

УТВЕРЖДАЮ

Проректор

\_\_\_\_\_ С.Ю. Роцин

Одобрено на заседании Академического  
совета Аспирантской школы по физике

Согласовано

Академический директор Аспирантской  
школы по физике

\_\_\_\_\_ В.С. Храпай

**Программа вступительного испытания по специальности  
основной образовательной программы высшего образования – программы подготовки  
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре  
Физика и астрономия**

научные специальности:

- 1.3.1 Физика космоса, астрономия
- 1.3.3 Теоретическая физика
- 1.3.6 Оптика
- 1.3.8 Физика конденсированного состояния
- 1.3.10 Физика низких температур

## 1. Область применения и нормативные ссылки

Программа вступительного испытания сформирована на основе федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования по программам специалитета или магистратуры.

## 2. Структура вступительного экзамена

Вступительное испытание основной образовательной программы высшего образования – программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по образовательной программе «Физика и астрономия» состоит из двух частей: оценки индивидуальных достижений (конкурс портфолио) и оценки знаний по направленностям (блокам), каждая из которых соответствует научной специальности будущей научно-исследовательской работы (диссертации) абитуриента.

### 2.1. Оценка индивидуальных достижений. Структура портфолио

Общая сумма баллов не может превышать 40 баллов. Баллы назначаются в соответствии с таблицей при предоставлении подтверждающих документов.

Для участия в конкурсе индивидуальных достижений (портфолио) абитуриент может предоставить следующие документы:

1. Резюме (CV), включающее список публикаций, сведения об участии в конференциях, школах, исследовательских проектах, научных грантах, опыте работы и т.д. Резюме может быть составлено на русском или английском языке по желанию абитуриента.

2. Копия документа об образовании с перечнем пройденных дисциплин и оценок по этим дисциплинам. Если абитуриент еще не получил диплом специалиста или магистра, необходимо приложить официальную копию полного списка уже пройденных дисциплин с оценками.

3. Рекомендательное письмо от потенциального научного руководителя планируемого диссертационного исследования, в котором отражено его согласие выступить научным руководителем абитуриента в аспирантуре.

4. Собственные научные публикации.

5. Опыт участия в российских и международных конференциях с указанием информации о конференции и темы доклада, если таковые имеются (список конференций в виде файла PDF со ссылками на сайты конференций).

### 2.2. Критерии оценки портфолио

<b>Доклады на международных или внутренних конференциях</b>	<b>не более 5 баллов</b>
устный доклад	5 баллов
стендовый доклад	3 балла
<b>Рекомендательное письмо от потенциального научного руководителя с согласием на руководство в аспирантуре</b>	<b>20 баллов</b>
<b>Публикации в журналах по физике, индексируемых Web of Science или Scopus</b>	<b>не более 15 баллов</b>
журнал 1-го квартиля по WoS или Scopus	15 баллов
журнал 2-го квартиля по WoS или Scopus	10 баллов
журнал 3-го квартиля по WoS или Scopus	3 балла

**Минимальный балл (неудовлетворительная оценка) за портфолио – до 19 баллов включительно. Для участия в конкурсе по итогам оценки индивидуальных достижений необходимо набрать суммарно не менее 20 баллов.**

### **2.3. Структура и процедура проведения оценки знаний по научной специальности**

Для подготовки ко второй части вступительного испытания (оценке знаний по научной специальности) абитуриент выбирает один из пяти блоков вопросов из представленной ниже программы, соответствующий научной специальности будущей научно-исследовательской работы (диссертации).

Оценка знаний по научным специальностям 1.3.1 Физика космоса, астрономия, 1.3.6 Оптика, 1.3.10 Физика низких температур, 1.3.8 Физика конденсированного состояния проводится в форме устного ответа на вопросы экзаменационной комиссии.

В рамках оценивания знаний по научной специальности 1.3.3 Теоретическая физика проводится контрольная работа с последующим изложением результата решения предложенных задач и ответом на дополнительные теоретические вопросы экзаменационной комиссии. Контрольная работа включает задачи по математике, квантовой механике, теории поля, статистической физике. Затем происходит изложение полученных поступающим решений экзаменационной комиссии.

В ходе обсуждения поступающему могут быть заданы вопросы из всех разделов блока программы по соответствующей направленности. Также абитуриента могут спросить о предшествующей исследовательской работе, например, магистерском исследовании, или о планируемом диссертационном исследовании.

#### **Оценка уровня знаний (баллы):**

Итоговая оценка выставляется по 60-балльной шкале.

**Минимальное количество баллов, необходимое для участия в конкурсе по итогам оценки знаний по направленности, соответствующей научной специальности будущей научно-исследовательской работы (диссертации), – 10 баллов.**

#### **Критерии оценивания**

Выставляется усреднённая оценка по ответам на все вопросы экзаменационной комиссии по направленности, указанной в заявлении о поступлении в аспирантуру и соответствующей научной специальности будущей научно-исследовательской работы (диссертации) абитуриента.

