

**Рабочая программа дисциплины “Теоретическая астрофизика”
(Астрономическое отделение физического факультета МГУ, 4 курс (7,8 семестры)).**

1. Теоретическая астрофизика

2. Лектор.

2.1. Д.ф.-м.н., профессор, Липунов Владимир Михайлович, кафедра астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ, e-mail: lipunov@gmail.com, телефон.: +7(495) 939-5063, +7(916)9095892

3. Аннотация дисциплины.

В лекционном курсе “ **Теоретическая астрофизика** ” профессора Липунова В.М. содержатся фундаментальные знания о теории переноса и методах решения уравнения переноса; об излучении черного тела; о современных моделях возникновения и расширения Вселенной; о развитии неустойчивостей и теории роста малых возмущений в расширяющейся Вселенной ; о возникновении галактик и звезд; о физических условиях в атмосферах звезд и о внутреннем строении звезд; об условиях формирования непрерывного спектра звезд; о классической и квантовой теориях поглощения в линиях; об эволюции одиночных и двойных звезд; о различных механизмах аккреции ; о магнитосферах нейтронных звезд и белых карликов; о типах замагниченных звезд и их эволюции; о популяционном синтезе двойных звезд ; о сверхмассивных черных дырах и квазарах; о нестационарных процессах во Вселенной и т.д.

4. Цели освоения дисциплины.

Приобретение необходимых фундаментальных профессиональных знаний в области теоретической астрофизики , знакомство с ключевыми нерешенными задачами современной астрофизики и овладение методами их исследования. Иллюстрация применения законов физики для объяснения процессов, наблюдаемых в галактиках, звездах и межзвездной среде. Умение производить простейшие численные оценки, связывающие важнейшие параметры астрономических объектов.

5. Задачи дисциплины.

В результате освоения дисциплины «Теоретическая астрофизика» студенты должны приобрести профессиональные знания о теории переноса и методах решения уравнения переноса; об излучении черного тела; о современных моделях возникновения и расширения Вселенной; о развитии неустойчивостей и теории роста малых возмущений в расширяющейся Вселенной ; о физических условиях в атмосферах звезд и их внутреннем строении ; об условиях формирования непрерывного спектра звезд; классической и квантовой теориях поглощения в линиях; об эволюции одиночных и двойных звезд; о различных механизмах аккреции ; о магнитосферах нейтронных звезд и белых карликов; о типах замагниченных звезд и их эволюции; о методах и результатах исследования эволюции одиночных и кратных звезд (популяционном синтезе) звезд ; о сверхмассивных черных дырах и квазарах; о нестационарных процессах во Вселенной; о связи этих исследований с решением смежных проблем астрофизики и космологии.

6. Компетенции.

7.1. Компетенции, необходимые для освоения дисциплины.

ОК-1, ОК-6

7.2. Компетенции, формируемые в результате освоения дисциплины.

ПСК-1.1, ПСК-1.2, ПСК-1.3, ПСК-6.2, ПСК-6.3

7. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

В результате освоения дисциплины студент должен профессионально знать фундаментальные основы теоретической астрофизики: иметь ясное представление о процессах, происхо-

дящих в звездах, межзвездной среде и галактиках; о современных моделях возникновения и расширения Вселенной; о развитии неустойчивостей и теории роста малых возмущений в расширяющейся Вселенной ; уметь производить вычисления, основанные на определенных физических принципах, связывающие различные параметры состояния и эволюции звезд и их систем; иметь четкое представление о теории переноса и теории излучения черного тела; о классической и квантовой теориях поглощения; о физических условиях в атмосферах и внутреннем строении звезд; о магнитосферах релятивистских объектов и их эволюции; о популяционном синтезе двойных звезд ; о сверхмассивных черных дырах и квазарах.

8. Содержание и структура дисциплины.

Вид работы	Семестр			Всего
	7	8		
Общая трудоёмкость, акад. часов	36	36		72
Аудиторная работа:	36	36		72
Лекции, акад. часов	36	36		72
Семинары, акад. часов	-	-		-
Лабораторные работы, акад. часов	-	-		-
Самостоятельная работа, акад. часов	10	10		20
Вид итогового контроля (зачёт, зачёт с оценкой, экзамен)	Экзамен	Экзамен		Экзамен

