

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**и.о. директора физтех-школы
физики и исследований им.
Ландау**

А.А. Воронов

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Введение в астрофизику
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра космической физики
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

- лекции: 60 час.
- семинары: 0 час.
- лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: С.Ю. Сазонов, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры космической физики 04.06.2020

Аннотация

Курс лекций посвящен рассмотрению широкого круга астрофизических объектов и явлений в Галактике и Метагалактике. В первой части курса изучаются основы теории переноса излучения, обсуждаются механизмы генерации, поглощения и рассеяния излучения. Во второй части курса рассматривается формирование, эволюция и внутренне строение звезд. В третьей части курса изучаются разнообразные астрофизические явления, связанные с релятивистскими компактными объектами звездной массы, а также со сверхмассивными черными дырами в ядрах галактик.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

- формирование у студентов профессиональных компетенций, связанных с использованием современных теоретических концепций в области астрофизики;
- развитие умений, основанных на полученных теоретических знаниях, позволяющих создавать и применять физические модели для исследования астрофизических явлений;
- получение студентами навыков самостоятельной исследовательской работы с использованием специфических методов астрофизики;
- получение практических навыков использования данных современных наземных и орбитальных обсерваторий для решения задач астрофизики.

Задачи дисциплины

- получение базовых знаний, необходимых студенту для проведения научных исследований в рамках своей магистерской работы.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов

ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
---	---

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- основные астрофизические явления и классы объектов;
- основы теории переноса излучения;
- механизмы генерации, поглощения и рассеяния излучения в Галактике и Метагалактике;
- внутреннее строение и основные свойства звезд, этапы формирования и эволюции звезд;
- физические свойства и астрофизические проявления релятивистских компактных объектов.

уметь:

- пользоваться знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач астрофизики;
- видеть в задачах физическое содержание;
- делать численные оценки по порядку величины;
- абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций в астрофизике;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах.

владеть:

- работы с современной научной литературой под данному вопросу;
- культурой постановки и моделирования астрофизических задач;
- практикой исследования и решения астрофизических задач;
- навыками теоретического анализа реальных астрофизических задач.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Основные астрономические понятия	3			2
2	Перенос излучения	3			2
3	Тормозное излучение	4			1
4	Синхротронное излучение	3			2
5	Комптоновское и обратное комптоновское излучение	3			2
6	Комптоновское взаимодействие изотропного поля излучения с бесконечной однородной средой	4			1
7	Формирование рентгеновских спектров в результате комптонизации	3			2
8	Формирование звезд	3			2
9	Внутреннее строение звезд	4			1
10	Эволюция звезд	3			3
11	Двойные звезды	4			4
12	Эволюция тесных двойных систем	4			4
13	Пульсары	4			4
14	Аккреция на компактные объекты	4			4

15	Аккреционный диск около черной дыры	4			4
16	Аккреция на нейтронные звезды	4			4
17	Сверхмассивные черные дыры	3			3
Итого часов		60			45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Основные астрономические понятия

Основные космические масштабы: расстояния, времена, массы, плотности, температуры. Солнечные единицы. Параллакс. Основные характеристики электромагнитного излучения: интенсивность, поверхностная яркость, поток, светимость. Излучение абсолютно черного тела. Звездная величина.

2. Перенос излучения

Уравнение переноса. Функция источника. Оптическая толщина. Закон Кирхгофа. Образование спектральных линий. Потемнение к краю.

3. Тормозное излучение

Основные формулы и их вывод, включая случай теплового тормозного излучения.

4. Синхротронное излучение

Основные формулы и их вывод, включая случай синхротронного излучения электронов со степенным распределением энергий.

5. Комптоновское и обратное комптоновское излучение

Изменение частоты фотона в результате рассеяния. Сечение и угловая диаграмма рассеяния. Торможение электрона в изотропном поле излучения. Нагрев/охлаждение плазмы в поле излучения. Эддингтоновская светимость.

6. Комптоновское взаимодействие изотропного поля излучения с бесконечной однородной средой

Уравнение Компанейца и его свойства. Эффект Сюняева-Зельдовича в скоплениях галактик.

7. Формирование рентгеновских спектров в результате комптонизации

Формирование степенного спектра излучения в облаке горячего газа. Отражение рентгеновских лучей от оптически толстой холодной среды. Фотопоглощение, флуоресценция.

8. Формирование звезд

Образование звезд в результате гравитационной неустойчивости газа. Джинсовская масса.