<b>Критерии оценивания</b>	<b>Баллы</b>
Ответ полный, без замечаний, продемонстрированы полные знания	46-60
Ответ полный, с незначительными замечаниями	31-45
Ответ неполный, существенные замечания	11-30
Ответ на поставленный вопрос не дан	0-10

### **3. Содержание**

#### **Блок 1. Научная специальность 1.3.1 Физика космоса, астрономия**

##### **Раздел 1. Общие вопросы астрономии, небесная механика**

1. Основы механики движения.
2. Закон всемирного тяготения, законы Кеплера. Задача двух тел, типы движений в задаче 2-х тел.
3. Определение основных плоскостей: горизонта, небесного экватора, эклиптики, галактического экватора. Системы небесных координат. Прецессия, нутация, абберация (суточная и годовая).
4. Основы математической статистики. Распределения Пуассона, Гаусса. Методы проверки гипотезы оценки параметров. Метод наименьших квадратов. Вычисление среднеквадратичных отклонений. Перенос ошибок.

##### **Раздел 2. Наблюдательные и экспериментальные методы астрофизики**

5. Оптические телескопы и их основные параметры. Основные типы телескопов (рефракторы, рефлекторы, зеркально-линзовые системы, телескопы с адаптивной оптикой). Астроклимат.
6. Радиотелескопы. Основные типы и параметры антенн. Интерферометрия.
7. Методы внеатмосферной астрономии. Детекторы и оптика для ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов. Полупроводниковые детекторы.

##### **Раздел 3. Общая астрофизика**

8. Звезды: шкала звездных величин, фотометрические системы. Видимые и абсолютные звездные величины. Температура звезд, шкала звездных температур. Спектры звезд и их классификация. Диаграмма Герцшпрунга-Рэссела.
9. Собственные движения звезд, лучевые скорости звезд, движение Солнечной системы в Галактике.
10. Млечный путь и его строение. Звездные скопления. Межзвездная среда. Межзвездное поглощение света.
11. Галактики и их классификация, методы определения расстояний до галактик. Красное смещение. Радиогалактики. Квазары
12. Скопления галактик. Видимая и скрытая масса. Горячий газ в скоплениях галактик. Эффект Сюняева-Зельдовича.

## **Раздел 4. Солнечная система**

13. Солнце (размеры, масса, светимость, температура, спектр). Фотосфера, хромосфера, солнечная корона. Солнечная активность. Солнечный ветер.
14. Земля как планета. Атмосфера Земли, ее состав. Верхняя атмосфера, ионосфера, экзосфера.
15. Поверхность и форма Земли. Магнитное поле Земли, элементы земного магнетизма. Понятие о внутреннем строении Земли.
16. Планеты и малые тела солнечной системы.

## **Раздел 5. Теоретическая астрофизика**

17. Атомные спектры. Спектр атома водорода, линия 21 см. Спин, тонкая структура. Спектр молекулы водорода. Вероятности переходов. Молекулярные спектры. Вращательные и вращательно-колебательные полосы.
18. Звездные фотосферы. Основные понятия о теории излучения (коэффициенты поглощения и излучения, различные механизмы поглощения в континууме). Уравнение переноса. Гипотеза Л.Т.Р. Альбеда.
19. Тормозное излучение, излучение оптически тонкой и оптически толстой плазмы. Синхронное излучение.
20. Понятие о внутреннем строении звезд и их эволюции. Вырожденный электронный газ. Строение звезд главной последовательности. Красные гиганты и белые карлики. Основы теории эволюции звезд с постоянной массой.

## **Раздел 6. Специальные вопросы астрофизики**

21. Сверхновые и их классификация. Остатки вспышек сверхновых. Крабовидная туманность (спектр, компоненты свечения, основы теории).
22. Звездные остатки: белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. Пульсары. Предел устойчивости белого карлика и нейтронной звезды. Определение массы компактного объекта в двойной системе по измерению доплеровского смещения спектральных линий.
23. Основы теории аккреции на нейтронные звезды и черные дыры. Сферически симметричная и дисковая аккреция.
24. Механизмы рентгеновского и гамма-излучения. Формирование спектров компактных рентгеновских источников.
25. Внегалактические источники рентгеновского излучения. Космические гамма-всплески.

26. Основы космологии. Наблюдательные основы космологии: однородность распределения материи в самых больших масштабах; закон Хаббла. Возникновение структуры Вселенной. Ускоренное расширение Вселенной. Тёмная материя и тёмная энергия.

## **Раздел 7. (дополнительный) Линейные и нелинейные волны в диспергирующих средах.**

27. Примеры линейных уравнений и их взаимосвязь с дисперсионным соотношением.
28. Волновой пакет и его основные характеристики.
29. Дисперсия групповой скорости и ее роль в эволюции волнового пакета.
30. Уравнение эйконала и уравнения геометрической оптики.
31. Линеаризованное уравнение КдВ и решение соответствующей задачи Коши.
32. Пондеромоторная сила (сила Миллера).
33. Нелинейное параболическое уравнение.
34. Самофокусировка мощной электромагнитной волны в плазме.
35. Модуляционная неустойчивость. Критерий Лайтхилла
36. Уравнение КдВ и область его применимости. Законы сохранения для уравнения КдВ.
37. Стационарные уединенные и периодические решения уравнения КдВ.
38. Уравнение Бюргерса. Замена Коула-Хопфа.
39. \* Нелинейное уравнение Шредингера. Солитонное решение.
40. \* Уравнение Син-Гордон. Различные решения со стационарным профилем.