N раз- дела	Наименование раздела	Трудоёмкость (академических часов) и содержание занятий			Форма текущего контроля	
		Аудиторная работа				Самостоятельная работа
		Лекции	Семинары	Лабораторные работы		
1	Вводный раздел. Основные понятия теории переноса.	№1. 2 часа. <i>ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ПЕРЕНОСА. Интенсивность, поток, плотность энергии излучения, коэффициент поглощения (объемный, на грамм, на частицу), коэффициент излучения.</i>			1 час. <i>Работа с лекционным материалом, решение задач на тему «Основные понятия теории переноса». Самостоятельный расчет потоков излучения от астрофизических объектов, расчет коэффициентов поглощения.</i>	ДЗ

2	Излучение черного тела.	<p>№2. 2 часа. ИЗЛУЧЕНИЕ ЧЕРНОГО ТЕЛА Определение свойств равновесного излучения из первых принципов (изотропия, однородность, отсутствие поляризации, зависимость только от одной температуры). Опыт Стефана. Связь давления излучения и плотности энергии. Объяснение закона Стефана-Больцмана из термодинамических соображений. Энтропия излучения.</p>			<p>1 часа. Работа с лекционным материалом, решение задач на тему «Излучение черного тела.». Самостоятельный расчет давления излучения и плотности энергии.</p>	ДЗ, КР
3	Рождение Вселенной	<p>№3. 2 часа. РОЖДЕНИЕ ВСЕЛЕННОЙ Неразрешенные парадоксы Фридмановской модели (принцип причинности и однородность Вселенной, близость плотности к критической). Инфляция.</p>				

4	Динамика расширения Вселенной.	<p><i>№4. ДИНАМИКА РАСШИРЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ</i></p> <p><i>Наблюдательные свидетельства рождения Вселенной (Закон Хаббла, реликтовое излучение, однородность и изотропия). Ньютоновская и постньютоновская теория расширения Вселенной (критическая плотность, параметр замедления, Фридмановская Вселенная, роль давления и уравнение Толмена). Основные формулы эволюции температуры, плотности, масштабного фактора).</i></p>			<p><i>1 час.</i></p> <p><i>Работа с лекционным материалом, решение задач на тему «Динамика расширения Вселенной». Самостоятельный расчет критической плотности.</i></p>	ДЗ
5	Образование галактик.	<p><i>№5. 2 часа.</i></p> <p><i>ОБРАЗОВАНИЕ ГАЛАКТИК.</i></p> <p><i>Джинсовская неустойчивость. Ньютоновская теория роста малых возмущений в расширяющейся Вселенной. Эволюция Джинсовской массы с расширением Вселенной.</i></p>				
6	Образование звезд.	<p><i>№6. 2 часа.</i></p> <p><i>ОБРАЗОВАНИЕ ЗВЕЗД</i></p> <p><i>Протозвездная среда. Образование звезд в ранней Вселенной.</i></p> <p><i>Общая характеристика межзвездной среды. Магнитные поля, космические лучи. Функция Солпитера.</i></p>			<p><i>1 часа.</i></p> <p><i>Работа с лекционным материалом “Образование звезд”. Самостоятельно вычислить давление магнитного поля межзвездной среды.</i></p>	ДЗ

7	Уравнение переноса.	№7. 2 часа. УРАВНЕНИЕ ПЕРЕНОСА. Нестационарное уравнение переноса. Закон сохранения энергии, уравнение переноса в векторной форме, условие лучистого равновесия. Излучение плоского слоя.				
8	Приближенные методы решения уравнения переноса	№8. 2 часа. ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА Функция источника. Уравнение переноса в диффузионном приближении. Граничные условия.			1 час . Работа с лекционным материалом “ Образование звезд”. Самостоятельно вычислить давление длину свободного пробега.	ДЗ
9	Приближенные методы решения уравнения переноса	№9. 2 часа. Серая фотосфера. Метод Шварцшильда-Шустера. Метод Эддингтона.				
10	Приближенные методы решения уравнения переноса.	№10. 2 часа. ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕНОСА. Сравнение различных методов решения задачи о серой фотосфере. Распределение яркости по диску звезды. Зависимость температуры и плотности от глубины. Эддингтоновский предел.			0,5 ч . Работа с лекционным материалом	КР

