

Программа учебной дисциплины «Астрофизика и космология»

Утверждена
Академическим руководителем ОП
Протокол №2 от 20.08.2019

Автор	Старобинский А.А., Постнов К.А.
Дата составления	20.08.2019
Число кредитов	3
Контактная работа (час.)	80
Самостоятельная работа (час.)	34
Курс	1
Формат изучения дисциплины	без использования онлайн курса

I. ЦЕЛЬ, РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ И ПРЕРЕКВИЗИТЫ

Целями освоения дисциплины «Астрофизика и космология» являются:

- формирование у студентов профессиональных компетенций, связанных с использованием современных представлений в области астрофизики и космологии,
- приобретение студентами навыков самостоятельной исследовательской работы,
- формирование подходов, основанных на полученных знаниях, позволяющих проводить научные исследования и анализировать полученные результаты,
- развитие умений, позволяющих развивать качественные и количественные физические модели физических процессов в космических объектах и во Вселенной.

Изучение данной дисциплины базируется на следующих дисциплинах:

- Статистическая физика
- Аналитическая механика
- Квантовая механика
- Дифференциальные уравнения

Основные положения дисциплины могут быть использованы в дальнейшем при изучении дисциплин:

- Современная теоретическая космология
- Астрофизика высоких энергий
- Наблюдательная космология
- Плазменная астрофизика

II. СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Тема 1. Основы теории тяготения. Черные дыры и гравитационные волны

Основы теории гравитации. Законы Кеплера. Гравитация Ньютона. Уравнение Пуассона для гравитационного потенциала. Гравитационная энергия. Переход к релятивистскому обобщению теории Ньютона. Пространство-время. Метрика Минковского. Принцип эквивалентности. Основные положения ОТО А. Эйнштейна.

Уравнение геодезических. Коэффициенты связности (символы Кристоффеля). Ковариантная производная.

Тензор Римана. Уравнения Эйнштейна в вакууме. Тензор энергии-импульса – источник гравитационного поля. Точные решения уравнений Эйнштейна. Векторы Киллинга. Метрика Шварцшильда. Черная дыра и ее горизонт событий. Эффекты вращения. Эффект Лензе-Тирринга. Метрика Керра.

Линеаризованная теория гравитации. Линеаризованный тензор Римана и его калибровочная инвариантность. Лоренцева калибровка. Гравитационные волны. ТТ-калибровка. Уравнения для ГВ в вакууме. Источник ГВ. Решение неоднородного волнового уравнения. Квадрупольное приближение для источников ГВ. Поток энергии в ГВ. ГВ от астрофизических источников.

Методы регистрации ГВ. ГВ-интерферометры типа LIGO и принципы их работы. Современные наблюдения ГВ от астрофизических источников.

Тема 2. Перенос излучения в космических средах. Межзвездная среда и образование звезд.

Взаимодействия излучения и вещества. Коэффициенты излучения и поглощения для элементарных процессов. Длина свободного пробега и оптическая толща. Основы теории переноса излучения. Функция источника. Понятие локального термодинамического равновесия и условия его выполнения. Функция Планка и ее асимптотики. Формула Саха-Большмана.

Уравнение переноса и его решение в простейших случаях. Образование непрерывного спектра и спектральных линий. Звездные атмосферы. Эффективная температура. Спектральная классификация звезд. Нетепловое излучение. Яркостная температура.

Межзвездная среда. Физические особенности. Отсутствие ЛТР в МЗС. Вмороженность магнитного поля в МЗС. Функция охлаждения разреженной плазмы. Столкновительное и фотоионизационное равновесие. Тепловая неустойчивость МЗС. Диагностика космической плазмы по мере дисперсии и мере вращения. Горячая МЗС. Зоны ионизованного водорода. Атомарный водород и линия 21 см.

Холодная МЗС. Молекулярные облака. Космические мазеры. Межзвездная пыль. Межзвездные магнитные поля. Релятивистская компонента МЗС -- космические лучи. Распространение КЛ в Галактике. Происхождение КЛ. Проблема КЛ сверхвысоких энергий. Гравитационная (Джинсовская) неустойчивость. Образование звезд. Контракционная и адиабатическая стадии. Молодые звезды до главной последовательности.

Тема 3. Строение и эволюция звезд. Конечные стадии эволюции звезд. Белые карлики. Вспышки сверхновых. Нейтронные звезды.

Звезды. Диаграмма Герцшпрунга-Рессела. Теорема вириала для самогравитирующих тел. Тепловое время. Отрицательная теплоемкость стационарных невырожденных звезд. Уравнение внутреннего строения стационарных звезд. Лучистый и конвективный перенос тепла.