## **Раздел 8. (дополнительный) Волновые процессы в магнитоактивной плазме (магнитосфере).**

41. Общие представления о магнитосфере Земли и о земном магнитном поле.
42. Движение заряженных частиц в слабо неоднородном магнитном поле.
43. Магнитный момент, питч-угол и питч угол конуса потерь.
44. Уравнения Максвелла в анизотропной среде.
45. Тензор диэлектрической проницаемости холодной магнитоактивной плазмы.
46. Общее дисперсионное уравнение для волн в холодной магнитоактивной плазме.
47. Показатель преломления и поляризация волн в случае  $\mathbf{k} \parallel \mathbf{B}_0$ .
48. Общий вид показателя преломления в холодной магнитоактивной плазме в случае  $\omega_p^2 \gg \omega_c^2$ .  
Пять волновых мод.
49. Магнитозвуковые и альвеновские волны.
50. Свистовые волны в плотной плазме. Показатель преломления и дисперсионное соотношение.  
Угол Жандрэна. Теорема Стори. Поверхность показателя преломления.
51. Уравнение для амплитуды свистовой волны, распространяющейся вдоль внешнего магнитного

поля.

52. Уравнения движения резонансных частиц в поле свистовой волны и внешнем неоднородном магнитном поле. Случай сильной и слабой неоднородности.
53. \* Рассеяние волн на мелкомасштабных неоднородностях плотности.
54. \* Линейная трансформация волн в неоднородной плазме.

### Рекомендуемая литература

1. Кононович Э.В., Мороз В.И. Общий курс астрономии. М.:УРСС, 2011.
2. Бисноватый-Коган Г.С. Физические вопросы теории звездной эволюции. М.: Наука, 1989.
3. Сурдин В.Г. Звёзды, М.: Физматлит, 2009
4. Засов А.В., Постнов К.А. Общая астрофизика, 3-е издание, Век 2, 2015.
5. Черепашук А.М., Тесные двойные системы, в 2-х томах, М.: Физматлит 2013
6. Соболев В.В. Курс теоретической астрофизики. М.: Наука, 1975.
7. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. Теория тяготения и эволюция звезд. М.: Наука, 1971.
8. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. Строение и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1975.
9. Зельдович Я. Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных физических явлений. М.: Физматлит, 2008.
10. Мартынов Д.Я. Курс практической астрофизики. М.: Наука, 1977.
11. Фундаментальные космические исследования, Т.1 Астрофизика, М.: Физматлит 2014
12. Zombeck M. Handbook of Space Astronomy and Astrophysics, Cambridge University Press, 2007
13. Физика космоса: Маленькая энциклопедия. Ред. Р. А. Сюняев. М.: Сов. Энциклопедия, 1986.
14. Шкловский И.С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. М.: Наука, 1984.
15. Шапиро С., Тьюколски С. Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды. М.: Мир, 1985.
16. Лонгейр М. Астрофизика высоких энергий. М.: Мир, 1984.
17. Аккреционные процессы в астрофизике, под ред. Н.И.Шакуры, М.: Физматлит 2016
18. Горбунов Д. С., Рубаков В. А. Введение в теорию ранней Вселенной: Теория Горячего большого взрыва. М.: Изд-во ЛКИ/URSS, 2008.

### ПРИМЕР ЭКЗАМЕНАЦИОННОГО БИЛЕТА (ЗАДАНИЙ УСТНОГО ЭКЗАМЕНА)

**Вопрос 1.** Законы Кеплера. Движение планет.

**Вопрос 2.** Тормозное и синхротронное излучение. Формирование спектров компактных рентгеновских источников.

## **Блок 2. Научная специальность 1.3.3 Теоретическая физика**

### **Раздел 1. Квантовая механика.**

#### **Основные вопросы.**

1. Основные положения квантовой механики. Принцип неопределённости. Принцип суперпозиции. Операторы. Дискретный и непрерывный спектры. Гамильтониан. Стационарные состояния. Гейзенберговское представление. Соотношения неопределённости.
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. Чётность. 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. Самосогласованное поле. Уравнение Томаса-Ферми. Тонкая структура темных 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.

#### **Рекомендуемая литература**

11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М., ФМЛ, 2001.
12. Галицкий В.М., Карнаков Б.М., Коган В.И., Задачи по квантовой механике. М., Наука, 1992.



## Раздел 2. Теория поля.

### Основные вопросы.

11. Заряд в электромагнитном поле. Четырёхмерный потенциал поля. Уравнения движения заряда в поле, калибровочная (градиентная) инвариантность. Тензор электромагнитного поля. Преобразование Лоренца для поля. Инварианты поля.
12. Действие для электромагнитного поля. Уравнения электромагнитного поля. Четырёхмерный вектор тока. Уравнение непрерывности. Плотность и поток энергии. Тензор энергии-импульса. Тензор энергии-импульса электромагнитного поля.
13. Постоянное электромагнитное поле. Закон Кулона. Электростатическая энергия зарядов. Дипольный момент. Мультипольные моменты. Система зарядов во внешнем поле. Постоянное магнитное поле. Магнитный момент. Теорема Лармора. Движение заряженных частиц в слабонеоднородном магнитном поле.
14. Электромагнитные волны. Волновое уравнение. Плоские волны. Монохроматическая плоская волна. Спектральное разложение. Поляризационные характеристики излучения. Разложение электростатического поля.
15. Поле движущихся зарядов. Запаздывающие потенциалы. Потенциалы Лиенара-Вихерта. Излучение электромагнитных волн. Поле системы зарядов на далёких расстояниях. Мультипольное излучение. Излучение быстродвижущегося заряда. Рассеяние свободными зарядами.

