

**Программа**  
**вступительного испытания по специальной дисциплине**  
**в аспирантуре НИЦ «Курчатовский институт»**  
**по группе научных специальностей**  
**1.3. Физические науки**  
**1.3.20. Кристаллография, физика кристаллов**

**1. Общие положения**

1.1. Данная программа предназначена для подготовки к вступительным испытаниям в аспирантуру по специальной дисциплине. Программа вступительных испытаний в аспирантуру подготовлена в соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами высшего образования (уровень магистратуры или специалитета).

Экзамен проводится с целью выявления у поступающего объема научных знаний, научно-исследовательских компетенций, навыков системного и критического мышления, необходимых для обучения в аспирантуре. Поступающий должен показать профессиональное владение теорией и практикой в предметной области, продемонстрировать умение вести научную дискуссию.

1.2. Программой устанавливается:

форма, структура, процедура сдачи вступительного испытания; шкала оценивания;

максимальное и минимальное количество баллов для успешного прохождения вступительного испытания;

критерии оценки ответов.

1.3. Вступительное испытание проводится на русском языке.

1.4. Организация и проведение вступительного испытания осуществляется в соответствии с Правилами приема, утвержденными приказом НИЦ «Курчатовский институт».

1.5. По результатам вступительного испытания, поступающий имеет право подать на апелляцию о нарушении, по мнению поступающего, установленного порядка проведения вступительного испытания и (или)

о несогласии с полученной оценкой результатов вступительного испытания в порядке, установленном Правилами приема, действующими на текущий год поступления.

## **2. Форма, процедура проведения и шкала оценивания вступительного испытания**

2.1. Вступительное испытание проводится в форме экзамена на основе билетов. Экзамен проходит в устной форме. Подготовка к ответу составляет 1 астрономический час (60 минут) без перерыва с момента раздачи билетов. Ответ на билет оценивается от 0 до 10 баллов в зависимости от полноты и правильности ответов. Билет включает в себя два вопроса: один вопрос по общефизическим дисциплинам, один вопрос по научной специальности 1.3.20. Кристаллография, физика кристаллов.

2.2. Программа содержит перечень вопросов по специальной дисциплине, соответствующей научной специальности 1.3.20. Кристаллография, физика кристаллов.

В случае проведения экзамена в дистанционном формате вступительное испытание проводится в режиме видеоконференцсвязи.

2.3. Экзамен по специальной дисциплине оценивается по 10-балльной шкале.

Минимальное количество баллов, подтверждающее успешное прохождение вступительного испытания по специальной дисциплине, устанавливается равным 4 баллам.

### **Шкала оценивания**

<b>Оценка, баллы</b>	<b>Уровень подготовленности, характеризуемый оценкой</b>
9-10	Поступающий уверенно владеет материалом, приводит точные формулировки теорем, процессов и явлений, и других утверждений, сопровождает их строгими и полными доказательствами, уверенно отвечает на дополнительные вопросы программы вступительного испытания.

6-8	Поступающий владеет материалом, приводит точные формулировки теорем, процессов и явлений, и других утверждений, сопровождает их доказательствами, в которых допускает отдельные неточности. Отвечает на большинство дополнительных вопросов по программе вступительного испытания.
4-5	Поступающий знаком с основным материалом программы, приводит формулировки теорем, процессов и явлений, и других утверждений, но допускает некоторые неточности, сопровождает их доказательствами, в которых допускает погрешности либо описывает основную схему доказательств без указания деталей. Отвечает на дополнительные вопросы по программе вступительного испытания, допуская отдельные неточности.
0-3	Поступающий не владеет основным материалом программы, не знаком с основными понятиями, не способен приводить формулировки теорем, процессов и явлений, и других утверждений, не умеет доказывать теоремы и другие утверждения, не знает даже схемы доказательств. Не отвечает на большинство дополнительных вопросов по программе вступительного испытания.

### **3. Вопросы для подготовки к вступительному испытанию**

#### **1. Вопросы по общефизическим дисциплинам**

##### **Молекулярная физика**

1.1. Термодинамические (ТД) потенциалы и их свойства. Условия ТД-равновесия и устойчивости. Фазовые переходы.

1.2. Смешанное состояние. Матрица плотности. Канонические распределения Гиббса. Переход к статистической механике классических систем. Идеальный и неидеальный газ. Вириальное разложение. Системы с кулоновским взаимодействием. Дебаевское экранирование. Идеальные газы Ферми и Бозе и их ТД-свойства.

1.3. Теплоемкость двухатомного газа. Равновесное излучение. Формула Планка. Теплоемкость твердых тел по Дебаю.

