекла.

6.3. Обменное взаимодействие. Косвенное обменное взаимодействие через лиганды (сверхобмен). Обменное взаимодействие через электроны проводимости (РККИ – взаимодействие).

6.4. Модель Изинга. Модель Гейзенберга.

6.5. Магнитная анизотропия. Ориентационные фазовые переходы. Спин - флоп и спин - флип переходы.

6.6. Магнитные кластеры, наноразмерные структуры. Низкоразмерный магнетизм. Димеры, спиновые цепочки, спиновые лестницы. Спиновая щель. Спин-Пайерлсовский переход.

6.7. Динамические свойства магнетиков, антиферромагнитный и ферромагнитный резонансы.

Основная литература

1. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Статистическая физика, Наука, 1976 г.;
2. Квантовая механика, Наука, 1974 г.; Электродинамика сплошных сред, Наука, 1982.
3. Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. Статистическая физика, ч.П, Наука, 1978 г.; Физическая кинетика, Наука, 1979 г.
4. Дж. Займан. Принципы теории твердого тела, Мир, 1974 г.



5. А.А. Абрикосов. Основы теории металлов, Наука, 1987 г.
6. Н. Ашкрофт, Н. Мермин. Физика твердого тела, Мир, 1979 г.
7. В.В. Шмидт. Введение в сверхпроводимость, Наука, 1982 г.
8. Дж. Тилли, Дж. Тилли. Сверхтекучесть и сверхпроводимость, Мир, 1977г.
9. О.В. Лоунасмаа. Принципы и методы получения температур ниже 1 К. Мир, 1977 г.
10. Э.А. Линтон. Сверхпроводимость, Мир, 1974 г.
11. Справочник по физико-техническим основам криогеники (под редакцией М.П. Малкова), Энергоатомиздат, 1985 г.

Дополнительная литература

1. Р.Б. Скотт. Техника низких температур, Москва, ИЛ, 1962 г.
2. Методы получения и измерения низких и сверхнизких температур (под редакцией Б.И. Веркина), Киев, Наукова думка, 1987 г.
3. И.М. Халатников. Теория сверхтекучести, Наука, 1971 г.
4. М.И. Попов. Термометрия и каллометрия, Изд-во МГУ, 1954 г.
5. Н.В. Заварицкий. Сверхпроводимость, Изд-во МФТИ, 1985 г.



БЛОК 3 «ОПТИКА»

Тематический план и виды учебной работы

| № | Название темы | Всего часов | Аудиторные часы | | Самостоятельная работа |
|---|---|-------------|-----------------|----------|------------------------|
| | | | Лекции | Семинары | |
| | Подготовка к сдаче кандидатского экзамена по специальности | | - | - | 1,5 |
| 1 | Классическая электромагнитная теория света | | - | - | 4 |
| 2 | Геометрическая оптика | | - | - | 4 |
| 3 | Интерференция и дифракция света | | - | - | 4 |
| 4 | Квантовая теория излучения и взаимодействия света с веществом | | - | - | 4 |
| 5 | Статистическая и квантовая оптика | | - | - | 4 |
| 6 | Атомная спектроскопия | | - | - | 4 |
| 7 | Молекулярная спектроскопия | | - | - | 4 |
| 8 | Оптика и спектроскопия твердого тела | | - | - | 4 |
| 9 | Нелинейная оптика и лазерная спектроскопия | | - | - | 4 |
| | Сдача кандидатского экзамена по специальности | | | 0,5 | - |
| | Итого | 38 | | | 37,5 |

Содержание (программа кандидатского экзамена)

Раздел 1. Классическая электромагнитная теория света

1. Экспериментальные основания электромагнитной теории света. Опыты Физо и Майкельсона.
2. Преобразования Лоренца. Продольный и поперечный эффекты Доплера.
3. Уравнения Максвелла. Вектор Умова-Пойнтинга.
4. Волновое уравнение. Плоские волны. Сферические волны. Поле в резонаторе.
5. Ближнее и дальнее поле дипольного излучателя.
6. Дипольное, магнито-дипольное и электроквадрупольное излучение.
7. Поляризация света. Двойное лучепреломление. Электрооптические эффекты Керра и Погкельса. Оптическая активность. Эффект Фарадея.
8. Отражение и преломление света на границе раздела изотропных сред. Формулы Френеля. Полное внутреннее отражение. Угол Брюстера.
9. Оптика металлов. Скин-эффект.
10. Дисперсия света. Диэлектрическая проницаемость в разных областях спектра. Аномальная дисперсия. Фазовая и групповая скорости света. Дисперсия плазмы.

