

**Программа**  
**вступительного испытания по специальной дисциплине**  
**в аспирантуре НИЦ «Курчатовский институт»**  
**по группе научных специальностей**  
**1.3. Физические науки**  
**1.3.1. Физика космоса, астрономия**

**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 магистра или специалиста).

Экзамен проводится с целью выявления у поступающего объёма 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 академический 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 по общефизическим и математическим дисциплинам, один вопрос по дисциплине специализации.

Вопросы по общей физике охватывают следующие темы: колебания и волны, основы молекулярной физики, термодинамики, оптики, а также квантовой и ядерной физики.

Вопросы по высшей математике призваны определить на основе решения конкретных математических примеров уровень владения поступающим в аспирантуру математическими навыками, необходимыми при решении физических задач.

Вопросы специализации включают в себя вопросы по научной специальности  
1.3.1 Физика космоса, астрономия.

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

2.2. 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 к экзамену

#### 3.1. Вопросы по общефизическим и математическим дисциплинам

##### Колебания, основы молекулярной физики и термодинамики

1.1. Свободные колебания системы без трения. Математический маятник. Физический маятник. Сложение гармонических колебаний одного направления. Биения. Затухающие колебания. Вынужденные колебания. Резонанс.

1.2. Различные формы записи уравнения состояния идеального газа. Уравнение адиабаты идеального газа. Работа, совершаемая идеальным газом при политропическом и адиабатическом процессе. Физический смысл энтропии идеального газа.

1.3. Число ударов молекул газа о стенку. Газокинетический вывод выражения для давления газа на стенку. Основное уравнение молекулярнокинетической теории газов.

1.4. Распределение Максвелла. Наиболее вероятная скорость молекул, средняя арифметическая и средняя квадратичная скорости молекул. Распределение Больцмана. Распределение молекул по координатам. Барометрическая формула.

1.5. КПД тепловой машины. КПД цикла Карно. Теорема Карно.

1.6. Явления переноса. Диффузия газов. Газокинетический вывод выражения для коэффициента диффузии. Вязкость газов. Газокинетический вывод выражения для коэффициента вязкости. Теплопроводность газов. Газокинетический вывод выражения для коэффициента теплопроводности.

### **Основы электромагнетизма**

1.7. Линии напряженности электрического поля и эквипотенциальные поверхности. Связь между напряженностью и потенциалом. Работа силы электрического поля. Потенциал. Электрический диполь в однородном и неоднородном поле (вращательный момент, энергия, сила). Дипольный электрический момент системы зарядов. Поле электрического диполя.

1.8. Поле вне и внутри объемно заряженного шара. Поле одной и двух заряженных плоскостей. Емкость. Конденсаторы. Емкость плоского конденсатора. Энергия заряженного конденсатора. Энергия электрического поля. Плотность энергии.

1.9. Сила и плотность тока. Закон Ома и закон Джоуля-Ленца в интегральной и дифференциальной формах. Мощность тока. Удельная тепловая мощность тока. Магнитное поле равномерно движущегося заряда. Сила Лоренца. Сила, действующая на заряд, движущийся в магнитном поле.

1.10. Закон Био-Савара-Лапласа. Теорема о циркуляции. Поле в центре и на оси кругового тока. Поле бесконечного прямого тока. Контур с током в однородном и неоднородном магнитном поле (вращательный момент, энергия, сила).

1.11. Явление электромагнитной индукции. Правило Ленца. ЭДС индукции. Индуктивность соленоида. Токи замыкания и размыкания. Энергия магнитного поля. Ток смещения. Полный ток. Уравнения Максвелла.

### **Основы волновой оптики**

1.12. Волновое уравнение. Уравнение плоской волны. Эффект Доплера для звуковых и электромагнитных волн.

1.13. Принцип Гюйгенса. Принцип Ферма. Законы отражения и преломления.

1.14. Явление интерференции. Сложение двух электромагнитных волн. Интенсивность суммарной волны. Временная когерентность, длина когерентности на примере опыта Юнга с монохроматическим протяженным источником.