Источники звездной энергии. Термоядерные реакции. Звезды на главной последовательности. Горение водорода (цикл Бете и CNO-цикл). Проблема солнечных нейтрино и ее решение. Солнце как звезда. Фотосфера, хромосфера, корона. Солнечная активность. Солнечный ветер. Эволюция звезд после главной последовательности. Горение гелия (3-альфа процесс) и образование C-O ядер звезд. Звезды Вольф-Райе. Пульсирующие звезды. Цефеиды.

Вырождение электронного газа в ядре звезды. Стадия красного гиганта. Образование вырожденного C-O ядра. Планетарные туманности образование белых карликов. Свойства белых карликов. Предел Чандрасекара для БК. Эволюция массивных звезд. Термоядерная

эволюция ядер звезд до образования железного ядра. Неустойчивость железных ядер звезд. Гравитационный коллапс и его причины (нейтронизация, фотодезинтеграция ядер железа, эффекты ОТО).

Образование нейтронных звезд. Вспышки сверхновых 2 типа. Феноменология нейтронных звезд. Радиопульсары. Физика пульсаров. Механизмы радиоизлучения пульсаров. Пульсары в двойных системах. Экспериментальная проверка ОТО по наблюдениям двойных пульсаров. Образование черных дыр звездных масс в конце эволюции звезд. Физические процессы в окрестности ЧД. Орбиты пробных частиц и фотонов в метриках Шварцшильда и Керра. Эргосфера вращающейся ЧД. Извлечение энергии вращения ЧД. Механизм Блэндфорда-Знаека.

Особенности эволюции звезд в тесных двойных системах. Полость Роша. Обмен массами в ТДС. Аккреция вещества на компактные объекты (БК, НЗ и ЧД). Аккреционные диски. Аккреция на БК. Термоядерные взрывы на БК (новые звезды). Рентгеновские источники в ТДС. Рентгеновские барстеры. Аккреция на замагниченные НЗ. Рентгеновские пульсары. Термоядерные СН типа 1a. Универсальность кривых блеска. Роль в космологии. Двойные НЗ и ЧД -- источники гравитационных волн.

Тема 4. Галактики и крупномасштабная структура вселенной. Космологические модели. Горячая вселенная и реликтовое излучение.

Звездные скопления и ассоциации. Шаровые звездные скопления. Диаграмма ГР для скоплений и определение возраста скоплений. Галактика. Диск, сферическая составляющая (балдж), темное гало. Спиральная структура дисковых галактик. Кривые вращения. Проблема темного гало в спиральных галактиках. Методы определения расстояний до галактик.

Динамические процессы в галактиках. Время столкновений звезд. Время релаксации звездных систем. Динамическое трение. Динамическая устойчивость дисков галактик. Особенности строения эллиптических и неправильных галактик. Особенности звездообразования в галактиках. Происхождение и эволюция галактик. Межгалактическая среда. Лайман-альфа лес. Эффект Гана-Петерсона. Скопления галактик. Горячий газ в скоплениях. Эффект Сюняева-Зельдовича для скоплений галактик. Крупномасштабная структура Вселенной.

Основы классической космологии. Закон Хаббла. Расширение Вселенной. Масштабный фактор. Однородная и изотропная Вселенная. Метрика Фридмана-Леметра-Робертсона-Уокера. Распространение света. Конформное время. Физический смысл красного смещения. Метрическое, фотометрическое и угловое расстояния. Горизонт частиц и горизонт событий. Изменение физических величин с красным смещением.

Уравнения Фридмана. Связь с пространственной топологией. Критическая плотность. Космологическая постоянная. Стандартная космологическая модель и ее основные параметры. Методы ее проверки и измерения ее параметров. Современное ускоренное расширение Вселенной. Определение физических свойств темной энергии из наблюдений.

Горячая Вселенная. "Большой взрыв". Фридмановские стадии расширения. Стадия доминирования излучения и вещества. Бариогенезис. Первичный нуклеосинтез. Эпоха рекомбинации. Реликтовое излучение. Анизотропия температуры реликтового излучения и ее интерпретация. Угловой спектр флуктуаций РИ. Поляризация РИ.

Проблема начальных условий для фридмановской космологии и теории горячей Вселенной. Инфляционный сценарий очень ранней Вселенной. Стадия де-Ситтера (инфляционная). Квантово-гравитационная генерация малых неоднородностей пространства-времени и распределения материи на этой стадии. Спектр Гаррисона-Зельдовича и малые отклонения от него. Определение наилучших инфляционных моделей по наблюдательным данным. Первичные гравитационные волны и методы их

обнаружения. Альтернативные модели ранней Вселенной до фридмановских стадий. Квантовая космология.

III. ОЦЕНИВАНИЕ

Знания студентов в ходе семестра (промежуточный контроль) оцениваются при помощи домашних заданий и текущей работы на семинарах. Итоговый контроль знаний осуществляется в формате экзамена.