### Рекомендуемая литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М., Наука, 2003.
2. Топтыгин, И. Н. (2002). Современная электродинамика, часть 1. Микроскопическая теория. Москва-Ижевск: РХД

## Раздел 3. Статистическая физика.

### Основные вопросы.

16. 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.
17. 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. Термодинамика идеальных газов. Распределение Больцмана. Столкновение молекул. Неравновесный идеальный газ.

Закон равнораспределения. Одноатомный идеальный газ.

18. 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 чёрного тела.
19. Неидеальные газы и конденсированные среды. Фононные спектры и термодинамические свойства газа. Термодинамические свойства неидеального классического газа.
20. Равновесие фаз. Формула Клапейрона-Клаузиса. Критическая точка.
21. 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.
22. Слабо-неидеальный бозе-газ. Модель Боголюбова. Спектр возбуждений. Сверхтекучесть. Квантовые вихри.
23. Твёрдые тела. Кристаллические структуры. Поверхность Ферми. Зонная структура. Квазичастицы.
24. Колебания решётки. Теория упругости. Звук в твёрдых телах. Процессы распада и слияния фононов. Рассеяние фононов на примесях. Кинетическое уравнение для фононов. Теплопроводность.
25. 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.
26. Флуктуации. Распределение Гиббса. Флуктуации основных термодинамических величин. Формула Пуассона. Временные флуктуации. Симметрии кинетических коэффициентов. Флуктуационно-диссипативная теорема.
27. Фазовые переходы второго рода. Теория Ландау. Критические индексы. Масштабная инвариантность. Флуктуации в окрестности критической точки.

## **Рекомендуемая литература**

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Ч.1. М.: ФМЛ, 2001.
2. Кубо Р. (1967). Статистическая механика. Мир.

## **Раздел 4. Математические методы физики.**

### **Основные вопросы.**

17. Теория функций комплексного переменного.
18. Вычисление интегралов вычетами.
19. Решение уравнений с помощью контурных интегралов (метод Лапласа).
20. Вычисление асимптотик интегралов.
21. Специальные функции (Лежандра, Бесселя, эллиптические, гипергеометрические, гамма-функции).

### Рекомендуемая литература

1. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В., Методы теории функций комплексного переменного, Лань, СП, 2002.
2. Смирнов В. И., Курс высшей математики, Лань, СП. 2008.
3. Бейтмен Г., Эрдейи А., Высшие трансцендентные функции, Лань, СП, 2001.

### ПРИМЕР ЭКЗАМЕНАЦИОННОГО БИЛЕТА (заданий контрольной работы)

**Задача 1.** Найдите электрическую поляризуемость атома водорода, находящегося в основном состоянии.

**Задача 2.** Магнитный диполь  $\vec{\mu}$  и электрический диполь  $\vec{d}$  прикреплены к точечному объекту и колеблются с частотой  $\omega$ ,  $\mu_x = \mu_0 \cos(\omega t)$ ,  $d_x = d_0 \cos(\omega t)$ , а их направления ортогональны,  $\vec{\mu} \perp \vec{d}$ . Чему равна сила (её среднее по времени значение), необходимая для удержания в покое этого объекта, если полная мощность излучения равна 1 ГВт (мощность генерации одного атомного реактора)?

**Задача 3.** Вычислить константу равновесия  $K_p = P_{N_2}^2 / P_{N_2}$  ( $P$  – давление) реакции диссоциации  $N_2 \rightleftharpoons 2N$  молекул азота при  $5000^\circ \text{K}$  в следующих предположениях: квант колебаний молекулы  $N_2$  равен в кельвинах  $\Theta_v = 3.35 \cdot 10^3 \text{K}$ , а минимальный квант вращательной энергии составляет  $2 \cdot 84^\circ \text{K}$ . Энергия диссоциации  $D_0 = 169.3 \text{ ккал/моль}$  (с учётом поправки на энергию нулевых колебаний). Основное электронное состояние молекулы  $N_2$  невырождено, но основное состояние атома азота имеет четырёхкратное вырождение, обусловленное электронным спином.

**Задача 4.** Построить ортонормированный базис для оператора Шредингера  $H = -\frac{1}{2} \partial^2 + \exp(x)$ , определённого на прямой  $x \in \mathbb{R}$ .