9. Внутреннее строение звезд

Тепловая устойчивость стационарных звезд. Вириальная теорема для звезд. Температура в центре Солнца. Термоядерное горение в звездах. Эффективность энерговыделения. Основные циклы термоядерного горения. Солнечные нейтрино. Диаграмма Герцшпрунга-Рассела. Типы и классы звезд. Движение фотонов в недрах Солнца. Уравнения, описывающие внутреннее строение звезд. Роль давления излучения. Соотношения масса-светимость, масса-радиус и масса-время жизни для звезд главной последовательности.

Семестр: 2 (Весенний)

10. Эволюция звезд

Вырождение вещества в ядрах звезд. Белые карлики: основные свойства, предел Чандрасекара на массу. Нейтронные звезды: основные свойства, предел Оппенгеймера-Волкова на массу. Сход звезды с главной последовательности. Стадия гиганта/сверхгиганта. Сверхновые звезды: спектральная и физическая классификация. Конечная судьба звезд разных масс.

11. Двойные звезды

Функция масс, нижний предел на массу компаньона. Изменение размера двойной системы при обмене веществом между компонентами и отводе углового момента. Механизмы отвода углового момента.

12. Эволюция тесных двойных систем

Полости Роша, типы двойных систем по Рошу. Стадии эволюции тесной системы из двух массивных звезд. Гамма-всплески.

13. Пульсары

Основные свойства. Торможение вращения. Модель наклонного ротатора. Световой цилиндр. Диаграмма период-температура изменения периода. Возраст пульсаров. Скачки в периоде вращения. Магнитары.

14. Аккреция на компактные объекты

Энергетическая эффективность аккреции на компактный объект. Характерная температура излучения при аккреции на белый карлик, нейтронную звезду, черную дыру. Классификация рентгеновских двойных систем. Методы оценки масс компактных объектов.

15. Аккреционный диск около черной дыры

Основы теории тонкого аккреционного диска, спектр излучения такого диска. Приближение Шакуры-Сюняева для вязкости.

16. Аккреция на нейтронные звезды

Случай слабозамagnetизированной нейтронной звезды: пограничный слой, барстеры. Рентгеновские пульсары: радиусы магнитосферы и коротации, размер полярной шапки, закручивание нейтронной звезды. Миллисекундные пульсары.

17. Сверхмассивные черные дыры

Доказательство присутствия черных дыр в ядрах галактик. Активные ядра галактик: спектральная классификация, схема объединения различных типов, кажущееся сверхсветовое движение выбросов вещества.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, доска, медиапроектор, экран.

6.Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 2 : Теория поля : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под. ред. Л. П. Питаевского .— 8-е изд., стереотип. — М. : Физматлит, 2001, 2003, 2006, 2012, 2014 .— 536 с.
2. Общая астрофизика [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / А. В. Засов, К. А. Постнов ; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, Физический фак., Гос. астроном. ин-т им. П. К. Штернберга .— 2-е изд., испр. и доп. — Фрязино : Век 2, 2011 .— 576 с.

Дополнительная литература

1. Астрономия, популярные лекции/В. Г. Сурдин, -Москва, МЦНМО, 2019
2. M.S. Longair. High Energy Astrophysics.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

<http://www.astronet.ru/>

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра космической физики
курс:	<u>1</u>
квалификация:	магистр

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Дифференцированный зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

Разработчик: С.Ю. Сазонов, д-р физ.-мат. наук

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов
	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Введение в астрофизику» обучающийся должен:

знать:

- основные астрофизические явления и классы объектов;
- основы теории переноса излучения;
- механизмы генерации, поглощения и рассеяния излучения в Галактике и Метагалактике;
- внутреннее строение и основные свойства звезд, этапы формирования и эволюции звезд;
- физические свойства и астрофизические проявления релятивистских компактных объектов.

уметь:

- пользоваться знаниями для решения фундаментальных и прикладных задач астрофизики;
- видеть в задачах физическое содержание;
- делать численные оценки по порядку величины;
- абстрагироваться от несущественного при моделировании реальных физических ситуаций в астрофизике;
- делать качественные выводы при переходе к предельным условиям в изучаемых проблемах.

владеть:

- работы с современной научной литературой по данному вопросу;
- культурой постановки и моделирования астрофизических задач;
- практикой исследования и решения астрофизических задач;
- навыками теоретического анализа реальных астрофизических задач.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

Примеры контрольных заданий:

Первый семестр:

1. Основные астрономические понятия.
2. Перенос излучения.
3. Тормозное излучение.
4. Синхротронное излучение.
5. Комптоновское и обратное комптоновское рассеяние.
6. Комптоновское взаимодействие изотропного поля излучения с бесконечноднородной средой.
7. Формирование рентгеновских спектров в результате комптонизации.
8. Формирование звезд.
9. Внутреннее строение звезд.