Раздел 2. Геометрическая оптика



1. Принцип Ферма. Волновой фронт и лучевая картина. Понятие оптического изображения. Параксиальное приближение.
2. Преломление на плоских и сферических поверхностях. Линза, призма, телескоп, микроскоп. Аберрации оптических систем.
3. Глаз и зрение. Фотометрические понятия и единицы. Яркость и освещённость оптического изображения.

Раздел 3. Интерференция и дифракция света

1. Интерференция волн. Классические интерференционные опыты (двух- и многолучевые). Влияние степени монохроматичности и размеров источников на интерференционную картину.
2. Интерферометры двухлучевые и многолучевые. Интерферометр Фабри–Перо и его разрешающая способность. Интерферометр Майкельсона. Фурье-спектрометр. Многослойные покрытия.
3. Принцип Гюйгенса-Френеля (Кирхгофа). Зоны Френеля. Дифракция Фраунгофера и Френеля.
4. Дифракция на периодических структурах. Дифракционная решетка. Эшелон Майкельсона. Разрешающая способность спектральных приборов.
5. Основные принципы голографии.

Раздел 4. Квантовая теория излучения и взаимодействия света с веществом

1. Спонтанное излучение. Скорость распада и спектр спонтанного излучения.
2. Эффект Доплера и эффект отдачи.
3. Фотоэффект и его объяснение. Энергия и импульс фотона. Эффект Комптона.
4. Тепловое излучение. Законы Кирхгофа, Стефана–Больцмана и Вина. Формула Планка. Распределение Бозе–Эйнштейна.
5. Индуцированное излучение и поглощение. Коэффициенты Эйнштейна. Сечение индуцированных переходов. Форма линии поглощения.
6. Правила отбора для излучения и поглощения. Электродипольное приближение. Правила отбора по четности и угловому моменту. Приближенные правила отбора для атомов и молекул.
7. Когерентное возбуждение двухуровневой системы. Приближение вращающейся волны (резонансное приближение). Осцилляции Раби. Влияние релаксационных процессов.
8. Когерентное излучение атомного ансамбля. Суперпозиционные состояния. Метастабильные состояния.
9. Интенсивность когерентного излучения. Сверхизлучение Дике.
10. Многофотонный резонанс. Штарковский сдвиг уровней. Многофотонная частота Раби. Бигармоническое возбуждение.
11. Упругое рассеяние света. Комбинационное (рамановское) рассеяние (КР). Правила отбора. Альтернативный запрет. Стоксово и антистоксово КР. Вынужденное рассеяние. Гиперкомбинационное рассеяние.

Раздел 5. Статистическая и квантовая оптика



1. Временная и пространственная когерентность световых полей. Корреляционные функции первого и высших порядков. Когерентность первого и второго порядков. Спектральное представление. Теорема Винера—Хинчина.
2. Интерферометрия интенсивностей. Опыт Брауна—Твисса.
3. Различные квантовые состояния световых полей. Фоковское, когерентное и сжатое состояния поля.
4. Свойства когерентных состояний.
5. Статистические свойства лазерного излучения. Закон Кирхгофа и шумы квантовых усилителей света.
6. Эффекты группировки и антигруппировки фотонов. Корреляционная спектроскопия.
7. Пуассоновская, субпуассоновская и суперпуассоновская статистика фотонов. Связь статистик фотонов и фотоотчетов. Формула Манделя для распределения фотоотчетов. Дробовой шум.

Раздел 6. Атомная спектроскопия

1. Атом водорода. Квантовые числа. Уровни и спектр излучения атома водорода. Лэмбовский сдвиг.
2. Спин электрона. Принцип Паули. Периодическая система элементов Менделеева и структура электронных оболочек. Валентность. Изотопический эффект.
3. Систематика спектров многоэлектронных атомов. Определение набора термов. Мультиплетная структура.
4. Эффекты Зеемана и Штарка. Эффект Пашена–Бака. Эффект Штарка у водорода.
5. Тонкая структура.
6. Спин и квадрупольный момент ядра. Сверхтонкая структура.
7. Ридберговские атомы. Водородоподобные уровни.