### **Блок 3. Научная специальность 1.3.6 Оптика**

#### **Раздел 1. Классическая электромагнитная теория света**

1. Опыты Физо и Майкельсона. Преобразования Лоренца. Продольный и поперечный эффекты Доплера.
2. Уравнения Максвелла. Вектор Умова-Пойнтинга. Волновое уравнение. Плоские и сферические волны.
3. Излучение диполя. Ближнее и дальнее поле. Магнито-дипольное и электро-квадрупольное излучение.
4. Поляризация света. Двойное лучепреломление. Поляризаторы. Электрооптические эффекты Керра и Поггеля. Оптическая активность. Эффект Фарадея.
5. Отражение и преломление света на границе раздела изотропных сред. Формулы Френеля. Полное внутреннее отражение. Угол Брюстера.
6. Оптика металлов. Скин-эффект.
7. Дисперсия света. Диэлектрическая проницаемость в разных областях спектра. Аномальная дисперсия. Фазовая и групповая скорости света. Дисперсия плазмы.

#### **Раздел 2. Геометрическая оптика**

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

#### **Раздел 3. Интерференция и дифракция света, спектральные приборы**

11. Интерференция волн. Классические интерференционные опыты (двух- и много-лучевые). Влияние степени монохроматичности и размеров источников на интерференционную картину.
12. Интерферометры двухлучевые и многолучевые. Интерферометр Фабри–Перо и его разрешающая способность. Интерферометр Майкельсона. Фурье-спектрометр. Многослойные покрытия.
13. Принцип Гюйгенса-Френеля (Кирхгофа). Зоны Френеля. Дифракция Фраунгофера и Френеля.
14. Дифракционная решётка. Эшелон Майкельсона. Разрешающая способность

спектральных приборов.

15. Голография.

#### **Раздел 4. Квантовая теория излучения и взаимодействия света свеществом**

16. Спонтанное излучение. Скорость спонтанного распада. Метастабильные состояния. Спектр спонтанного излучения. Эффект Доплера и эффект отдачи.

17. Тепловое излучение. Законы Кирхгофа, Стефана–Больцмана и Вина. Формула Планка.

18. Индуцированное излучение и поглощение. Коэффициенты Эйнштейна. Сечение индуцированных переходов. Форма линии поглощения.

19. Правила отбора для излучения и поглощения. Электродипольное приближение. Правила отбора по чётности и угловому моменту. Приближенные правила отбора для атомов и молекул.

20. Когерентное излучение атомного ансамбля. Суперпозиционные состояния. Макроскопическая поляризация. Интенсивность и фаза когерентного излучения. Дифракционная расходимость. Сверхизлучение Дике.

21. Когерентное возбуждение двухуровневой системы. Приближение вращающейся волны (резонансное приближение). Осцилляции Раби. Влияние релаксационных процессов.

22. Многофотонный резонанс. Штарковский сдвиг уровней. Многофотонная частота Раби. Бигармоническое возбуждение.

23. Упругое рассеяние света. Комбинационное (рамановское) рассеяние (КР). Правила отбора. Альтернативный запрет. Стоксово и антистоксово КР. Вынужденное рассеяние. Гиперкомбинационное рассеяние.

24. Корпускулярные свойства электромагнитного излучения. Фотоэффект и его объяснение. Энергия и импульс фотона. Эффект Комптона.

#### **Раздел 5. Статистическая и квантовая оптика**

25. Временная и пространственная когерентность световых полей. Корреляционные функции первого и высших порядков. Когерентность первого и второго порядков. Спектральное представление. Теорема Винера—Хинчина.

26. Интерферометрия интенсивностей. Опыт Брауна—Твисса.

27. Различные квантовые состояния световых полей. Свойства когерентных состояний. Фоковское, когерентное и сжатое состояния поля. Распределение Бозе—Эйнштейна.

28. Статистические свойства лазерного излучения. Закон Кирхгофа и шумы квантовых усилителей света. Корреляционная спектроскопия. Эффекты группировки и антигруппировки фотонов.

29. Пуассоновская, субпуассоновская и суперпуассоновская статистика фотонов. Связь

статистик фотонов и фотоотсчетов. Формула Мандела для распределения фотоотсчётов. Дробовой шум.

## **Раздел 6. Атомная спектроскопия**

30. Атом водорода. Квантовые числа. Уровни и спектр излучения атома водорода. Лэмбовский сдвиг.
31. Спин электрона. Принцип Паули. Периодическая система элементов Менделеева и структура электронных оболочек. Валентность. Изотопический эффект.
32. Систематика спектров многоэлектронных атомов. Определение набора термов. Мультиплетная структура.
33. Ридберговские атомы. Водородоподобные уровни.
34. Тонкая структура. Спин и квадрупольный момент ядра. Сверхтонкая структура.
35. Эффекты Зеемана и Штарка. Эффект Пашена–Бака. Эффект Штарка у водорода.

## **Раздел 7. Молекулярная спектроскопия**

36. Адиабатическое приближение. Группы симметрии молекул. Классификация нормальных колебаний по типам симметрии.
37. Правила отбора в колебательных спектрах. Эффекты ангармонизма. Резонанс Ферми.
38. Квантование вращения твёрдого тела. Взаимодействие колебаний и вращения молекулы. Кориолисово расщепление.
39. Колебательные спектры поглощения и комбинационного рассеяния света. Вращательная структура колебательных полос.
40. Электронные спектры молекул. Классификация электронных состояний двухатомных молекул. Классификация электронных состояний многоатомных молекул.
41. Электронно-колебательно-вращательные спектры. Принцип Франка–Кондона. Предиссоциация.