Домашнее задание подразумевает выполнение в течение модуля заданий по разным темам курса. Задание может включать: анализ данных галактик или разбор актуальных научных статей. Каждое задание оценивается в 2 балла, оценка накопительно суммируется. Оценка за домашнее задание выставляется с учетом полноты выполнения задания и оформления результатов.

Текущая работа на семинаре оценивается по степени участия студента в обсуждениях по 10-бальной шкале.

Итоговый зачёт (экзамен) в устной форме проводится в конце 4 модуля. Экзаменационный билет содержит 2 вопроса и практическую задачу по теме курса. Время на подготовку 2 часа, время на ответ билета 20 минут. Зачёт оценивается по 10-бальной шкале.

Формирование оценки:

Итоговая оценка (ИО) по курсу складывается накопительным образом из оценок за работу в ходе семестра (ОС) и оценку за зачёт (ОЗ) и равна $ИО = 0.5 ОС + 0.5 ОЗ$.

Оценка за работу в семестре равна $ОС = 0.8 ДЗ + 0.2 Сем$, где ДЗ – накопительная оценка за выполнение домашних заданий, Сем – оценка за текущую работу на семинарах.

Студенты, у которых $ОС = 10$, освобождаются от зачёта и получают итоговую оценку 10.

Студенты с оценкой $ОС > 6$ могут по их выбору зачесть оценку за работу в семестре в качестве итоговой, не сдавая зачёта.

Оценки за работу в семестре и итоговая оценка округляются арифметически (при превышении целого числа менее чем на 0.5 балла — в меньшую сторону, при превышении на 0.5 балла и более — в большую). Примеры формирования оценки приведены в приложении 1.

IV. ПРИМЕРЫ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Вопросы для оценки качества освоения дисциплины

Примеры экзаменационных билетов устного экзамена:

Билет 1.

Вопрос 1. Уравнение Пуассона для гравитационного потенциала и его решение в сферически-симметричном случае. Гравитационная энергия.

Вопрос 2. Особенности эволюции звезд в тесных двойных системах. Полость Роша. Обмен массами в ТДС.

Задача: Какими будут размер и плотность белого карлика, образовавшегося в результате слияния двух белых карликов с массами 1 и 0.5 масс Солнца, если более массивный имел размер 10 тыс км?

Билет 2.

Вопрос 1. Основные положения ОТО А. Эйнштейна. Уравнения Эйнштейна.

Вопрос 2. Источники звездной энергии. Термоядерные реакции. Горение водорода (цикл Бете и CNO-цикл).

Задача. Оцените плотность числа фотонов и плотность энергии реликтового излучения в эпоху рекомбинации.

Билет 3.

Вопрос 1. Метрика Шварцшильда. Черная дыра и ее горизонт событий.

Вопрос 2. Гравитационная (Джинсовская) неустойчивость. Образование звезд.

Задача. Оцените время выхода нейтрино из протонейтронной звезды с массой 1.5 массы Солнца и радиусом 20 км и температурой, равной вириальной.

Билет 4.

Вопрос 1. Линеаризованная теория гравитации. Гравитационные волны.

Вопрос 2. Межзвездная среда. Вмороженность магнитного поля в МЗС. Функция охлаждения разреженной плазмы.

Задача. Температура непрозрачного аккреционного диска вокруг черной дыры с массой $5 M_{\odot}$ составляет 10 кэВ, характерный радиус порядка $10 R_g$. Найти полную тепловую светимость диска.

Билет 5.

Вопрос 1. Эффекты вращения. Эффект Лензе-Тирринга. Метрика Керра.

Вопрос 2. Релятивистская компонента МЗС -- космические лучи. Распространение КЛ в Галактике. Проблема КЛ сверхвысоких энергий.

Задача. Полная мощность синхротронного излучения Крабовидной туманности 10^{38} эрг/с, возраст принять равным 1000 лет. Считая, что она обеспечивается за счет торможения вращения пульсара (период 33 мс), оцените магнитное поле нейтронной звезды.

Билет 6

Вопрос 1. Методы регистрации ГВ. ГВ-интерферометры типа LIGO и принципы их работы.

Вопрос 2. Термоядерные СН типа 1a и их роль в космологии.

Задача. Типичное скопление галактик имеет массу 10^{14} масс Солнца и радиус 3 Мпк. Найдите красное смещение, начиная с которого Хаббловская скорость расширения сравнится с характерной величиной дисперсии скоростей галактик в таком скоплении. $H_0=70$ км/с/Мпк.

Билет 7.

Вопрос 1. Уравнения Фридмана. Связь с пространственной топологией. Критическая плотность.

Вопрос 2. Молекулярные облака. Космические мазеры. Межзвездная пыль.

Задача. Оцените джинсовскую массу для барионного вещества на момент рекомбинации. $H_0=70$ км/с/Мпк, плотность барионного вещества на $z=0$ равна 4% от критической.