Раздел 7. Молекулярная спектроскопия

1. Электронные спектры молекул. Классификация электронных состояний двухатомных молекул. Классификация электронных состояний многоатомных молекул.
2. Адиабатическое приближение. Группы симметрии молекул. Классификация нормальных колебаний по типам симметрии.
3. Правила отбора в колебательных спектрах. Эффекты ангармонизма. Резонанс Ферми.
4. Колебательные спектры поглощения и комбинационного рассеяния света.
5. Квантование вращения твердого тела. Взаимодействие колебаний и вращения молекулы. Кориолисово расщепление.
6. Вращательная структура колебательных полос.
7. Электронно-колебательно-вращательные спектры. Принцип Франка–Кондона.
8. Преддиссоциация.

Раздел 8. Оптика и спектроскопия твердого тела

1. Типы связей в кристаллах. Симметрия кристаллов. Теорема Блоха. Обратная решетка. Зоны Бриллюэна.
2. Проводники, изоляторы, полупроводники. Электронные зоны. Переходы под действием света в идеальном кристалле.



3. Квантовые ямы. Квантовые проволоки. Квантовые точки.
4. Фононы. Модель Дебая. Ангармонические эффекты. Взаимодействие света с фононной подсистемой, поглощение света в инфракрасной области спектра.
5. Электрон-фононное взаимодействие. Поляроны.
6. Диэлектрическая и магнитная восприимчивости. Эффективное поле. Дисперсия диэлектрической проницаемости. Соотношения Крамерса-Кронига. Формула Лорентц-Лоренца.
7. Нормальная и аномальная дисперсии. Запрещенная зона и область прозрачности в диэлектриках.
8. Экситоны Ванье—Мотта и Френкеля. Понятие о поляритонах и плазмонах.

Раздел 9. Нелинейная оптика и лазерная спектроскопия

1. Когерентное антистоксово рассеяние света (КАРС). Четырехволновое смешение. Условие фазового синхронизма. Отражение бегущей волны от стоячей (обращение волнового фронта).
2. Трехволновое смешение в нецентросимметричных средах. Генерация суммарной и разностной частот. Генерация гармоник. Параметрическое рассеяние.
3. Принцип работы лазера. Инверсия населенности. Схемы накачки. Свойства лазерных пучков.
4. Типы лазеров. Режимы работы лазеров. Синхронизация мод. Генерация ультракоротких импульсов.
5. Спектроскопия сверхвысокой чувствительности: флуоресцентная спектроскопия, фотоионизационная спектроскопия. Спектроскопия и детектирование одиночных атомов и молекул.
6. Модуляционные методы абсорбционной спектроскопии: интерферометрия, частотная модуляция, штарковская спектроскопия, магнитный резонанс, поляризационная спектроскопия, фарадеевская спектроскопия.
7. Методы двойного резонанса. Эффект Ханле. Метод квантовых биений. Фотонное эхо.
8. Субдоплеровская спектроскопия. Узкие резонансы в спектроскопии насыщения. Лэмбовский провал. Узкий резонанс в стоячей волне на двухфотонном переходе.
9. Применение атомных и молекулярных пучков, охлажденных молекулярных струй.
10. Пролетное уширение линий. Схема Рамзи для устранения пролетного уширения в микроволновой спектроскопии. Модификация схемы Рамзи для оптической области — метод разнесенных лазерных полей.
11. Лазерное охлаждение ионов в ловушках. Замедление и охлаждение атомных пучков резонансным световым давлением. Лазерные ловушки для атомов.

Рекомендуемая литература

Общая физика

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. М.: Наука, 1980.
2. Ландсберг Г.С. Оптика. М: Физматлит. 2003.
3. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: Физматлит, 2003.
4. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике, тт. 3, 5, 6, 8, 9. М.: Мир, 1966.



5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973.
6. Раутиан С.Г. Введение в физическую оптику. М.: Либроком. 2009.

Теоретическая физика

7. Левич В.Г. Курс теоретической физики, том I. М.: Наука, 1971.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Физматлит 2016; Квантовая механика. М.: Физматлит 2016; Статистическая физика. М.: Физматлит 2013; Электродинамика сплошных сред. М.: Физматлит 2005.

Квантовая оптика

9. Мандель Л., Вольф Э. Оптическая когерентность и квантовая оптика. М.: Физматлит, 2000.
10. Скалли М.О., Зубайри М.С. Квантовая оптика. М.: Физматлит, 2003.
11. Лоудон Р. Квантовая теория света. М.: Мир, 1976.