## **Раздел 8. Оптика и спектроскопия твёрдого тела**

42. Типы связей в кристаллах. Симметрия кристаллов. Теорема Блоха. Обратная решётка. Зоны Бриллюэна.
43. Проводники, изоляторы, полупроводники. Электронные зоны. Переходы под

действием света в идеальном кристалле.

44. Фононы. Модель Дебая. Ангармонические эффекты. Взаимодействие света с фононной подсистемой, поглощение света в инфракрасной области спектра.
45. Диэлектрическая и магнитная восприимчивости. Эффективное поле. Дисперсия диэлектрической проницаемости. Соотношения Крамерса-Кронига. Формула Лорентц-Лоренца. Нормальная и аномальная дисперсии. Запрещённая зона и область прозрачности в диэлектриках.
46. Экситоны Ванье—Мотта и Френкеля. Понятие о поляритонах и плазмонах. Полярны.
47. Фотонные кристаллы. Квантовые ямы. Квантовые проволоки. Квантовые точки.

## **Раздел 9. Методы лазерной спектроскопии и нелинейной оптики**

48. Принцип работы лазера. Инверсия населённости. Схемы накачки. Свойства лазерных пучков.
49. Типы лазеров. Режимы работы лазеров. Синхронизация мод. Генерация ультракоротких импульсов.
50. Когерентное антистоксово рассеяние света (КАРС). Четырёхволновое смешение. Условие фазового синхронизма. Отражение бегущей волны от стоячей (обращение волнового фронта).
51. Трёхволновое смешение в нецентросимметричных средах. Генерация суммарной и разностной частот. Генерация гармоник. Параметрическое рассеяние.
52. Спектроскопия сверхвысокой чувствительности: флуоресцентная спектроскопия, фотоионизационная спектроскопия. Спектроскопия и детектирование одиночных атомов и молекул.
53. Модуляционные методы абсорбционной спектроскопии: интерферометрия, частотная модуляция, штарковская спектроскопия, магнитный резонанс, поляризационная спектроскопия, фарадеевская спектроскопия.
54. Методы двойного резонанса. Эффект Ханле. Метод квантовых биений. Фотонное эхо.
55. Субдоплеровская спектроскопия. Узкие резонансы в спектроскопии насыщения. Лэмбовский провал. Узкий резонанс в стоячей волне на двухфотонном переходе.
56. Применение атомных и молекулярных пучков, охлаждённых молекулярных струй. Лазерное охлаждение ионов в ловушках. Замедление и охлаждение атомных пучков резонансным световым давлением. Лазерные ловушки для атомов.
57. Пролётное уширение линий. Схема Рамзи для устранения пролётного уширения в микроволновой спектроскопии. Модификация схемы Рамзи для оптической области — метод разнесённых лазерных полей.

## 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.



## **ПРИМЕР ЭКЗАМЕНАЦИОННОГО БИЛЕТА (ЗАДАНИЙ УСТНОГО ЭКЗАМЕНА)**

**Вопрос 1.** Формулы Френеля. Полное внутреннее отражение. Угол Брюстера.

**Вопрос 2.** Тепловое излучение. Законы Кирхгофа, Стефана–Больцмана и Вина. Формула Планка.

## **Блок 4. Научная специальность 1.3.8 Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)**

### **Раздел 1. Силы связи в твердых телах**

#### **Основные вопросы.**

1. Электронная структура атомов. Химическая связь и валентность. Типы сил связи в конденсированном состоянии: ван-дер-ваальсова связь, ионная связь, ковалентная связь, металлическая связь.
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 CaTiO<sub>3</sub>.
3. Основные свойства ковалентной связи. Структура веществ с ковалентными связями. Структура веществ типа селена. Гибридизация атомных орбиталей в молекулах и кристаллах. Структура типа алмаза и графита.

### **Раздел 2. Симметрия твердых тел**

4. 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.
5. Элементы симметрии кристаллов: повороты, отражения, инверсия, инверсионные повороты, трансляции. Операции (преобразования) симметрии.
6. Элементы теории групп, группы симметрии. Возможные порядки поворотных осей в кристалле. Пространственные и точечные группы (кристаллические классы). Классификация решеток Браве.

### **Раздел 3. Дефекты в твердых телах**

7. Точечные дефекты, их образование и диффузия. Вакансии и межузельные атомы. Дефекты Френкеля и Шоттки.
8. Линейные дефекты. Краевые и винтовые дислокации. Роль дислокаций в пластической деформации.

### **Раздел 4. Дифракция в кристаллах**

9. Распространение волн в кристаллах. Дифракция рентгеновских лучей, нейтронов и электронов в кристалле. Упругое и неупругое рассеяние, их особенности.
10. Брэгговские отражения. Атомный и структурный факторы. Дифракция в аморфных веществах.

## **Раздел 5. Колебания решетки**

11. 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.

## **Раздел 6. Тепловые свойства твердых тел**

12. Теплоемкость твердых тел. Решеточная теплоемкость. Электронная теплоемкость. Температурная зависимость решеточной и электронной теплоемкости.
13. Классическая теория теплоемкости. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы в классической физике. Границы справедливости классической теории.
14. Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну и Дебаю. Предельные случаи высоких и низких температур. Температура Дебая.
15. Тепловое расширение твердых тел. Его физическое происхождение. Ангармонические колебания.
16. Теплопроводность решеточная и электронная. Закон Видемана - Франца для электронной теплоемкости и теплопроводности.