1.4. Квази-ТД теория флуктуаций. Случайный стационарный марковский гауссовский процесс и его временная корреляционная функция. Уравнение Смолуховского и уравнение Фоккера-Планка.

1.5. Кинетические уравнения Больцмана. H-теорема. Уравнение Власова. Плазменные волны. Затухание Ландау.

### Литература

1. Квасников И.А. «Термодинамика и статистическая физика. Теория равновесных систем». М.: МГУ, 1991.
2. Квасников И. А. «Теория неравновесных систем». М.: МГУ, 1987.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. «Статистическая физика». М.: «Наука», 1976.

### **Электричество и магнетизм**

1.6. Уравнения Максвелла в вакууме. Уравнения для потенциалов при калибровке Лоренца. Разложение потенциалов электромагнитного поля для стационарных систем по мультиполям. Решение уравнений для потенциалов в виде запаздывающих потенциалов.

1.7. Излучение электромагнитных волн в электрическом дипольном приближении, интенсивность и угловое распределение, поляризация. Радиационное трение. Рассеяние электромагнитных волн на зарядах.

1.8. Законы преобразования плотностей заряда и тока, потенциалов и полей при преобразованиях Лоренца. Преобразования частоты и волнового вектора электромагнитной волны, эффект Доплера.

1.9. Законы преобразования энергии и импульса, связь энергии, импульса, массы и скорости релятивистской частицы. Функции Лагранжа для электромагнитного поля при заданных зарядах и токах. Уравнение движения релятивистской заряженной частицы во внешнем электромагнитном поле.

1.10. Уравнения Максвелла в среде, материальные уравнения и граничные условия. Пространственная и временная дисперсии. Закон сохранения энергии в электродинамике покоящихся тел.

1.11. Квазистационарное приближение в макроскопической электродинамике, основные уравнения и границы применимости. Скин-эффект.

1.12. Дисперсия диэлектрической проницаемости, физический смысл комплексной диэлектрической проницаемости. Формула Крамерса-Кронига. Излучение Вавилова-Черенкова.

### Литература

1. Власов А.А. «Макроскопическая электродинамика». М.: «Гостехиздат», 1955.
2. Денисов В.И. «Введение в электродинамику сплошных сред». М.: МГУ, 1989.
3. Джексон Дж. «Классическая электродинамика». М.: «Мир», 1965.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. «Теория поля». М.: «Наука», 1973.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. «Электродинамика сплошных сред». М.: «Наука», 1982.

### Оптика

1.13. Основы электромагнитной теории света. Волновое уравнение. Энергия и импульс оптических волн, световое давление. Поляризация света.

1.14. Интерференция света. Временная и пространственная когерентность. Интерферометры.

1.15. Дифракция света. Принцип Гюйгенса-Френеля, интеграл Кирхгофа. Дифракция Френеля и Фраунгофера. Спектральные приборы. Дифракционная теория формирования изображений.

1.16. Дисперсия света. Рассеяние света. Распространение оптических волн в анизотропных средах.

1.17. Основы теории излучения. Законы теплового излучения конденсированных сред, формула Планка. Излучение света атомами

и молекулами. Двухуровневая система, спонтанные и вынужденные переходы. Усиление света, лазеры.

1.18. Нелинейно-волновые явления: генерация гармоник и комбинационных частот, самовоздействие.

#### Литература

1. Ландсберг Г.С. «Оптика». М.: «Физматлит», 2021.

2. Калитеевский Н.И. «Волновая оптика» М.: «Высшая школа», 1978.

3. Бутиков Б.И. «Оптика». М.: «Высшая школа», 1986.

#### **Квантовая физика**

1.19. Постоянная Планка и ее экспериментальное определение. Опыт Штерна и Герлаха. Уравнение Шредингера и его свойства.

1.20. Законы изменения и сохранения физических величин. Принцип неопределенности Гейзенберга.

1.21. Чистые и смешанные состояния, матрица плотности, определение физических величин в чистом и смешанном состояниях. Энергетические спектры гармонического осциллятора и атома водорода в нерелятивистском приближении; спектр углового момента. Туннельный эффект.

1.22. Первый порядок теории возмущений в отсутствии и при наличии вырождения. Эффект Штарка. Сечение упругого рассеяния частиц в борновском приближении. Роль обменных эффектов при рассеянии тождественных частиц.

1.23. Гамильтонова и ковариантная форма уравнения Дирака, его свойства. Тонкая структура атома, лэмбовский сдвиг уровней, эффект Зеемана.

1.24. Система тождественных частиц, симметричные и антисимметричные состояния. Молекула водорода, силы Ван-дер-Ваальса.