1.15. Способы наблюдения интерференции света (зеркало Ллойда, бипризма и бизеркала Френеля). Интерференционные полосы равного наклона. Интерференционные полосы равной толщины. Простой клин.

1.16. Кольца Ньютона. Интерференция света на тонких пленках. Просветление оптики.

1.17. Графическое сложение амплитуд. Зоны Френеля. Дифракция Френеля на круглом отверстии и на диске. Дифракция Френеля на щели. Дифракция Фраунгофера на щели.

1.18. Дифракционная решетка. Положение и угловая ширина главных дифракционных максимумов дифракционной решетки. Дисперсия и разрешающая способность дифракционной решетки. Дифракция рентгеновских лучей. Формула Брэгга-Вульфа.

### **Основы квантовой физики, строения вещества, атомной и ядерной физики**

1.19. Экспериментальные законы теплового излучения (Стефана-Больцмана, Вина). Формула Планка. Вывод закона Стефана-Больцмана из формулы Планка.

1.20. Фотоэффект. Уравнение А.Эйнштейна для фотоэффекта. Опыт Боте. Фотоны. Эффект Комптона.

1.21. Постулаты Бора. Опыт Франка и Герца. Элементарная боровская теория водородоподобного атома.

1.22. Гипотеза де-Бройля. Экспериментальные основания квантовой механики.

1.23. Соотношение неопределенностей Гейзенберга. Оценка размеров и минимальной энергии одномерного гармонического осциллятора и водородоподобного атома.

1.23. Уравнение Шредингера. Физический смысл и свойства пси-функции. Частица в одномерной бесконечно глубокой потенциальной яме. Результаты

квантовой механики для одномерного гармонического осциллятора и для водородоподобного атома.

1.24. Собственный механический и магнитный моменты электрона. Магнетон Бора. Принцип Паули. Заполнение электронных оболочек атома. Электронные конфигурации.

1.25. Энергетические зоны в твердых телах. Металлы, диэлектрики и полупроводники. Собственные и примесные полупроводники. Электронная и дырочная проводимость.

## **Литература**

1. Базаров И. П. Б 17. Термодинамика: Учебник. 5 е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 384 с.
2. Молекулярная физика. Матвеев А.Н. М.: Высшая школа, 1981. – 400 с.
3. Савельев И.В. Курс общей физики, в 3-х томах. М.: Наука, 1982.
4. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. М.: Высшая школа, 1991.
5. Иродов И.Е. Волновые процессы. М., СПб: Физматлит, 2002.

## **3.2. Высшая математика**

2.1. Понятие производной функции. Основные правила дифференцирования функций. Нахождение экстремумов функции.

2.2. Понятие матрицы. Определитель матрицы и его вычисление.

2.3. Система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Методы решения СЛАУ: метод Гаусса, метод Крамера. Критерий существования нетривиального решения системы однородных линейных алгебраических уравнений.

2.4. Понятие первообразной функции. Вычисление неопределенных и определённых интегралов, в том числе несобственных.

2.5. Понятие числового ряда. Признаки сходимости числовых рядов. Разложение функции в ряд Тейлора.

2.6. Понятия градиента функции, дивергенции, ротора и циркуляции векторного поля. Теоремы Остроградского-Гаусса и Стокса.

2.7. Понятие обыкновенного дифференциального уравнения. Типы ОДУ первого порядка и методы их решения: уравнение с разделяющимися переменными, однородное ОДУ, уравнение в полных дифференциалах, линейное дифференциальное уравнение, уравнения, не разрешённые относительно производной.

2.8. Линейное дифференциальное уравнение произвольного порядка с постоянными коэффициентами. Методы его решения.

2.9. Система линейных дифференциальных уравнений первого порядка. Методы её решения.

2.10. Понятие аналитической функции. Разложение функции, аналитической в кольце, в ряд Лорана. Классификация изолированных особых точек. Вычеты. Основная теорема о вычетах и её приложения.

2.11. Основные уравнения математической физики. Классификация линейных дифференциальных уравнений с частными производными второго порядка с двумя независимыми переменными.