## **Раздел 7. Электронные свойства твердых тел**

17. Электронные свойства твердых тел: основные экспериментальные факты. Проводимость, эффект Холла, термоЭДС, фотопроводимость, оптическое поглощение. Трудности объяснения этих фактов на основе классической теории Друде.
18. Основные приближения зонной теории. Граничные условия Борна - Кармана. Теорема Блоха. Блоховские функции. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны.
19. Брэгговское отражение электронов при движении по кристаллу. Полосатый спектр энергии.
20. Приближение сильносвязанных электронов. Связь ширины разрешенной зоны с перекрытием волновых функций атомов. Закон дисперсии. Тензор обратных эффективных масс.
21. Приближение почти свободных электронов. Брэгговские отражения электронов.
22. Заполнение энергетических зон электронами. Поверхность Ферми. Плотность состояний. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Полуметаллы.

## **Раздел 8. Магнитные свойства твердых тел**

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

24. Природа ферромагнетизма. Фазовый переход в ферромагнитное состояние. Роль обменного взаимодействия. Точка Кюри и восприимчивость ферромагнетика.
25. Ферромагнитные домены. Причины появления доменов. Доменные границы (Блоха, Нееля).
26. Антиферромагнетики. Магнитная структура. Точка Нееля. Восприимчивость антиферромагнетиков. Ферримагнетики. Магнитная структура ферримагнетиков.
27. Спиновые волны, магноны.
28. Движение магнитного момента в постоянном и переменном магнитных полях. Электронный парамагнитный резонанс. Ядерный магнитный резонанс.

## **Раздел 9. Оптические и магнитооптические свойства твердых тел**

29. Комплексная диэлектрическая проницаемость и оптические постоянные. Коэффициенты поглощения и отражения. Соотношения Крамерса-Кронига.
30. Поглощения света в полупроводниках (межзонное, примесное поглощение, поглощение свободными носителями, решеткой). Определение основных характеристик полупроводника из оптических исследований.
31. Магнитооптические эффекты (эффекты Фарадея, Фохта и Керра).
32. Проникновение высокочастотного поля в проводник. Нормальный и аномальный скин-эффекты. Толщина скин-слоя.

## **Раздел 10. Сверхпроводимость**

33. Сверхпроводимость. Критическая температура. Высокотемпературные сверхпроводники. Эффект Мейснера. Критическое поле и критический ток.
34. Сверхпроводники первого и второго рода. Их магнитные свойства. Вихри Абрикосова. Глубина проникновения магнитного поля в образец.
35. Эффект Джозефсона.
36. Куперовское спаривание. Длина когерентности. Энергетическая щель.

## **Рекомендуемая литература**

- Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. Т. I, II. М.: Мир, 1979. Уэрт Ч., Томсон Р. Физика твердого тела. М.: Мир, 1969.
- Займан Дж. Принципы теории твердого тела. М.: Мир, 1974.
- Павлов П.В., Хохлов А.Ф. Физика твердого тела. М.: Высш. шк., 2000.
- Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971.
- Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1979.
- Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводимости. МЦ НМО, М., 2000.

**ПРИМЕР ЭКЗАМЕНАЦИОННОГО БИЛЕТА (ЗАДАНИЙ УСТНОГО**

## ЭКЗАМЕНА)

**Вопрос 1.** Квантовая теория теплоемкости по Эйнштейну и Дебаю. Предельные случаи высоких и низких температур. Температура Дебая.

**Вопрос 2.** Основные приближения зонной теории. Граничные условия Борна - Кармана. Теорема Блоха. Блоховские функции. Квазиимпульс. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны.

## **Блок 5. Научная специальность 1.3.10 Физика низких температур**

### **Раздел 1. Методы получения низких температур**

1. Идеальный процесс ожижения газов и минимальная работа ожижения.
2. Ожижение водорода и гелия.
3. Охлаждение путем откачки паров  $^3\text{He}$  и  $^4\text{He}$ , методом растворения  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ . Охлаждение с использованием эффекта Померанчука и адиабатического размагничивания.
4. Термометрия при низких температурах.

### **Раздел 2. Термодинамика и статистическая физика.**

5. Распределения Гиббса, Максвелла, Больцмана.
6. Второе начало термодинамики. Термодинамические потенциалы, соотношения между их производными.
7. Термодинамические функции идеального газа. Теорема равнораспределения энергии по степеням свободы.
8. Условие равновесия фаз. Уравнение Клайперона-Клаузиуса.
9. Критическая точка.
10. Фазовые переходы второго рода. Изменение симметрии и параметр порядка. Скачок теплоемкости. Критические индексы.
11. Распределения Бозе и Ферми. Температура вырождения.
12. Порядок величины теплоемкости вырожденного Ферми-газа.

### **Раздел 3. Симметрия, кристаллография**

13. Определение структуры кристаллов с помощью рассеяния рентгеновских лучей.
14. Решетки Браве. Обратная решетка, зона Бриллюэна.
15. Кристаллические структуры простых веществ.
16. Жидкие кристаллы.