11	Непрерывный спектр звезд.	<p>№11. 2 часа. НЕПРЕРЫВНЫЙ СПЕКТР ЗВЕЗД. Коэффициент непрерывного поглощения. Свободно-свободные и связано-свободные переходы. Фактор Гаунта. Поглощение отрицательным ионом водорода. Средний коэффициент поглощения.</p>			0,5 ч . Работа с лекционным материалом	
12	Непрерывный спектр звезд.	<p>№12. 2 часа. НЕПРЕРЫВНЫЙ СПЕКТР ЗВЕЗД. Общая постановка задач теории фотосфер. Приближенная теория. Бальмеровский декремент.</p>				
13	Непрерывный спектр звезд.	<p>№13. 2 часа. НЕПРЕРЫВНЫЙ СПЕКТР ЗВЕЗД. Общая постановка задачи расчета непрерывного спектра звезд. Наблюдаемые характеристики непрерывных спектров звезд.</p>			0,5 ч . Работа с лекционным материалом	
14	Классическая теория поглощения в линиях.	<p>№14. 2 часа. КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ В ЛИНИЯХ Теория Лоренца. Естественная ширина линии. Постоянная затухания. Затухание вследствие столкновений, эффект Доплера. Формула Фойгта.</p>			0,5 ч . Работа с лекционным материалом.	

15	Квантовая теория поглощения в линиях.	№15. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ В ЛИНИЯХ Коэффициенты Эйнштейна. Формула Планка. Коэффициент поглощения, сила осциллятора.			0,5 ч . Работа с лекционным материалом. Самостоятельно определить постоянную затухания для возбужденного атома с двухуровневой структурой.	ДЗ
16	Линии поглощения при ЛТР.	№ 16. 2 часа. ЛИНИИ ПОГЛОЩЕНИЯ ПРИ ЛТР Уравнение переноса в линиях. Эквивалентная ширина. Определение профиля линии.			1 ч . Работа с лекционным материалом. Найти зависимость эквивалентной ширины линии от скорости вращения звезды.	ДЗ
17	Физические условия в атмосферах звезд.	№ 17. 2 часа. ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В АТМОСФЕРАХ ЗВЕЗД Возбуждение и ионизация атомов. Концентрация свободных электронов. Турбулентность. Вращение звезд. Магнитные поля звезд.			1 час . Работа с лекционным материалом “ Физические условия в атмосферах звезд”. Самостоятельно вычислить параметры магнитного поля звезд.	ДЗ
18	Спектральные классы звезд.	№18. 2 часа. СПЕКТРАЛЬНЫЕ КЛАССЫ ЗВЕЗД Зависимость спектра от температуры. Определение ионизационной температуры звезд. Звезды поздних спектральных классов.			1 час. Работа с лекционным материалом “ Спектральные классы звезд”. Самостоятельно вычислить ионизационной температуры звезд различных классов.	ДЗ

19	Весенний семестр. Внутреннее строение звезд (гидростатическое равновесие).	№19. 2 часа. ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗВЕЗД (ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ) Уравнение гидростатического равновесия. Термодинамика звезд.			0,5 ч . Работа с лекционным материалом	
20	Внутреннее строение звезд (политропы).	№20. 2 часа. ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗВЕЗД (ПОЛИТРОПЫ) Вариационный принцип. Теорема вириала. Теория политропных шаров.			0,5 ч . Работа с лекционным материалом	
21	Внутреннее строение звезд (ядерные реакции).	№21. 2 часа. ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ ЗВЕЗД (ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ) Гидродинамическое, тепловое и ядерное время. Ядерные реакции в звездах. Общая система уравнений внутреннего строения звезды. Соотношение масса-светимость.			0,5 ч . Работа с лекционным материалом. Расчет светимости звезды.	ДЗ
22	Звездная эволюция (устойчивость).	№ 22. 2 часа. ЗВЕЗДНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ Тепловая устойчивость звезд. Отрицательная теплоемкость звезд. Загорание гелия			1 ч . Работа с лекционным материалом. Расчет теплоемкости звезды.	ДЗ
23	Звездная эволюция.	№ 23 . 2 часа. ЗВЕЗДНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ Теорема о максимуме температуре самогравитирующей конфигурации. Продукты звездной эволюции: нейтронные звезды, черные дыры и белые карлики.			0,5 ч . Работа с лекционным материалом	

24	Эволюция двойных звезд.	№ 24 . 2 часа. ЭВОЛЮЦИЯ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД Полость Роша. Тесные двойные. Перемена ролей. Общая оболочка. Эволюционный сценарий.				
25	Сферическая аккреция.	№ 25 . 2 часа. СФЕРИЧЕСКАЯ АККРЕЦИЯ Режимы истечения звезд и режимы аккреции. Энерговыделение в результате аккреции. Сферическая аккреция Бонди.			0,5 ч . Работа с лекционным материалом. Расчет темпов аккреции.	ДЗ
26	Цилиндрическая аккреция.	№ 26 . 2 часа. ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ АККРЕЦИЯ Радиус гравитационного захвата. Формула Бонди-Хойла-Литлттона. Аккреция из звездного ветра. Рентгеновские источники в двойных системах.			0,5 ч . Работа с лекционным материалом. Расчет аккреции из звездного ветра.	ДЗ
27.	Дисковая аккреция (динамика).	№ 27 . 2 часа. ДИСКОВАЯ АККРЕЦИЯ (динамика) Стандартная модель дисковой аккреции Шакуры-Сюняева. Основные уравнения.				