2.12. Решение краевых задач для уравнений гиперболического и параболического типов методом Фурье.

2.13. Решение задачи Коши для волнового уравнения в одномерном случае.

### **Литература**

1. Бронштейн И.Н. Справочник по математике: Для инженеров и учащихся втузов./И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев, 13-е изд., испр. -М.: Наука, 1986.-544 с.

2. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике (12-е изд.). М.: Наука, 1977.

3. Беклемишев Д.В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры: Учеб. для спец. вузов/Беклемишев Д.В.-6-е изд., стереотип. -М.:Наука,1987. 319с.

4. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики: Учеб. пособие для вузов /Тихонов А.Н., Самарский А.А. 5-е изд., стереотип. - М.: Наука, 1977. - 735 с.

### **3.3. Вопросы по научной специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия**

3.1. Многообразие мира звезд. Обычные звезды типа Солнца. Красные и бурые

карлики. Красные и голубые гиганты и сверхгиганты. Одиночные и двойные звезды. Пульсирующие звезды (цефеиды). Взрывающиеся звезды (новые и сверхновые). Нейтронные звезды (пульсары). Звездный ветер. Планетарные туманности. Звезды типа Вольфа-Райе. Межзвездные газ и пыль. Звездные поселения - галактики. Спектральная классификация звезд. Понятие о диаграмме Герцшпрунга-Рессела. Химический состав звезд. Плоская (I) и сферическая (II) звездные составляющие Галактики.

3.2. Уравнения гидростатического равновесия звезды. Гравитационный потенциал. Гравитационная энергия звезды. Параболическая скорость (скорость убегания). Элементы уравнения состояния звездной плазмы. Идеальный (совершенный) газ, молекулярный вес полностью ионизованного звездного вещества, давление, удельная энергия, энтропия. Статистика Ферми-Дирака. Вырожденный электронный газ. Асимптотика Чандрасекара. Ограничения на параметры звезд, накладываемые условием гидростатического равновесия.

3.3. Основы релятивистской гравитации. Предел Чандрасекара и масса Планка в равновесии звезд. Проверки Ньютоновской гравитации в лаборатории, в солнечной системе, в двойных пульсарах и на масштабах галактик. Мотивация к релятивистской гравитации – парадокс Лапласа. Принцип эквивалентности (сильный и слабый). Общая Теория Относительности. Мир как пространство-время. Искривленный мир. Метрика, метрический тензор. Геодезический лагранжиан.

3.4. Политропные газовые шары. Функции Лейна-Эмдена. Аналитические решения для индексов политропы  $n = 0, 1, 5$ . Асимптотические разложения вблизи центра и поверхности звезды. Уравнение пульсаций звезды с малой амплитудой. Собственные частоты и собственные функции. Динамическая, тепловая и пульсационная неустойчивости. Зависимость массы звезды от центральной плотности (диаграмма плотность-масса) и от радиуса (диаграмма радиус-масса). Предельная масса вырожденной звезды (предел Чандрасекара). Критическое для устойчивости звезды значение показателя адиабаты вещества.

3.5. Теория переноса излучения. Непрозрачность звездного вещества. Диффузионный предел. Закон усреднения коэффициента поглощения (Росселандово

среднее). Конвекция в звездах. Критерии конвективной неустойчивости. Адиабатическая конвекция (конвективные звездные ядра).

3.6. Полная система уравнений эволюции звезд. Начальные и граничные условия. Три характерных времени: гидродинамическое, тепловое и термоядерное. Теорема о вириале. Отрицательная теплоемкость звезды как целого. Гидростатически равновесные химически однородные модели звезд. Вращение звезд.

3.7. Химический состав звезд. Элементы теории термоядерных подбарьерных реакций. Протон-протонная цепочка реакций, CNO-цикл. Теория солнечных нейтрино и их детектирование на подземных нейтринных обсерваториях. 3-альфа реакция. Горение углерода, кислорода.