### **Раздел 4. Тепловые свойства диэлектриков**

17. Теплоемкость: закон Дебая, закон Дюлонга и Пти. Температура Дебая.
18. Теплопроводность диэлектриков. Зависимость от температуры. Роль процессов переброса.

## **Раздел 5. Магнитные свойства диэлектриков**

19. Атом в магнитном поле. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Закон Кюри.
20. Гамильтониан Гейзенберга.
21. Магнитоупорядоченные вещества
22. Ферромагнетики. Закон Кюри-Вейсса.
23. Антиферромагнетики. Продольная и поперечная восприимчивость АФМ.
24. Ферримагнетики.
25. Магнетики в слабых и сильных магнитных полях.
26. Спиновые волны. Закон дисперсии для ферро- и антиферромагнетика.
27. Температурная зависимость магнитного вклада в теплоемкость и намагниченности ферромагнетика в приближении теории спиновых волн.
28. Резонансы. ЯМР, ЭПР, ФМР, АФМР. Области частот резонансов.

## **Раздел 6. Нормальные металлы**

29. Модель свободных электронов. Энергия, импульс, скорость, температура Ферми. Плотность состояний
30. Закон дисперсии электрона в периодическом потенциале.
31. Энергетические зоны.
32. Закрытые и открытые поверхности Ферми.
33. Элементарные формулы для проводимости и теплопроводности. Температурная зависимость проводимости и теплопроводности металлов. Закон Видемана-Франца.
34. Диамагнетизм Ландау и парамагнетизм Паули.
35. Аномальный скин-эффект. Циклотронный резонанс.
36. Квантовые осцилляции магнитного момента и сопротивления.

## **Раздел 7. Сверхпроводники**

37. Изменение свободной энергии, энтропии, теплоемкости при переходе металла из нормального состояния в сверхпроводящее в магнитном поле.

38. Соотношения БКШ для критической температуры  $T_c$  и энергетической щели  $\Delta$ . Электронный энергетический спектр возбуждений в сверхпроводнике и нормальном металле. Связь между шириной щели и  $H_c$  при  $T=0$ .
39. Зависимость теплоемкости и теплопроводности сверхпроводников от температуры при низкой температуре
40. Длина когерентности и глубина проникновения. Выражение этих величин через ширину щели, фермиевскую скорость, массу и плотность электронов. Квантование магнитного потока. Эффекты Джозефсона.
41. Сверхпроводники I и II рода. Кривые намагничивания. Структура сверхпроводников в смешанном состоянии. Вихри Абрикосова.

## Раздел 8. Гелий-4 и гелий-3

42. Фазовая диаграмма  $^4\text{He}$  и  $^3\text{He}$ .
43. Энергетический спектр сверхтекучего  $^4\text{He}$  и критическая скорость Ландау. Температурная зависимость фононного и ротонного вклада в теплоемкость.
44. Термомеханический эффект. 1-й и 2-й звуки. Вихри в сверхтекучем  $^4\text{He}$ .
45. Ферми-жидкость: температура вырождения, теплоемкость, вязкость, теплопроводность.

### Рекомендуемая литература

1. Ч. Киттель. Введение в физику твердого тела; изд. 2-е, Наука, 1978.
2. Дж. Займан. Принципы теории твердого тела. Мир, 1974.
3. А.А. Абрикосов. Основы теории металлов, Наука, 1987.
4. И.М. Лифшиц, М.Я. Азбель, М.И. Каганов. Электронная теория металлов, Наука, 1971.
5. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Статистическая физика, Наука, 1976. Квантовая механика, Наука, 1974. Электродинамика сплошных сред, Наука, 1982.
6. Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. Статистическая физика, ч. II, Наука, 1978. Физическая кинетика, Наука, 1979.
7. Н. Ашкрофт, Н. Мермин. Физика твердого тела. М.: Мир, 1979.
8. М.И. Попов. Термометрия и калориметрия. М.: Изд. МГУ, 1954.
9. О.В. Лоунасама. Принципы и методы получения температур ниже 1 К. М.: Мир, 1977.
10. А.С. Боровик-Романов. Лекции по низкотемпературному магнетизму.
11. В.В. Шмидт. Введение в сверхпроводимость. М.: Наука, 1982.
12. Справочник по физико-техническим основам криогеники. Москва, Энергоатомиздат, 1985 (под ред. М.П. Малкова).
13. А. Абрагам, М. Гольдман. Ядерный магнетизм: порядок и беспорядок Москва "Мир", 1984.
14. D. Vollhardt, P. Wolfle "The Superfluid phases of Helium 3".
15. В.П. Минеев. Сверхтекучий гелий-3, введение в предмет. УФН 139, 303 (1983).
16. Дж. Тилли и Дж. Тилли. Сверхтекучесть и сверхпроводимость. М. 1977, (есть русский и английский варианты).



## **ПРИМЕР ЭКЗАМЕНАЦИОННОГО БИЛЕТА (ЗАДАНИЙ УСТНОГО ЭКЗАМЕНА)**

**Вопрос 1.** Теплоемкость диэлектрических кристаллов. Температура Дебая.

**Вопрос 2.** Закон дисперсии электрона в металле. Зоны Бриллюэна. Энергетические зоны.