

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
"Казанский (Приволжский) федеральный университет"

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор –
проректор по научной деятельности

_____ Д.А. Таюрский
« _____ » _____ 2025 г.



Программа вступительного испытания по специальности

Уровень высшего образования: подготовка кадров высшей квалификации

Тип образовательной программы: программа подготовки научных и
научно-педагогических кадров в аспирантуре

Научная специальность: 1.3.8 Физика конденсированного состояния

Форма обучения: очная

Общие указания

Вступительные испытания в аспирантуру по научной специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния охватывают стандартные разделы университетских курсов по физике и радиофизике. Также проверяются базовые умения математического аппарата. Вопросы и структура билетов вступительного испытания приведены ниже.

Порядок проведения вступительных испытаний

Вступительное испытание проводится в форме экзамена на основе билетов. В каждом экзаменационном билете по 2 вопроса. Первый вопрос из раздела 1 Физика, второй вопрос из раздела 2 Физика конденсированного состояния. Экзамен проходит в письменной форме. Подготовка к ответу составляет 1 академический час (60 минут) без перерыва с момента раздачи билетов. Задания оцениваются от 0 до 100 баллов в зависимости от полноты и правильности ответов.

Критерии оценивания

Оценка поступающему за письменную работу выставляется в соответствии со следующими критериями.

Отлично (80-100 баллов)

Абитуриент обнаружил всестороннее, систематическое и глубокое знание учебного материала, усвоил основную литературу и знаком с дополнительной литературой, рекомендованной программой дисциплины, усвоил взаимосвязь основных понятий дисциплины в их значении для приобретаемой профессии, проявил творческие способности в понимании, изложении и использовании учебно-программного материала.

Хорошо (60-79 баллов)

Абитуриент обнаружил полное знание учебного материала, усвоил основную литературу, рекомендованную программой дисциплины, показал систематический характер знаний по дисциплине и способен к их самостоятельному пополнению и обновлению в ходе дальнейшей учебной работы и профессиональной деятельности.

Удовлетворительно (40-59 баллов)

Абитуриент обнаружил знание основного учебно-программного материала в объеме, необходимом для дальнейшей учебы и предстоящей работы по профессии, знаком с основной литературой, рекомендованной программой дисциплины, допустил погрешности в ответе, но обладает необходимыми знаниями для их устранения под руководством преподавателя.

Неудовлетворительно (менее 40 баллов)

Абитуриент обнаружил значительные пробелы в знаниях материала, допустил принципиальные ошибки и не способен продолжить обучение без дополнительной подготовки по программе вступительного испытания.

Вопросы программы вступительного испытания в аспирантуру по научной специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния

Раздел 1 ФИЗИКА

1.1. Механика

1. Основные законы механики. Пространство и время в физике. Способы измерения протяженности и длительности (в лабораторной практике, в космических масштабах, в микромире). Материальная точка. Инерциальная система отсчета. Явление инерции. Первый закон Ньютона. Движение материальной точки под действием силы. Масса как мера инертности. Второй закон Ньютона. Взаимодействие материальных точек. Третий закон Ньютона. Гравитационное поле. Масса как источник гравитационного поля. Закон всемирного тяготения. Равенство гравитационной и инертной масс. Движение материальной точки относительно неинерциальных систем отсчета. Сила инерции. Сила Кориолиса. Движение абсолютно твердого тела. Вращательное движение. Угловая скорость. Плоское движение. Движение вокруг закрепленной точки. Углы Эйлера. Тензор инерции. Главные оси инерции тела. Уравнения Эйлера.

2. Законы сохранения в механике. Импульс материальной точки. Закон изменения и сохранения импульса. Столкновение тел. Момент импульса. Закон изменения и сохранения момента импульса. Момент силы. Движение под действием момента сил. Механическая работа. Энергия. Кинетическая и потенциальная энергия системы материальных точек тела и системы тел. Закон сохранения механической энергии. Связь законов сохранения со свойствами пространства-времени. Роль законов сохранения в механике. Движение в центральном поле. Задача двух тел. Законы Кеплера. Рассеяние частиц.