3.8. Практическая космология. Параметр Хаббла. Параметр или постоянная Хаббла, параметр плотности. Поведение решений в моделях Фридмана. Горизонт в современной вселенной. Рекомбинация в горячей вселенной, понятие о поверхности последнего рассеяния. Информация, содержащаяся в спектре реликтового излучения.

3.9. Гидростатически равновесная эволюция звезд. Переход к красным гигантам. Слойные источники энергии. Эволюция звезд умеренных масс. Изохроны на диаграмме Герцшпрунга-Рессела. Возраст шаровых звездных скоплений. Эволюция массивных звезд. Предельная масса звезды главной последовательности. Петли на диаграмме Герцшпрунга-Рессела. Потеря массы звездным ветром. Сброс оболочки звезды типа планетарной туманности. Эволюция в двойных системах: различные сценарии.

3.10. Образование железных звездных ядер и углеродно-кислородных вырожденных ядер. Нейтринные потери энергии. Фундаментальные свойства нейтрино. Урка-процесс. Нейтронизация звездного вещества. Ядерное статистическое равновесие. Фотодиссоциация железа. Строение предсверхновых звезд. Потеря устойчивости, коллапс.

3.11. Спектральная классификация сверхновых. Сверхновые Ia как термоядерные сверхновые. Сверхновые с коллапсом ядра: возможные механизмы взрыва.

3.12. Космография: расстояния во Вселенной. Фотометрическое расстояние,

вывод формулы его связи с космологическим красным смещением источника. Явные формулы для частных случаев космологических моделей. Тёмная Материя и Тёмная Энергия.

3.13. Равновесие сверхплотных звезд, энергетика аккреции. Релятивистские звезды. Метрика внутри сферически-симметричной звезды. Релятивистская энергия связи. Уравнения механического равновесия звезды. Физика гамма-всплесков. Активные ядра галактик, сверхмассивные черные дыры и квазары.

3.14. Распространенность химических элементов во Вселенной. Происхождение легких химических элементов. Синтез тяжелых элементов в процессах быстрого (r-процесс) и медленного (s-процесс) захвата нейтронов.

#### **Основная литература:**

1. Бисноватый - Коган Г.С., «Физические вопросы теории звездной эволюции», М.: Наука, 1989.
2. Шапиро С., Тьюколски С., «Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды. Физика компактных объектов.» М.: Мир, 1985
3. Я.Б. Зельдович, С.И. Блинников, Н.И. Шакура «Физические основы строения и эволюции звезд», МГУ, 1981.
4. Сурдин В.Г. (редактор-составитель) «Звезды» , М.: URSS, 2013. 428 с.  
Серия: Астрономия и астрофизика
5. Масевич А.Г., Тутуков А.В. Эволюция звезд: теория и наблюдения. М.: Наука, Гл.ред.физ.-мат.лит., 1988. - 280с.

#### **Дополнительная литература:**

1. Г.С. Бисноватый-Коган «Релятивистская астрофизика и физическая космология», КРАСАНД, 2010
2. Лукаш В.Н., Михеева Е.В. «Физическая космология», ФИЗМАТЛИТ, 2010.
3. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц «ТЕОРИЯ ПОЛЯ» (любое издание)
4. Зельманов А.Л., Агаков В.Г. «Элементы общей теории относительности», М., Наука, 1989.

5. Д.С. Горбунов, В.А. Рубаков «Введение в теорию ранней Вселенной. Т.1. Теория горячего Большого взрыва» 552 с., 2008 г.

6. А.Д. Долгов, Я.Б. Зельдович, М.В. Сажин «Космология ранней Вселенной», Издательство МГУ, 1988.

7. С. Вейнберг «Гравитация и космология» - М., Мир, 1975.

8. С. Вайнберг «Космология» - М., URSS, 2018.

9. Ч. Мизнер, К. Торн, Дж. Уилер «Гравитация», в 3-х томах. Издательство: Мир, 1977.

10. Я.Б. Зельдович, И.Д. Новиков, «Теория тяготения и эволюции звезд», М.: Наука, 1971