Современная оптика и спектроскопия

12. Демтрёдер В. Современная лазерная спектроскопия. М.: Интеллект, 2014.
13. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. - М.: Наука, 1989.
14. Будкер Д., Кимбелл Д., ДеМилль Д. Атомная физика: освоение через задачи. - М.: Физматлит, 2010.
15. Летохов В.С., Чеботаев В.П. Нелинейная лазерная спектроскопия сверхвысокого разрешения. М.: Наука. 1990.
16. Клышко Д.Н. Физические основы квантовой электроники. М.: Наука, 1986.
17. Ахманов С.А., Коротеев Н.И. Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света. М.: Наука. 1981.
18. Салех Б., Тейх М. Оптика и фотоника: принципы и применения, тт. 1, 2. М.: Интеллект, 2012.

Спектроскопия атомов, молекул и конденсированных сред

19. Собельман И.И. Введение в теорию атомных спектров. М.: Наука, 1977.
20. Ельяшевич М.А. Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: УРСС. 2001.
21. Герцберг Г. Колебательные и вращательные спектры многоатомных молекул. М: ИЛ, 1949.
22. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1974.
23. Давыдов А.С. Теория твердого тела: М.: Наука, 1976.

Классические монографии

24. Мандельштам Л.И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. М.: Наука, 1972.
25. Гайтлер В. Квантовая теория излучения. ИЛ. М.: 1956.



БЛОК 4 «ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ»

Тематический план и виды учебной работы

| № | Название темы | Всего часов | Аудиторные часы | | Самостоятельная работа |
|---|--|-------------|-----------------|----------|------------------------|
| | | | Лекции | Семинары | |
| | Подготовка к сдаче кандидатского экзамена по специальности | | - | - | 1,5 |
| 1 | Силы связи в твердых телах | | - | - | 4 |
| 2 | Симметрия твердых тел | | - | - | 4 |
| 3 | Дифракция в кристаллах | | - | - | 4 |
| 4 | Колебания решетки | | - | - | 4 |
| 5 | Тепловые свойства твердых тел | | - | - | 4 |
| 6 | Электронные свойства твердых тел | | - | - | 4 |
| 7 | Магнитные свойства твердых тел | | - | - | 4 |
| 8 | Оптические и магнитооптические свойства твердых тел | | - | - | 4 |
| 9 | Сверхпроводимость | | - | - | 4 |
| | Сдача кандидатского экзамена по специальности | | | 0,5 | - |
| | Итого | 38 | | | 37,5 |

Содержание (программа кандидатского экзамена)

1. Силы связи в твердых телах

1.1 Электронная структура атомов. Химическая связь и валентность. Типы сил связи в конденсированном состоянии: ван-дер-ваальсова связь, ионная связь, ковалентная связь, металлическая связь.

1.2 Химическая связь и ближний порядок. Структура вещества с ненаправленным взаимодействием. Примеры кристаллических структур, отвечающих плотным упаковкам шаров: простая кубическая, ОЦК, ГЦК, ГПУ, структура типа CsCl, типа NaCl, структура типа перовскита CaTiO₃.

1.3. Основные свойства ковалентной связи. Структура веществ с ковалентными связями. Гибридизация атомных орбиталей в молекулах и кристаллах. Структура типа алмаза и графита.

2. Симметрия твердых тел

2.1 Кристаллические и аморфные твердые тела. Трансляционная инвариантность. Базис и кристаллическая структура. Элементарная ячейка. Ячейка Вигнера - Зейтца. Решетка Браве. Обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле. Обратная решетка, ее свойства. Зона Бриллюэна.

2.2 Элементы симметрии кристаллов: повороты, отражения, инверсия, инверсионные повороты, трансляции. Операции (преобразования) симметрии.



2.3 Элементы теории групп, группы симметрии. Возможные порядки поворотных осей в кристалле. Пространственные и точечные группы (кристаллические классы). Классификация решеток Браве.

3. Дифракция в кристаллах

3.1 Распространение волн в кристаллах. Дифракция рентгеновских лучей, нейтронов и электронов в кристалле. Упругое и неупругое рассеяние, их особенности.

3.2 Брэгговские отражения. Атомный и структурный факторы. Дифракция в аморфных веществах.

4. Колебания решетки

4.1 Колебания кристаллической решетки. Уравнения движения атомов. Простая и сложная одномерные цепочки атомов. Закон дисперсии упругих волн. Акустические и оптические колебания. Квантование колебаний. Фононы. Электрон-фононное взаимодействие.

5. Тепловые свойства твердых тел

5.1 Теплоемкость твердых тел. Решеточная теплоемкость. Электронная теплоемкость. Температурная зависимость решеточной и электронной теплоемкости. Классическая теория теплоемкости. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы в классической физике. Границы справедливости классической теории.

5.2 Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну и Дебаю. Предельные случаи высоких и низких температур. Температура Дебая.