3. Принцип относительности в механике. Принцип относительности Галилея. Преобразование Галилея. Сложение скоростей в классической физике. Принцип относительности Эйнштейна. Преобразования Лоренца. Сокращение длин и замедление времени. Сложение скоростей в релятивистской физике. Эквивалентность массы и энергии. Импульс и энергия релятивистской частицы. Релятивистское уравнение движения.

4. Механические колебания и волны. Условие возникновения колебаний. Малые колебания. Затухающие колебания. Вынужденные колебания. Резонанс. Колебания в системах, связанных тел. Собственные частоты. Волны. Продольные и поперечные волны. Частота, длина волны, закон дисперсии, скорость, поляризация. Плоские и сферические волны. Волновые пакеты. Фазовая и групповая скорости. Элементы акустики.

5. Вариационные принципы в механике. Принцип наименьшего действия. Функция Лагранжа. Уравнения движения в форме Лагранжа. Функция Гамильтона. Уравнения движения в форме Гамильтона.

1.2. Молекулярная физика. Термодинамика и статистическая физика

1. Основные понятия и постулаты термодинамики. Макроскопическая система. Основы молекулярно-кинетической теории строения вещества. Термодинамический и статистический методы описания. Внешние и внутренние параметры. Термодинамическое состояние и его функции. Состояние термодинамического равновесия. Постулаты термодинамики. Установление термодинамического равновесия в изолированной системе. Равновесные и неравновесные процессы.

2. Начала термодинамики. Внутренняя энергия, теплота и работа. Первое начало термодинамики. Теплоемкости и скрытые теплоты. Изопроцессы и газовые законы на примере идеального газа и газа Ван дер Ваальса. Циклические процессы, тепловая и холодильная машины. Второе начало термодинамики. Энтропия. Второе

начало термодинамики для неравновесных процессов. Неравенство Клаузиуса. Третье начало термодинамики (тепловая теорема Нернста). Поведение термодинамических величин при температуре, стремящейся к абсолютному нулю.

3. Термодинамические потенциалы, условия равновесия и фазовые переходы. Внутренняя энергия, свободная энергия, потенциал Гиббса, энтальпия. Термодинамические потенциалы для систем с переменной массой. Химический потенциал. Основное соотношение равновесной термодинамики. Условия термодинамического равновесия. Гомогенная и гетерогенная системы. Общие условия термодинамического равновесия. Уравнение Клапейрона - Клаузиуса. Плавление. Сублимация. Испарение и кипение, давление насыщенного пара. Краевой угол. Смачивание. Метастабильные состояния. Тройная точка. Критическая точка. Правило фаз Гиббса.

4. Основные положения статистической физики. Фазовое пространство. Ансамбль Гиббса (статистический ансамбль). Функция распределения. Теорема Лиувилля. Микроканоническое распределение. Каноническое распределение Гиббса. Связь статистической суммы со свободной энергией. Распределение Максвелла-Больцмана. Теорема о равнораспределении кинетической энергии по степеням свободы. Неидеальные газы. Газ Ван дер Ваальса. Большое каноническое распределение Гиббса. Квантовая статистика. Общие свойства ферми-газов.

5. Флуктуации. Распределение вероятностей флуктуаций (распределение Гаусса). Флуктуации в идеальном газе.

6. Физическая кинетика. Частичные функции распределения. Кинетическое уравнение Больцмана. Закон Ньютона. Механизмы внутреннего трения (вязкости) в газах, жидкостях, твердых телах. Сверхтекучесть. Закон Фурье.

1.3. Электричество и магнетизм

1. Основные законы физики электромагнитных явлений. Электрический заряд и его свойства. Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона. Электрическое поле. Напряженность электрического поля. Теорема Гаусса. Обобщение закона Кулона в виде дифференциального уравнения. Потенциальность электрического поля неподвижных зарядов. Потенциал поля точечного заряда. Потенциал системы зарядов. Электрический ток. Магнитное поле тока. Закон Био-Савара-Лапласа. Ток смещения. Явление электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции Фарадея. Правило Ленца.

