

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт астрономии Российской академии наук (ИНАСАН)

УТВЕРЖДЕНО
Ученым советом ИНАСАН
Протокол № 22/6 от 12.05.2022
Председатель Ученого совета
чл.-корр. РАН Д.В. Бисикало

Программа кандидатского экзамена по специальности

1.3.1. Физика космоса, астрономия

Подготовка кадров высшей квалификации
по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре

Москва
2022

Введение

Программа кандидатского экзамена по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия составлена на основании паспорта научной специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия и основных научных направлений ИНАСАН. В основу данной программы положены дисциплины: астрометрия, небесная механика, основы гравиметрии, общий курс астрофизики, курс практической астрофизики, теоретическая астрофизика.

Программа состоит из общей и специальной частей. Общая часть предназначена для всех аспирантов. На экзамене аспирант получает 3 вопроса из общей части. Вопросы из специальной части подбираются аспирантам индивидуально, согласно тематике диссертационного исследования, по 2 вопроса каждому аспиранту.

Программа разработана комиссией по модификации образовательной программы ИНАСАН.

Программа кандидатского экзамена по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия

ОБЩАЯ ЧАСТЬ

1. Общая астрометрия

- 1.1. Основные системы небесных координат.
- 1.2. Явления прецессии, нутации, абберрации и рефракции.
- 1.3. Системы астрономических постоянных.
- 1.4. Измерение времени и шкалы времени.
- 1.5. Неравномерность вращения Земли вокруг оси. Движение полюсов. Международная служба вращения Земли (IERS).
- 1.6. Фундаментальные звездные каталоги. Принципы построения фундаментальной системы звездных положений и собственных движений. Относительные и сводные каталоги.
- 1.7. Абсолютные и относительные методы определения координат небесных тел.
- 1.8. Принципы измерения собственных движений и параллаксов звезд. Проекты Hipparcos и Gaia.
- 1.9. Исторические каталоги. Карта неба, каталоги Астрономического общества (AGK), каталог PPM.

2. Небесная механика

- 2.1. Невозмущенное движение. Уравнения движения в задаче двух тел и их решение. Кеплеровы элементы орбит.
- 2.2. Возмущенное движение. Уравнения движения N тел.
- 2.3. Ограниченная задача трех тел. Интеграл Якоби. Частные решения.
- 2.4. Ограниченная задача трех тел. Устойчивость по Хиллу. Точки либрации. Полость Роша.
- 2.5. Основы теории гравитационного потенциала. Представление потенциала в виде разложения по сферическим функциям.
- 2.6. Постановка задачи и методы определения орбит небесных тел из наблюдений.

3. Приборы и методы астрофизики

- 3.1. Оптические телескопы и их основные параметры. Солнечные телескопы. Основные наземные оптические телескопы.
- 3.2. Радиотелескопы и их основные параметры. Различные типы антенн. Диаграмма направленности. Основные радиотелескопы.
- 3.3. Приемники излучения в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах и их основные параметры.
- 3.4. Методы регистрации излучения в рентгеновском и гамма-диапазонах. Основные рентгеновские и гамма-обсерватории.
- 3.5. Методы регистрации космических лучей, нейтрино, гравитационных волн.
- 3.6. Принципы спектрального анализа. Основные типы спектральных приборов. Спектральное разрешение.
- 3.7. Шкала звездных величин и показателей цвета. Современные фотометрические системы.
- 3.8. Методы регистрации поляризации излучения.
- 3.9. Принципы интерферометрии. Оптические и радиоинтерферометры.
- 3.10. Влияние атмосферы Земли на астрономические наблюдения. Основные космические обсерватории для наблюдений в разных диапазонах.
- 3.11. Методы определения расстояний до астрономических объектов. Шкала расстояний во Вселенной.
- 3.12. Методы обнаружения экзопланет.