5.3 Тепловое расширение твердых тел. Его физическое происхождение. Ангармонические колебания.

5.4 Теплопроводность решеточная и электронная. Закон Видемана - Франца для электронной теплоемкости и теплопроводности.

6. Электронные свойства твердых тел

6.1 Электронные свойства твердых тел: основные экспериментальные факты. Проводимость, эффект Холла, термоЭДС, фотопроводимость, оптическое поглощение. Трудности объяснения этих фактов на основе классической теории Друде.

6.2 Приближение почти свободных электронов. Граничные условия Борна - Кармана. Теорема Блоха. Блоховские функции. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна. Брэгговские отражения электронов. Энергетические зоны.

6.3 Приближение сильно связанных электронов. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием волновых функций атомов. Закон дисперсии. Тензор обратных эффективных масс.

6.4 Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Полуметаллы.

6.5 Границы применимости зонной теории. Экситоны, электронно-дырочная жидкость и экситонные поляритоны в полупроводниках

6.6 Двумерные электронные системы. Гетероструктуры и квантовые ямы. Квантовый эффект Холла. Графен и другие однослойные квантовые системы.

6.7 Спин-орбитальное взаимодействие: физическая природа, общий вид части гамильтониана электрона, отвечающей спин-орбитальному взаимодействию, энергия взаимодействия для атомарного электрона в центрально-симметричном поле. Спин-



орбитальное взаимодействие, вызванное асимметрией в твердых телах (взаимодействие Рашбы), дисперсионное соотношение для электрона при наличии взаимодействия Рашбы, связь между импульсом электрона и его спином."

7. Магнитные свойства твердых тел

7.1 Намагниченность и восприимчивость. Диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Законы Кюри и Кюри - Вейсса. Парамагнетизм и диамагнетизм электронов проводимости.

7.2 Природа ферромагнетизма. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Роль обменного взаимодействия. Точка Кюри и восприимчивость ферромагнетика.

7.3 Ферромагнитные домены. Причины появления доменов. Доменные границы (Блоха, Нееля).

7.4 Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков. Ферримагнетики. Магнитная структура ферримагнетиков. Спиновые волны, магноны.

7.5 Движение магнитного момента в постоянном и переменном магнитных полях. Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс.

8. Оптические и магнитооптические свойства твердых тел

8.1 Комплексная диэлектрическая проницаемость и оптические постоянные. Коэффициенты поглощения и отражения. Соотношения Крамерса-Кронига.

8.2 Поглощение и усиление света в полупроводниках (межзонные, примесные и экситонные переходы, поглощение свободными носителями). Определение основных характеристик полупроводника из оптических исследований.

8.3 Магнитооптические эффекты (эффекты Фарадея, Фохта и Керра).

8.4 Проникновение высокочастотного поля в проводник. Нормальный и аномальный скин-эффекты. Толщина скин-слоя.

9. Сверхпроводимость

9.1 Сверхпроводимость. Критическая температура. Высокотемпературные сверхпроводники. Эффект Мейснера. Квантование магнитного потока. Критическое поле и критический ток.

9.2 Сверхпроводники первого и второго рода. Их магнитные свойства. Промежуточное и смешанное состояние. Вихри Абрикосова.

9.3 Эффект Джозефсона. Собственная индуктивность и частота джозефсоновского перехода. Зависимость энергии джозефсоновского перехода от разности фаз. Тепловые и квантовые флуктуации. Сверхпроводящие интерферометры.

9.4 Куперовское спаривание. Длина когерентности. Энергетическая щель. Спектр квазичастиц в сверхпроводнике. Эффект близости на границе нормальный металл - сверхпроводник. Андреевское отражение.

Основная литература

1. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.
2. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. Т. I, II. М.: Мир, 1979.
3. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. М.: Мир, 1969.
4. Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1974.
5. Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М.: Высш. шк., 2000.
6. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1984.



7. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1979.
8. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводимости. МЦ НМО, М., 2000.
9. Давыдов А.С. "Квантовая механика" Санкт-Петербург. БХВ-Петербург, 2011
10. Тимофеев В. Б. Оптическая спектроскопия объемных полупроводников и наноструктур Изд-во Лань, 2015



ФОРМЫ КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ АСПИРАНТОВ

| Тип контроля | Форма контроля | 2 год | Параметры |
|---------------------|-----------------------|--------------|------------------|
| Текущий | не предусмотрен | - | |
| Итоговый | Кандидатский экзамен | + | Устный экзамен |

ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина базируется на самостоятельной внеаудиторной работе аспирантов.