2. Электрические цепи. Сопротивление. Закон Ома. Емкость. Конденсатор. Конденсатор в цепи переменного тока. Сопротивление конденсатора переменному току (емкостное сопротивление). Само- и взаимная индукция. Индуктивность в цепи переменного тока. Индуктивное сопротивление. Электрические цепи. Правила Кирхгофа для постоянных и переменных токов. Сопротивление цепи переменному току. Мощность переменного тока. Переменный ток и его применение. Колебательный контур.

3. Электромагнитные волны. Волновое уравнение для электромагнитного поля. Плоские монохроматические электромагнитные волны и их основные свойства (частота и волновое число, связь частоты с волновым числом (закон дисперсии), скорость распространения, ориентация полей). Плотность энергии и плотность потока энергии электромагнитного поля. Излучение ЭМВ диполем Герца. Сферические волны.

4. Взаимодействие зарядов и токов с электромагнитным полем. Сила Лоренца. Движение заряда в электрическом поле. Движение заряда в магнитном поле. Ускорители заряженных частиц. Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле (сила Ампера). Магнитный момент замкнутого тока. Взаимодействие магнитного момента с полем. Преобразование энергии в поле переменных токов. Электродвигатели и генераторы переменного тока.

5. Материальные среды в электромагнитном поле. Макроскопические электромагнитные поля в средах. Уравнения Максвелла. Материальные уравнения.

Диэлектрическая и магнитная проницаемости. Диэлектрики. Связанные заряды. Вектор поляризации. Особенности их поведения в постоянных и переменных полях.

1.4. Оптика

1. Геометрическая оптика и фотометрия. Законы геометрической оптики. Центрированная оптическая система и ее кардинальные элементы. Построение изображений в собирающих и рассеивающих тонких линзах. Поперечное увеличение оптических приборов. Оптические приборы: глаз, лупа, микроскоп, телескоп. Геометрическая оптика как предел волновой. Основные фотометрические величины: поток света, сила света, яркость, светимость, освещенность, интенсивность света. Спектральная чувствительность глаза.

2. Волновая оптика. Электромагнитная природа света. Поперечность электромагнитных волн. Поляризация, виды поляризации световой волны. Поляризаторы. Закон Малюса. Интерференция света, Двухлучевая и многолучевая интерференция. Когерентность. Оптическая разность хода. Методы получения и расчета интерференционной картины. Классические интерференционные опыты. Интерферометры. Дифракция. Принцип Гюйгенса-Френеля. Дифракция Френеля. Дифракция Френеля на круглых отверстиях и препятствиях. Зоны Френеля. Дифракция Фраунгофера. Дифракционные решетки. Расчет дифракционной картины света на решетке. Дифракция рентгеновских лучей. Спектральные приборы, основные характеристики спектральных приборов. Голография: запись и восстановление изображения.

3. Излучение света. Классическая физическая модель излучения света. Естественная ширина спектральной линии. Формы спектральной линии. Уширение спектральных линий. Законы Кирхгофа для теплового излучения. Спектральная плотность излучения. Понятие абсолютно черного тела и законы его излучения. Квантовая физическая модель излучения света. Формула Планка для излучения абсолютно черного тела. Спонтанное и вынужденное излучение света атомами.

4. Квантовая оптика. Фотоны. Фотоэффект, законы фотоэффекта. Формула Эйнштейна для фотоэффекта. Эффект Комптона и его объяснение. Источники когерентного излучения - лазеры. Активная среда. Понятие об отрицательной температуре. Лазер и его принципиальное устройство. Применение лазеров.