4. Основы теоретической астрофизики

- 4.1. Элементарные процессы излучения и поглощения фотонов. Механизмы генерации теплового и нетеплового (синхротронного, комптоновского и др.) излучения в различных диапазонах спектра.
- 4.2. Основные характеристики поля излучения. Уравнение переноса излучения.
- 4.3. Атмосферы звезд. Источники поглощения в непрерывном спектре и форма непрерывных спектров для звезд различных спектральных классов. Механизмы образования линий поглощения. Локальное термодинамическое равновесие.
- 4.4. Межзвездная среда. Поглощение и излучение межзвездного газа и пыли в различных диапазонах спектра.
- 4.5. Внутреннее строение звезд. Источники энергии звезд. Механизмы переноса энергии.
- 4.6. Гравитационно-волновое излучение, его источники.

5. Планетные системы

- 5.1. Основные характеристики планет Солнечной системы (масса, плотность, характер вращения, свойства атмосферы, магнитные поля, условия на поверхности). Наземные и космические методы исследования тел Солнечной системы.
- 5.2. Малые тела Солнечной системы. Спутники и кольца планет. Астероиды и пояса астероидов. Кометы. Метеорное вещество. Миры с океанами. Понятие об астероидно-кометной опасности.
- 5.3. Основы теории образования планетных систем.
- 5.4. Статистика и демография экзопланет. Методы определения масс, размеров, орбит и физических характеристик экзопланет.
- 5.5. Атмосферы экзопланет, зоны потенциальной обитаемости и атмосферные биомаркеры.

6. Звезды

- 6.1. Основные характеристики Солнца как звезды. Фотосфера. Хромосфера. Корона. Солнечный ветер.
- 6.2. Фундаментальные параметры звезд и соотношения между ними.
- 6.3. Методы определения масс, светимостей и радиусов звезд. Распределение звезд по массам. Соотношение масса – светимость.
- 6.4. Спектральная классификация звезд и ее физическая интерпретация.
- 6.5. Диаграмма Герцшпрунга-Рассела. Главная последовательность, красные гиганты, белые карлики, коричневые карлики.
- 6.6. Двойные звезды: классификация, методы наблюдений, роль в определении масс и радиусов звезд. Кратные звезды.
- 6.7. Физически переменные звезды. Катаклизмические переменные.
- 6.8. Сверхновые. Гамма-всплески.
- 6.9. Основы теории звездообразования. Гравитационная неустойчивость.
- 6.10. Ядерная эволюция звезд разных масс. Конечные стадии эволюции звезд.
- 6.11. Особенности эволюции тесных двойных систем.
- 6.12. Происхождение химических элементов. Химическая эволюция Вселенной.

7. Галактика

- 7.1. Строение Галактики. Звездные населения и подсистемы. Звездные скопления и ассоциации. Спиральная структура Галактики. Ядро Галактики.
- 7.2. Компоненты и фазы межзвездной среды. Механизмы нагрева и охлаждения межзвездного газа. Молекулярные облака, области H I и H II, корональный газ.
- 7.3. Звездная кинематика. Движение Солнца относительно звезд. Вращение Галактики.

8. Внегалактическая астрономия и элементы космологии

- 8.1. Классификация галактик. Особенности структуры галактик разных морфологических типов. Размеры, светимость, скорость вращения и масса галактик.
- 8.2. Галактики с активными ядрами. Квазары, джеты.
- 8.3. Закон Хаббла. Крупномасштабное распределение галактик.
- 8.4. Ранние стадии расширения Вселенной. Первичный нуклеосинтез. Реликтовое излучение.
- 8.5. Основные космологические модели, темная материя и темная энергия. Возраст Вселенной.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