1.25. Вторичное квантование в случае Бозе- и Ферми-частиц; оператор Гамильтона в представлении вторичного квантования. Вторичное квантование

свободного электромагнитного поля; интенсивности излучения и поглощения фотонов в дипольном приближении.

1.26. Простейшие диаграммы Фейнмана и сопоставление им матричных элементов. Вращательные, колебательные и электронные спектры молекул.

Литература

1. Давыдов А.С. «Квантовая механика». М.: «Наука», 1973.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. М.: «Наука», 1974.
3. Блохинцев Д.И. «Основы квантовой механики». М.: «Наука», 1983.
4. Соколов А.А., Лоскутов Ю.М., Тернов И.М. «Квантовая механика». М.: «Просвещение», 1965.
5. Мессиа А. «Квантовая механика». т.1,2. М.: «Наука», 1978.

## **2. Вопросы по научной специальности 1.3.20 Кристаллография, физика кристаллов.**

2.1. Предмет и метод кристаллографии и её место среди других наук. Геометрическая кристаллография.

2.2. Элементы огранения кристалла и зависимость между ними. Закон постоянства углов. Гониометрия кристаллов. Кристаллографические проекции.

2.3. Точечная симметрия кристаллов, операции и элементы симметрии. 32 класса симметрии и их вывод.

2.4. Установка кристаллов и кристаллографическая система координат. Закон целых чисел. Закон поясов. Зависимость между индексами граней и ребрами.

2.5. Формы роста кристаллов. Реальные и идеальные формы. Обзор простых форм по 32 классам. Комбинация простых форм.

2.6. Решетчатое строение кристаллов в свете атомно-молекулярного строения вещества. Рентгенографические и другие доказательства существования кристаллической решетки.

2.7. Пространственные группы симметрии. Трансляционная симметрия. Элементы симметрии с трансляционной компонентой.

2.8. Решетка Браве. Сингония и системы. Теория Федорова-Шенфлиса. Понятие о выводе 230 пространственных групп. Интернациональное обозначение.

2.9. Понятие об антисимметрии и цветной симметрии.

2.10. Методы определения атомной структуры кристаллов. Дифракция коротких волн в кристаллах. Формула Вульфа-Брегга.

2.11. Уравнение Лауэ. Рентгеновский метод и его возможности определения элементарной ячейки. Понятие об обратной решетке.

2.12. Понятие об электронографическом, нейтронографическом и недифракционных ЯМР, ЭПР и других методах исследования структуры.

2.13. Основы кристаллохимии. Исходные представления кристаллохимии. Межатомные расстояния, координационное число, понятие о радиусах.

2.14. Взаимодействие атомов, основные типы химической связи. Плотнейшие упаковки. Полиморфизм и фазовые переходы.

2.15. Металлические кристаллы, природа и энергия связи, сплавы, твердые растворы. Понятие о магнитной структуре.

2.16. Ионные кристаллы, ионные радиусы, изоморфизм, устойчивость структур и энергия решетки.

2.17. Ковалентные кристаллы, природа ковалентной связи. Органические кристаллы, природа Ван-дер-Ваальсовой связи, понятие о водородной связи. Жидкие кристаллы.

2.18. Основы термодинамики. Энергия решетки. Свободная энергия. Термодинамические потенциалы. Представление о термодинамике фазовых переходов.

2.19. Основы зонной теории кристаллов. Изоляторы, полупроводники и проводники. Энергетические зоны кристалла, симметрия зон Бриллюэна и связь с симметрией кристалла. Поверхность Ферми.

2.20. Тепловые колебания решетки. Фононный спектр. Теплоемкость. Теплопроводность кристаллов.

2.21. Точечные дефекты решетки. Вакансии. Межузельные атомы. Примесные атомы. Упорядочение.

2.22. Дислокации. Основные виды дислокаций. Контур и вектор Бюргерса. Методы наблюдения дислокаций.

2.23. Блочное строение кристаллов. Двойники. Классификация и основные типы, элементы двойникования, двойники в кварце.

2.24. Фазовое равновесие в однокомпонентных системах. Формула Клаузиуса-Клайперона. Понятие о пересыщении и переохлаждении. Равновесие в двухфазных системах. Диаграммы состояния.

2.25. Равновесная форма кристалла, правило Вульфа. Энергия присоединения частиц. Ступени роста.

2.26. Рост кристаллов. Образование зародышей. Источники ступеней и их движение. Эпитаксиальный рост. Спиральный рост. Секториальное и зонарное строение кристаллов. Захват примесей.

2.27. Облик реальных кристаллических индивидуумов. Анизотропия скорости роста. Вацинали. Нитевидные кристаллы. Скелетные и дендритные формы, двойники и двумерники, сферолиты.