5. Распространение света в различных средах. Отражение света от границы раздела двух изотропных сред: теория Френеля, угол Брюстера. Полное внутреннее отражение. Световоды. Дисперсия света. Электронная теория дисперсии света. Фазовая и групповая скорости света. Закон Бугера. Рассеяние света, рэлеевское рассеяние света. Распространение света в анизотропных средах. Оптические оси. Двойноелучепреломление и его применение. Оптически активные среды, эффект Фарадея в магнитных средах. Нелинейные среды. Эффекты в распространении света в нелинейных средах.

1.5. Атомная физика, физика атомного ядра и элементарных частиц и квантовая механика

1. Краткая история возникновения и развития квантовых представлений. Излучение абсолютно черного тела. Квантовая гипотеза Планка. Кванты света. Фотоэффект. Постоянная Планка. Опыты Резерфорда. Классические представления о строении атома, их несостоятельность. Атом водорода по Бору. Пространственное квантование и опыты Штерна-Герлаха. Корпускулярно-волновой дуализм. Волны де-Бройля. Эффект Комптона. Опыты Дэвиссона и Джермера. Невозможность классического описания движения микрочастиц. Принцип неопределенности Гейзенберга, его эвристическая ценность.

2. Основные постулаты и принципы квантовой механики. Наблюдаемые величины и состояния. Волновая функция, ее статистическая интерпретация. Принцип

суперпозиции. Матричная механика Гейзенберга. Операторы в квантовой механике. Понятие измерения. Среднее значение физической величины.

3. Эволюция состояний квантовых систем. Уравнение Шредингера, его стационарные решения. Свойства стационарных состояний. Плотность вероятности, плотность потока вероятности. Симметрия и законы сохранения в квантовой механике.

4. **Простейшие и точно решаемые задачи квантовой механики.** Одномерное движение. Туннелирование. Гармонический осциллятор. Движение частицы в центральном поле. Пространственный ротатор. Нерелятивистская теория атома водорода.

5. **Теория возмущений.** Стационарная теория возмущений. Невырожденный уровень. Вырожденный уровень. Квантовые переходы, вероятность перехода. «Золотое» правило Ферми. Закон сохранения энергии и соотношение неопределенностей энергия-время.

6. **Взаимодействие квантовой системы с электромагнитным полем.** Правила отбора для электродипольного излучения и поглощения. Эффект Зеемана. Эффект Пашена-Бака. Эффект Штарка. Рентгеноэлектронная спектроскопия. Резонансные методы исследования веществ (ЭПР, ЯМР и др.).

7. **Системы тождественных частиц.** Спин. Спиновые волновые функции. Уравнение Паули. Тождественные частицы в квантовой механике. Принцип Паули. Перестановочная симметрия волновых функций. Бозоны и фермионы. Атом гелия. Строение многоэлектронных атомов. Электронные конфигурации. Периодическая система химических элементов. Термы. Правило Хунда. Проявление спин-орбитального взаимодействия. Мультиплетное расщепление термов. Молекула водорода, возникновение химической связи. Перекрывание атомных орбиталей, ковалентность. Связывающие и антисвязывающие молекулярные орбитали. Обменное взаимодействие. Энергетический спектр и волновые функции электрона в идеальном кристалле. Энергетические зоны. Металлы, диэлектрики, полупроводники.

8. **Состав и характеристики атомного ядра.** Масса и энергия связи. Модели атомного ядра. Ядерные силы. Радиоактивность. Законы радиоактивного распада. Ядерные реакции. Методы регистрации элементарных частиц. Классификация элементарных частиц. Электрослабое взаимодействие. Кварки, глюоны, цветное взаимодействие, Единая теория материи. Физическая теория эволюции Вселенной.

Раздел 2 ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Физика атомного ядра и элементарных частиц

Состав и характеристики атомного ядра. Масса и энергия связи. Модели атомного ядра. Ядерные силы. Радиоактивность. Законы радиоактивного распада. Ядерные реакции. Методы регистрации элементарных частиц. Классификация элементарных частиц. Электрослабое взаимодействие. Кварки, глюоны, цветное взаимодействие, Единая теория материи. Физическая теория эволюции Вселенной.