1. Системы координат

- 1.1. Системы астрономических постоянных. Методы определения основных астрономических постоянных. Соотношения между постоянными.
- 1.2. Геометрический, кинематический и динамический методы построения системы отсчета.
- 1.3. Основные системы небесных координат.
- 1.4. Явления прецессии, нутации, абберации и рефракции.
- 1.5. Измерение времени, шкала атомного времени IAT. Классические шкалы времени UT₀, UT₁, UT₂, UTC.
- 1.6. Релятивистские шкалы времени TDT и TDB, TT, TCG, TCB.
- 1.7. Звездные каталоги и их систематические ошибки. Вывод фундаментальной системы звездных положений и собственных движений. Ориентировка системы координат. Относительные и сводные каталоги. Важнейшие фундаментальные каталоги.
- 1.8. Абсолютные и относительные методы определения координат небесных тел.
- 1.9. Исторические каталоги. Карта неба, каталоги Астрономического общества (AGK), каталог PPM.
- 1.10. Небесная опорная система координат (ICRS) и земная опорная система координат (ITRF).
- 1.11. Методы определения координат, собственных движений и параллаксов небесных объектов с помощью космических аппаратов. Проекты Hipparcos и Gaia.
- 1.12. Радиоастрономические методы определения координат объектов.
- 1.13. Радио- и лазерная локация небесных тел.
- 1.14. Методы согласования оптических и радиосистем координат.

2. Вращение Земли и ее ориентация в пространстве

- 2.1. Уравнения Эйлера, Пуассона, Лиувилля.
- 2.2. Инструменты для изучения вращения Земли: РСДБ, лазерный дальномер, глобальные навигационные спутниковые системы.
- 2.3. Интерпретация движения полюсов и неравномерности вращения Земли. Короткопериодические, сезонные, вековые вариации вращения Земли. Чандлеровское движение полюса.
- 2.4. Международная служба вращения Земли и ее организация. Стандарты МСВЗ (IERS).

3. Небесная механика

- 3.1. Задача двух тел. Уравнения движения и их решение. Кеплеровы элементы орбит.
- 3.2. Задача N тел. Уравнения движения N тел и их первые интегралы. Уравнения движения в координатах Якоби.
- 3.3. Возмущенное движение. Малые параметры в теории движения планет и спутников. Уравнения движения Эйлера и Лагранжа в оскулирующих элементах.
- 3.4. Разложение пертурбационной функции. Классификация возмущений. Вековые возмущения. Резонансные возмущения.
- 3.5. Основы теории гравитационного потенциала. Представление потенциала в виде разложения по сферическим функциям. Сходимость разложения. Гравитационный потенциал Земли, Луны, планет.

3.6. Формальное интегрирование уравнений движения в элементах промежуточной орбиты методом малого параметра. Сходимость в методе малого параметра.

3.7. Формальное интегрирование методом осреднения. Асимптотический характер метода осреднения.

3.8. Канонические уравнения Гамильтона. Канонические элементы Делоне и Пуанкаре. Канонические преобразования. Метод Гамильтона–Якоби. Метод преобразований Ли в теории возмущенного движения.

3.9. Уравнения поступательно-вращательного движения небесных тел. Стационарные решения этих уравнений.

3.10. Интегрирование уравнений обобщенной задачи двух неподвижных центров. Характер движения. Формулы промежуточной орбиты. Возмущения на основе промежуточной орбиты обобщенной задачи двух неподвижных центров.

3.11. Задача Хилла и ее использование в теории движения.

3.12. Ограниченная задача трех тел. Интеграл Якоби. Критерий Тиссерана. Топология поверхностей Хилла. Семейства периодических решений вблизи точек либрации.

3.13. Переменные «действие – угол». Интегрируемые системы. Теорема Лиувилля. Теоремы Брунса и Пуанкаре об интегрируемости задачи нескольких тел.

3.14. Условно-периодические функции. Среднее значение. Инвариантные торы. Основные идеи метода Колмогорова–Арнольда–Мозера.

3.15. Периодические орбиты. Методы Ляпунова и Пуанкаре. Функция последования.

3.16. Основы первого и второго методов Ляпунова определения устойчивости движения. Орбитальная устойчивость. Устойчивость по Лагранжу. Устойчивость по Пуассону.

3.17. Постановка задачи определения орбит. Методы определения орбит небесных тел.

3.18. Методы математической обработки измерений параметров движения небесных тел.

4. Движение спутников планет и искусственных спутников Земли

4.1. Возмущенное движение спутников. Промежуточная орбита. Возмущающие факторы в движении естественных и искусственных спутников планет.