Второй семестр:

10. Эволюция звезд.
11. Двойные звезды.
12. Эволюция тесных двойных систем.
13. Пульсары.
14. Аккреция на компактные объекты.
15. Аккреционный диск около черной дыры.
16. Аккреция на нейтронные звезды.
17. Сверхмассивные черные дыры.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Перечень контрольных вопросов:

Первый семестр:

1. Основные космические масштабы, солнечные единицы, параллакс.
2. Основные характеристики электромагнитного излучения, излучение абсолютно черного тела, звездная величина.
3. Уравнение переноса излучения, функция источника, оптическая толщина.
4. Образование спектральных линий, эффект потемнения к краю диска звезды.
5. Тепловое тормозное излучение.
6. Синхротронное излучение электронов со степенным распределением энергий.
7. Изменение частоты фотона в результате комптоновского рассеяния, сечение и угловая диаграмма рассеяния.
8. Торможение электрона в изотропном поле излучения, нагрев/охлаждение плазмы в поле излучения.
9. Эддингтоновская критическая светимость.
10. Уравнение Компанейца и его основные свойства.
11. Эффект Сюняева-Зельдовича в скоплениях галактик.
12. Формирование степенного спектра излучения в результате комптонизации в облаке горячего газа.
13. Отражение рентгеновских лучей от оптически толстой холодной среды.
14. Образование звезд в результате гравитационной неустойчивости газа, масса Джинса.

15. Тепловая устойчивость стационарных звезд, вириальная теорема для звезд, температура в центре Солнца.
16. Эффективность и основные циклы термоядерного горения в звездах.
17. Солнечные нейтрино.
18. Диаграмма Герцшпрунга-Рассела, типы и классы звезд.
19. Движение фотонов в недрах Солнца.
20. Система уравнений для описания внутреннего строения звезд.
21. Роль давления излучения в звездах.
22. Соотношения масса-светимость, масса-радиус и масса-время жизни для звезд главной последовательности.

Второй семестр:

1. Вырождение вещества в ядрах звезд, белые карлики, предел Чандрасекара.
2. Нейтронные звезды, предел Оппенгеймера-Волкова.
3. Сход звезды с главной последовательности, стадия гиганта/сверхгиганта.
4. Сверхновые звезды, их спектральная и физическая классификация, конечная судьба звезд разных масс.
5. Функция масс двойных звездных систем, нижний предел на массу компаньона.
6. Изменение размера двойной системы при обмене веществом между компонентами и отводе углового момента. Механизмы отвода углового момента.
7. Полости Роша, типы двойных систем по Рошу.
8. Стадии эволюции тесной системы из двух массивных звезд.
9. Гамма-всплески.
10. Основные свойства радиопульсаров, торможение вращения, модель наклонного ротатора, световой цилиндр.
11. Диаграмма период-температура изменения периода, возраст пульсаров, скачки в периоде вращения, магнитары.
12. Эффективность аккреции на компактный объект, характерная температура излучения при аккреции на белый карлик, нейтронную звезду, черную дыру.
13. Классификация рентгеновских двойных систем, методы оценки масс компактных объектов.
14. Основы теории тонкого аккреционного диска, спектр излучения аккреционного диска.
15. Приближение Шакуры-Сюняева для вязкости, магниторотационная неустойчивость.
16. Аккреция на слабомагнитную нейтронную звезду: пограничный слой, спектр излучения, барстеры.
17. Рентгеновские пульсары: радиус магнитосферы, размер полярной шапки, аккреционная колонка.
18. Закручивание нейтронной звезды при аккреции, радиус коротации, режим пропеллера, миллисекундные пульсары.
19. Свидетельства присутствия сверхмассивных черных дыр в ядре нашей Галактики и ядрах других галактик.
20. Корреляция между массой сверхмассивной черной дыры и характеристиками родительской галактики.
21. Активность сверхмассивной черной дыры в центре Галактики в недавнем прошлом.
22. Классификация, внутреннее строение и схема объединения различных типов активных ядер галактик.
23. Спектральное распределение энергии активных ядер галактик, сверхсветовое движение релятивистских выбросов.
24. Проблема возникновения квазаров в ранней Вселенной.

Пример экзаменационного билета:

Билет 1.

1. Тормозное излучение. Основные формулы и их вывод, включая случай теплового тормозного излучения.

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Экзамен проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении зачёта и экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.