Термодинамика фаз и фазовые превращения. явления переноса

Физическая кинетика. Явления переноса: диффузия, вязкость и теплопроводность. Особенности явлений переноса в жидкостях и твердых телах. Фазы и фазовые превращения. Условия равновесия фаз. Фазовые диаграммы. Изотермы Ван-дер-Ваальса. Фазовые переходы первого рода. Критическое состояние. Фазовые переходы второго рода. Поверхностные и капиллярные явления.

Физика конденсированного состояния

Простые и сложные кристаллические решетки. Прямая и обратная решетки кристалла. Зоны Бриллюэна. Теплоемкость кристаллов по Эйнштейну. Колебания и волны

в простой решетке. Нормальные координаты, Распределение Бозе-Эйнштейна, фононы. Тепловые свойства решетки. Теория Дебая. Теплоемкость, тепловое расширение и теплопроводность, параметр Грюнайзена. Электрон в периодическом поле. Теорема Блоха. Приближение почти свободных и сильно связанных электронов. Распределение Ферми-Дирака. Энергетические зоны электронов в кристалле. Диэлектрики, металлы и полупроводники. Статистическое равновесие свободных электронов в металлах и полупроводниках. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Концепция квазичастиц. Ферми-жидкость. Теплоемкость свободных электронов в металлах и полупроводниках. Примесная и собственная проводимость полупроводников. Квазиэлектроны и дырки. Гетеропереходы. Проводимость и теплопроводность. Концепция длины свободного пробега. Процессы рассеяния. Рассеяние на примесях. Рассеяние на фононах. Процессы переброса. Гальваномагнитные свойства. Эффект Холла в слабом и сильном магнитных полях. Термомагнитные и термоэлектрические явления. ТермоЭДС. Эффект Пельтье. Эффект Томсона. Дисперсия и поглощение света кристаллами. Оптические свойства металлов и полупроводников. Межзонные переходы. Поглощение света свободными носителями. Намагниченность и восприимчивость. Восприимчивость металлов. Парамагнетизм Паули. Диамагнетизм Ландау. Эффект Де Газа - Ван Альфвена и Шубникова - Де Гааза. Измерение парамагнитной восприимчивости Паули методом ЯМР. Магнитные свойства двухэлектронной системы. Синглетные и триплетные состояния. Спиновый гамильтониан, и модель Гейзенберга. Типы магнитных структур. Основное состояние гейзенберговского ферромагнетика и антиферромагнетика. Спиновые волны. Сверхпроводники. Сверхпроводники первого и второго рода. Длина когерентности и глубина проникновения. Термодинамическое критическое поле. Верхнее и нижнее критические поля. Структура абрикосовских вихрей. Структура аморфных твёрдых тел. Стёкла. Межатомное взаимодействие и классификация твёрдых тел. Упругие и теплофизические свойства твёрдых тел. Жидкости. Структура и свойства жидкостей. Поверхностные явления.

**Учебно-методическое обеспечение и информационное обеспечение программы
вступительного испытания в аспирантуру по научной специальности 1.3.8 Физика
конденсированного состояния**

1. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: учебное пособие: в 5 томах / Д. В. Сивухин. — 6-е изд., стереот. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2020 — Том 1: Механика — 2020. — 560 с. — ISBN 978-5-9221-1512-4. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/185713> (дата обращения: 03.02.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: учебное пособие: в 5 томах / Д. В. Сивухин. — 6-е изд., стереот. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2021 — Том 2: Термодинамика и молекулярная физика — 2021. — 544 с. — ISBN 978-5-9221-1514-8. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/185719> (дата обращения: 03.02.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: учебное пособие / Д. В. Сивухин. — 5-е изд., стер. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, [б. г.]. — Том 3: Электричество — 2009. — 656 с. — ISBN 978-5-9221-0673-3. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/2317> (дата обращения: 03.02.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
4. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: учебное пособие / Д. В. Сивухин. — 3-е изд., стер. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, [б. г.]. — Том 4: Оптика — 2002. — 792 с. — ISBN 5-9221-0228-1. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/2314> (дата обращения: 03.02.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
5. Сивухин, Д. В. Общий курс физики: учебное пособие: в 5 томах / Д. В. Сивухин. — 3-е изд., стереот. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2020 — Том 5: Атомная и ядерная физика — 2020. — 784 с. — ISBN 978-5-9221-0645-0. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная

- система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/185730> (дата обращения: 03.02.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
6. Ландсберг, Г. С. Оптика: учебное пособие / Г. С. Ландсберг. — 7-е изд., стереот. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2021. — 852 с. — ISBN 978-5-9221-1742-5. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/185678> (дата обращения: 03.02.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
 7. Епифанов, Г. И. Физика твердого тела: учебное пособие / Г. И. Епифанов. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 288 с. — ISBN 978-5-8114-1001-9. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/210671> (дата обращения: 03.02.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
 8. Петров, Ю. В. Основы физики конденсированного состояния: Учебное пособие / Ю.В. Петров. - Долгопрудный: Интеллект, 2013. - 216 с. ISBN 978-5-91559-110-2, 500 экз. - Текст: электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/484938> (дата обращения: 03.02.2025). — Режим доступа: по подписке.
 9. Стрекалов, Ю. А. Физика твердого тела: Учебное пособие / Ю.А. Стрекалов, Н.А. Тенякова. - М.: ИЦ РИОР: НИЦ Инфра-М, 2018. - 307 с.: - (Высшее образование: Бакалавриат). - ISBN 978-5-369-00967-3. - Текст: электронный. - URL: <https://znanium.ru/catalog/product/959952> (дата обращения: 03.02.2025). — Режим доступа: по подписке.
 10. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: учебное пособие для вузов: в 10 т. Том 3. Квантовая механика (нерелятивистская теория) / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц; под. ред. Л. П. Питаевского. - 6-е изд., испр. - Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2016. - 800 с. - ISBN 978-5-9221-0530-9. - Текст: электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1223529> (дата обращения: 03.02.2025). — Режим доступа: по подписке.
 11. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: учебное пособие для вузов: в 10 т. Том 5. Статистическая физика. Часть 1 / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц; под. ред. Л. П. Питаевского. — 6-е изд., стер. - Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2018. - 620 с. - ISBN 978-5-9221-1510-0. - Текст: электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1223531> (дата обращения: 03.02.2025). — Режим доступа: по подписке.
 12. Матухин, В. Л. Физика твердого тела: учебное пособие / В. Л. Матухин, В. Л. Ермаков. — Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 224 с. — ISBN 978-5-8114-0923-5. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/210305> (дата обращения: 03.02.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
 13. Шпольский, Э. В. Атомная физика: учебник: в 2 томах / Э. В. Шпольский. — 8-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2022 — Том 1: Введение в атомную физику — 2022. — 560 с. — ISBN 978-5-8114-1005-7. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/210398> (дата обращения: 03.02.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
 14. Шпольский, Э. В. Атомная физика: учебник: в 2 томах / Э. В. Шпольский. — 6-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2022 — Том 2: Основы квантовой механики и строение электронной оболочки атома — 2022. — 448 с. — ISBN 978-5-8114-1006-4. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/210401> (дата обращения: 03.02.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
 15. Капитонов, И. М. Введение в физику ядра и частиц: учебник / И. М. Капитонов. — 4-е изд. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 512 с. — ISBN 978-5-9221-1250-5. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/2189> (дата обращения: 03.02.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
 16. Ансельм, А. И. Введение в теорию полупроводников: учебное пособие / А. И. Ансельм. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 624 с. — ISBN 978-5-8114-0762-0. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/212255> (дата обращения: 03.02.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
 17. Брандт, Н. Б. Квазичастицы в физике конденсированного состояния: учебное пособие /

Н. Б. Брандт, В. А. Кульбачинский. — 3-е изд. — Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 632 с. — ISBN 978-5-9221-1209-3. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/59598> (дата обращения: 03.02.2025). — Режим доступа: для авториз. пользователей.