4.2. Разложение возмущающей функции, обусловленной нецентральной гравитационного поля планеты. Возмущения от зональных гармоник. Возмущения от тессеральных и секториальных гармоник. Возмущающая функция от притяжения внешнего тела. Лунно-солнечные возмущения ИСЗ.

4.3. Возмущения, вызываемые сопротивлением атмосферы планеты. Возмущения от светового давления и приливов в теле упругой планеты.

4.4. Загрязнение околоземного космического пространства, динамика, модели распределения. Эволюция орбит объектов космического мусора под влиянием различных возмущений. Используемые методы борьбы с загрязнением космического пространства.

5. Планетные системы

5.1. Основные характеристики планет Солнечной системы (масса, плотность, характер вращения, свойства атмосферы, магнитные поля, условия на поверхности).

5.2. Малые тела Солнечной системы. Спутники и кольца планет. Астероиды и пояса астероидов. Кометы. Метеорное вещество. Объекты внешней части Солнечной системы (кентавры, транснептуновые объекты, облако Оорта). Миры с океанами. Понятие об астероидно-кометной опасности.

5.3 Наземные и космические методы исследования тел Солнечной системы. Определение основных параметров тел Солнечной системы.

- 5.4. Происхождение Солнечной системы.
- 5.5. Теории формирования планетных систем в околозвездных дисках.
- 5.6. Статистика и демография экзопланет. Наблюдения атмосфер экзопланет. Зоны потенциальной обитаемости и атмосферные биомаркеры. Определение масс, размеров, орбит и физических характеристик экзопланет.

6. Инструментальная база астрофизики

- 6.1. Многоволновая астрономия. Приемники излучения от радио- до рентгеновского излучения. Наземные и космические обсерватории для наблюдений в различных диапазонах спектра.
- 6.2. Оптические схемы телескопов. Экваториальные и азимутальные установки. Активная и адаптивная оптика. Солнечные телескопы: целостат, коронограф.
- 6.3. Основные конструкции спектрографов. Спектральное разрешение и определяющие его факторы.
- 6.4. Современные оптические интерферометры. Спекл-интерферометрия. Современные радиоинтерферометры. Метод апертурного синтеза. Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами.
- 6.5. Методы детектирования гамма излучения сверхвысоких энергий: космические аппараты, наземные оптические Черенковские телескопы, наземные детекторы широких атмосферных ливней. Методы детектирования нейтрино сверхвысоких энергий.

7. Основы теоретической астрофизики

- 7.1. Механизмы генерации и источники теплового и нетеплового излучения в различных диапазонах спектра. Синхротронное излучение. Циклотронное излучение. Комптон-эффект.
- 7.2. Атмосферы звёзд. Основные предположения и уравнения теории звездных атмосфер. Коэффициенты поглощения и излучения, функция источников. Модели звездных атмосфер. Эддингтоновский предел светимости.
- 7.3. Механизмы уширения спектральных линий и профили коэффициента поглощения. Понятие синтетического спектра. Эквивалентная ширина линии. Кривая роста.
- 7.4. Внутреннее строение звезд. Основные уравнения. Строение звезд различных спектральных классов.
- 7.5. Эволюционные треки звезд различной массы.
- 7.6. Введение в гидродинамику. Условия на разрыве. Ударная адиабата, задача о произвольном разрыве. Решение Седова. Решение Блэндфорда-Макки.
- 7.7. Релятивистская кинематика. Преобразования Лоренца. Преобразования скоростей. Релятивистская абберация. Преобразование величин, относящихся к излучению. Релятивистские инварианты.
- 7.8. Механизм Блэндфорда-Знаека и Блэндфорда-Пэйна. Ускорение и коллимация струйных выбросов. (Приближенный вывод мощности механизма БЗ)
- 7.9. Тормозное излучение. Релятивистское обобщение формулы Лармора. Синхротронное излучение одного электрона. Полные потери энергии. Изгибное излучение. Томсоновское рассеяние. Формула Комптона. Обратное комптоновское рассеяние в томсоновском приближении. Потери энергии одного электрона при комптоновском рассеянии.
- 7.10. Сечения электромагнитных процессов в КЭД. Рождение и аннигиляция пар. Параметр компактности астрофизических источников и его физический смысл. Горизонт видимости высокоэнергичных фотонов во Вселенной.