Билет 8.

Вопрос 1. Однородная и изотропная Вселенная. Метрика Фридмана-Леметра-Робертсона-Уокера.

Вопрос 2. Уравнение переноса и его решение в простейших случаях. Образование непрерывного спектра и спектральных линий.

Задача. Плотность межгалактического газа 0.1 частиц в см^3 . Оцените время охлаждения такого газа в скоплении галактик с массой 10^{14} масс Солнца и радиусом 3 Мпк.

Билет 9.

Вопрос 1. Реликтовое излучение. Анизотропия температуры реликтового излучения и ее интерпретация.

Вопрос 2. Вырождение электронного газа в ядре звезды. Образование вырожденного C-O ядра. Красные гиганты.

Задача. Оцените примерную массу невидимого сферического гало Млечного пути, которая обеспечит наблюдаемую скорость вращения звезд вокруг галактического центра 220 км/с независимо от расстояния от центра. Радиус гало примите равным 100 кпк.

Билет 10.

Вопрос 1. Спектр Гэрисона-Зельдовича и малые отклонения от него по измерениям реликтового излучения.

Вопрос 2. Зоны ионизованного водорода. Атомарный водород и линия 21 см.

Задача. Оцените яркостную температуру радиоисточника с потоком 10 мЯнских на частоте 100 ГГц с угловым размером 1 секунда дуги.

8.2 Примеры домашнего задания

Подготовить обзор современных моделей Большого взрыва (материал предоставляется преподавателем).

Подготовить исследование проектов космических астрофизических лабораторий

V. РЕСУРСЫ

Рекомендованная основная литература

- Засов А.В., Постнов К.А. Общая Астрофизика. 3-е изд. Фрязино: Век-2, 2015, 574 с.
- Физика космоса (под ред. Р.А. Сюняева). М.: Советская энциклопедия, 1986
- Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теория поля, ч. 2.

Рекомендованная дополнительная литература

- Н.Г. Бочкарев. Основы физики межзвездной среды. 2-е изд, М.:Либроком, 2010
- Я.Б.Зельдович, С.И. Блинников, Н.И. Шакура. Физические основы строения и эволюции звезд. М.: МГУ, 1981
- А.М. Черпацук. Тесные двойные звезды. Т1. Т2. М.:Физматлит, 2013

Программное обеспечение

№ п/п	Наименование	Условия доступа
1.	Microsoft Windows 7 Professional RUS Microsoft Windows 10 Microsoft Windows 8.1 Professional RUS	Из внутренней сети университета (договор)
2.	Microsoft Office Professional Plus 2010	Из внутренней сети университета (договор)

Профессиональные базы данных, информационные справочные системы, интернет-ресурсы (электронные образовательные ресурсы)

№ п/п	Наименование	Условия доступа
Профессиональные базы данных, информационно-справочные системы		
1.	Консультант Плюс	Из внутренней сети университета (договор)
2.	Библиотека НИУ ВШЭ	URL: https://library.hse.ru/e-resources
Интернет-ресурсы (электронные образовательные ресурсы)		
1.	Открытое образование	URL: https://openedu.ru/
2.	Электронный ресурс «Астронет»	http://www.astronet.ru

Материально-техническое обеспечение дисциплины

Учебные аудитории для учебных занятий по дисциплине обеспечивают использование и демонстрацию тематических иллюстраций, соответствующих программе дисциплины в составе:

– ПЭВМ с доступом в Интернет (операционная система, офисные программы, антивирусные программы);

– мультимедийный проектор с дистанционным управлением.

Учебные аудитории для самостоятельных занятий оснащены ПЭВМ (операционная система, офисные программы, антивирусные программы), с возможностью подключения к сети Интернет и доступом к электронной информационно-образовательной среде НИУ ВШЭ.

VI. Особенности организации обучения для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

В случае необходимости, обучающимся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья (по заявлению обучающегося), а для инвалидов также в соответствии с индивидуальной программой реабилитации инвалида, могут предлагаться следующие варианты восприятия учебной информации с учетом их индивидуальных психофизических особенностей, в том числе с применением электронного обучения и дистанционных технологий:

6.1. для лиц с нарушениями зрения: в печатной форме увеличенным шрифтом; в форме электронного документа; в форме аудиофайла (перевод учебных материалов в аудиоформат); в печатной форме на языке Брайля; индивидуальные консультации с привлечением тифлосурдопереводчика; индивидуальные задания и консультации.

6.2. для лиц с нарушениями слуха: в печатной форме; в форме электронного документа; видеоматериалы с субтитрами; индивидуальные консультации с привлечением сурдопереводчика; индивидуальные задания и консультации.

6.3. для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата: в печатной форме; в форме электронного документа; в форме аудиофайла; индивидуальные задания и консультации.