2.28. Классификация и обзор методов выращивания кристаллов.

2.29. Виды кристаллизации из растворов. Кристаллизация из растворов в расплаве. Кристаллизация из растворов, методы Бриджмена-Стокбаргера, Чохральского- Киропулоса, Вернейля. Зонная плавка. Гидротермальный метод.

2.30. Кристаллизация при сверхвысоких давлениях. Кристаллизация из газовой фазы, химический метод получения монокристаллических пленок.

2.31. Макроскопические свойства кристаллов как анизотропной непрерывной среды. Скаляры, векторы, тензоры. Преобразование осей координат, компонентов векторов и тензоров. Характеристические поверхности тензоров, главные оси, приведение к главным осям.

2.32. Предельные группы симметрии. Симметрия кристалла и симметрия его физических свойств. Принцип Неймана. Принцип Кюри и его применение.

2.33. Механические свойства идеальной решетки. Представление о теории Борна. Упругие деформации и напряжения. Тепловое расширение. Обобщенный закон Гука и упругие постоянные кристаллы.

2.34. Теоретическая и реальная прочность решетки на разрыв и сдвиги, роль несовершенств. Пластическая деформация. Трансляционное скольжение и элементы скольжения, полосы скольжения. Кривые деформации монокристаллов, предел упругости, предел текучести, упрочнение, ползучесть, сбросы, роль дислокаций.

2.35. Диэлектрики, полупроводники и проводники. Поляризация диэлектриков, тензор диэлектрической проницаемости. Электронная и ионная поляризация. Линейные и нелинейные диэлектрики. Пироэлектрический эффект в линейных диэлектриках. Электрокалорический эффект. Электреты.

2.36. Пьезоэлектрический эффект в кристаллах и его тензорное описание. Понятие о б электрострикции.

2.37. Сегнетоэлектрики. Сегнетоэлектрические фазовые переходы. Доменная структура сегнетоэлектрических фазовых переходов. Доменная структура сегнетоэлектриков. Диэлектрический гистерезис и переориентация доменов.

2.38. Магнитные свойства кристаллов. Диамагнитные кристаллы, тензор магнитной восприимчивости. Ферромагнетизм, антиферромагнит, понятие об обменной энергии. Магнитная структура кристалла. Доменная структура, процессы намагничивания и перемагничивания.

2.39. Плоская волна в анизотропной среде. Двойное лучепреломление, эллипсоид Френеля, нормали и лучи в кристаллах. Поляризация света. Оптические свойства кристаллов различных сингоний. Оптические поверхности.

2.40. Дисперсия света в кристаллах. Интерференция в параллельных и сходящихся лучах. Коническая рефракция. Отражение света от кристаллических пластин.

2.41. Понятие об электрооптическом эффекте. Вращение плоскости поляризации света. Распространение света в оптически активных средах. Оптическая активность в кристаллах разных сингоний.

2.42. Поглощение света в кристаллах. Собственное поглощение, поглощение на примесях и дефектах. Люминесценция кристаллов. Понятие о кристаллических квантовых усилителях и генераторах света.

### **Основная литература:**

1. А. Г. Бетехтин «Курс минералогии: учебное пособие». М.: Книжный дом «Университет» (КДУ), 2007. — 721 с. ISBN 5-98227-.

2. Ю. К. Егоров-Тисменко под ред. академика В. С. Урусова «Кристаллография и кристаллохимия: учебник». М.: Книжный дом «Университет» (КДУ), 2005. — 592 с : ил. ISBN 5-98227-095-4

3. Киттель Ч. «Введение в физику твердого тела». Москва, Мир, 1986, 787 с.

4. Займан Ф. «Принципы теории твердого тела». Москва, Мир, 1984, 477 с.

5. «Современная кристаллография». В 4-х томах. Под ред. Б.К. Вайнштейна, Наука, Москва, 1979.

6. М.П. Шаскольская. «Кристаллография». Москва, «Высшая школа», 1976.

### **Дополнительная литература:**

1. А.С. Илюшин, А.П. Орешко «Дифракционный структурный анализ». М.: физический факультет МГУ, Издательский дом «Крепостновъ», 2013, 616 с.

2. Н. Ашкрофт, Н. Мермин «Физика твердого тела». Москва, Мир, Т. 1(2), 1979, 399 с (422 с).

3. Л. М. Блинов «Жидкие кристаллы. Структура и свойства», Либроком, 2015, 484 с.

4. Завьялов Е.Н. «Кристаллология. Основные представления о кристаллах, кристаллических веществах и методах их изучения. Задачи по геометрической кристаллографии и анализ их решений». Книжный дом «Университет» (КДУ), 2016, 314 с.