7.11. Адронные процессы рождения фотонов и нейтрино (протонный синхротрон, протон-протонное, фотомезонное взаимодействие). Черенковское излучение релятивистских частиц. Потери энергии заряженных частиц при распространении в межгалактической среде. Эффект Грейзена-Зацепина-Кузьмина.

8. Звезды

8.1. Фотометрические и спектроскопические методы определения эффективной температуры и поверхностного ускорения силы тяжести звезд. Химический состав звездных атмосфер.

8.2. Методы определения масс и размеров звезд из наблюдений. Астросейсмология, интерферометрия, эволюционные треки.

8.3. Методы определения скорости вращения и магнитного поля звезд.

8.4. Фигуры равновесия небесных тел.

8.5. Двойные и кратные звезды. Методы определения параметров орбит двойных звезд. Оценка масс и других характеристик компонентов двойных систем.

8.6. Пульсирующие переменные (цефеиды, долгопериодические переменные, переменные типа RR Лиры).

8.7. Начальные стадии звездной эволюции. Звезды типа Т Тельца и Ae/Be Хербига.

8.8. Конечные стадии звездной эволюции. Уравнение состояния вырожденного газа. Белые карлики, нейтронные звезды. Предельная масса белых карликов и нейтронных звезд. Черные дыры.

8.9. Сверхновые звезды, типы сверхновых, наблюдаемые особенности. Современные представления о процессах, приводящих к взрыву. Остатки сверхновых и их эволюция.

8.10. Тесные двойные системы и особенности их эволюции. Аккреция на компактные объекты. Катаклизмические переменные. Рентгеновские источники в двойных системах. Барстеры.

8.11. Современные представления о потерях энергии вращения нейтронных звезд в пульсарах. Перионы. Быстро движущиеся одиночные пульсары и структуры с ними связанные.

8.12. Гамма-яркие двойные звезды. Наблюдения и возможные модели.

8.13. Космические гамма-всплески. Основные феноменологические данные. Методы наблюдений. Проблема компактности. Основные физические модели. Модели излучения гамма-всплесков.

8.14. Послесвечения космических гамма-всплесков. Релятивистские радиационно-доминированные ударные волны. Модели излучения. Связь с гравитационно-волновыми событиями.

9. Галактика

9.1. Звездные населения Галактики. Состав, пространственное распределение, кинематические свойства, химический состав.

9.2. Звездные скопления и ассоциации. Определение характеристик по диаграммам Герцшпрунга-Рассела.

9.3. Звездная динамика. Фазовая плотность и уравнение Больцмана для звездных систем. Интегралы движения. Теорема вириала и ее применение. Регулярные и иррегулярные силы. Время релаксации. Интеграл столкновений.

9.4. Гравитационная устойчивость тонкого вращающегося диска. Дисперсионное уравнение. Спиральные ветви, представление о волнах плотности.

- 9.5. Межзвездное поглощение и его учет.
- 9.6. Молекулярные облака, определение физических условий.
- 9.7. Области H II, определение физических условий.
- 9.8. Спутники Галактики.
- 9.9. Космические лучи. Ферми ускорение. Пересоединения. Критерий Хиласа. Гамма излучение галактического диска и галактического центра.
- 9.10. Остатки сверхновых. Ускорение космических лучей и напряженность магнитного поля. Лептонные и адронные модели излучения. Пузыри Ферми и eROSITA. Оценка их физических параметров.

10. Внегалактическая астрономия и элементы космологии

- 10.1. Методы определения размеров, светимости и массы галактик.
- 10.2. Кривые вращения галактик и проблема существования темного гало.
- 10.3. Группы и скопления галактик. Межгалактический газ. Эффект Зельдовича-Сюняева.
- 10.4. Космологические модели, понятие критической плотности и космологической постоянной. Возраст Вселенной. Lambda-CDM модель.
- 10.5. Реликтовое излучение, его происхождение и флуктуации яркости.
- 10.6. Проблема образования галактик. Галактики на больших красных смещениях.
- 10.7. Активные ядра галактик и квазаров. Физические механизмы активности. Природа стационарных источников гамма излучения. Быстрая переменность в активных ядрах галактик.

Литература

1. Засов А.В., Постнов К.А. Общая астрофизика, Фрязино: Век-2, 2006.
2. Соболев В.В. Курс теоретической астрофизики. М.: Наука, 1985.
3. Мартынов Д.Я. Курс практической астрофизики, М.: Наука, 1977.
4. Маров М.Я. Космос: от Солнечной системы вглубь Вселенной, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016.
5. Звезды. Ред.-сост. Сурдин В.Г. М.: Физматлит, 2008.
6. Галактики. Ред.-сост. Сурдин В.Г. М.: Физматлит, 2013.
7. Марочник Л.И., Сучков А.А., Галактика. М.: Наука, 1986.
8. Бочкарев Н.Г. Основы физики межзвездной среды. Изд. 2-е. М.: УРСС, 2010.
9. Грей Д. Наблюдения и анализ звездных фотосфер. М.: Мир, 1980.
10. Михалас Д. Звездные атмосферы. М.: Мир, 1982.
11. Бисикало Д. В., Жилкин А. Г., Боярчук А. А. Газодинамика тесных двойных звезд. Физматлит, 2013.
12. Долгов А.Д., Зельдович Я.Б., Сажин М.В. Космология ранней Вселенной. М.: Изд-во МГУ, 1988.
13. Масевич А.Г., Тутуков А.В. Эволюция звезд: Теория и Наблюдения. М: Изд-во Ленанд, 2019, 280с.
14. Физика космоса: маленькая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1986.
15. Жаров В.Е. Сферическая астрономия. Фрязино, 2006.
16. Подобед В.В., Нестеров В.В. Общая астрометрия. М.: Наука, 1982.
17. Абалакин В.К. Основы эфемеридной астрономии. М.: Наука, 1979.
18. Ковалевский Ж. Современная астрометрия. Фрязино: «Век 2», 2004.
19. Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. М.: Физматгиз, 1962.
20. Дубошин Г.Н. Небесная механика. Аналитические и качественные методы. М.: Наука, 1964.
21. Аксенов Е.П. Теория движения искусственных спутников Земли. М.: Наука, 1977.
22. Мюррей К., Дермотт С. Динамика Солнечной системы, Физматлит, 2010.
23. Грушинский Н.П. Теория фигуры Земли. Изд-во «Наука», 1976.
24. Субботин М.Ф. Введение в теоретическую астрономию. М.: Наука, 1968.
25. Гребеников Е.А., Рябов Ю.А. Новые качественные методы в небесной механике. М.: Наука, 1971.
26. Морбиделли А. «Современная небесная механика. Аспекты динамики Солнечной системы». Издательство: "Регулярная и хаотическая динамика, Институт компьютерных исследований" (2014). ISBN: 978-5-4344-0209-5.
27. George B. Rybicki, Alan P. Lightman. Radiative Processes in Astrophysics. 1991. WILEY-VCH Verlag GmbH 62 Co. KGaA, Weinheim, 2004, 400p.
28. Malcolm S. Longair. High Energy Astrophysics. Cambridge University Press, 2011, 888p.

Составители:

д.ф.-м.н. М.В. Барков
к.ф.-м.н. С.В. Верещагин
д.ф.-м.н. Д.З. Вибе
д.ф.-м.н. В.В. Емельяненко
к.ф.-м.н. А.П. Карташова
к.ф.-м.н. А.А. Ключков
к.ф.-м.н. Д.А. Ковалева
к.ф.-м.н. П.А. Левкина
д.ф.-м.н. Л.И. Машонкина
к.ф.-м.н. Ю.В. Пахомов
к.ф.-м.н. Н.В. Чупина
д.ф.-м.н. В.И. Шематович