28.	Дисковая аккреция (светимость и спектр).	№ 28 . 2 часа. ДИСКОВАЯ АККРЕЦИЯ (светимость и спектр) Решение уравнений стационарной дисковой аккреции. Основные зоны аккреционного диска. К.П.Д. и зона максимального энерговыделения. Универсальный спектр.			0,5 ч . Работа с лекционным материалом	ДЗ
29	Магнитосферы нейтронных звезд и белых карликов.	№ 29 . 2 часа. МАГНИТОСФЕРЫ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД И БЕЛЫХ КАРЛИКОВ Теория рентгеновских пульсаров. Катаклизмические переменные и симбиотические звезды.			0,5 ч . Работа с лекционным материалом	
30	Магнитовращательное излучение компактных звезд.	№ 30 . 2 часа. МАГНИТОВРАЩАТЕЛЬНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КОМПАКТНЫХ ЗВЕЗД Радиопульсары. Электродинамика радиопульсаров.			0,5 ч . Работа с лекционным материалом	ДЗ
31	Типы замагниченных компактных звезд.	№ 31 . 2 часа. ТИПЫ ЗАМАГНИЧЕННЫХ КОМПАКТНЫХ ЗВЕЗД. Режимы взаимодействия гравитирующих замагниченных звезд с аккрецируемой плазмой. Характерные радиусы взаимодействия. Классификация замагниченных звезд.			0,5 ч . Работа с лекционным материалом	ДЗ

32	Эволюция компактных звезд.	№ 32 . 2 часа. ЭВОЛЮЦИЯ КОМПАКТНЫХ ЗВЕЗД Приближенные уравнения эволюции. Треки нейтронных звезд в двойных системах.			0,5 ч . Работа с лекционным материалом	ДЗ
33	Популяционный синтез двойных звезд с релятивистскими компонентами.	№33 . 2 часа. ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД С РЕЛЯТИВИСТСКИМИ КОМПОНЕНТАМИ. Основные методы популяционного синтеза. Машина Сценариев.			1ч. Расчет темпа аккреции вещества на поверхность нейтронной звезды.	ДЗ
34.	Нестационарные процессы в метagalактике.	№ 34 . 2 часа. НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В МЕТАГАЛАКТИКЕ Сверхновые звезды. Гамма-всплески.			1 ч . Работа с лекционным материалом. Расчет выделяемой энергии при различных сценариях образования источников гамма-всплесков.	ДЗ
35	Сверхмассивные черные дыры и активность галактических ядер и квазаров.	№ 35 . 2 часа. СВЕРХМАССИВНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И АКТИВНОСТЬ ГАЛАКТИЧЕСКИХ ЯДЕР И КВАЗАРОВ Образование сверхмассивных черных дыр. Аккреция звезд и газа на сверхмассивные черные дыры.			1 ч Работа с лекционным материалом. , расчет светимости аккреционного диска черной дыры.	ДЗ
36	Разумная жизнь во Вселенной.	№ 36 . 2 часа. РАЗУМНАЯ ЖИЗНЬ ВО ВСЕЛЕННОЙ Парадокс Ферми. Идея единственности и тупиковой ветви. Сверхцивилизации.				

9. Место дисциплины в структуре ООП ВПО

1. Дисциплина является обязательным спецкурсом кафедры
2. Вариативная часть, профессиональный блок, модуль «Астрономия».
3. Курс является необходимым связывающим звеном между общими курсами «Общая астрофизика», «Звездная астрономия», «Астрофизика нейтронных звезд и черных дыр», спецкурсами по физике межзвездной среды, эволюции галактик и космологии.,

3.1. Дисциплины и практики, которые должны быть освоены для начала освоения данной дисциплины.

«Общая астрономия», «Общая астрофизика», «Звездная астрономия».

3.2. Дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее.

Спецкурсы по астрофизике нейтронных звезд и черных дыр, звездной динамике, физике межзвездной среды, физике и эволюции галактик и космологии. Ее освоение также обязательно для научно-исследовательской работы, курсовых работ, дипломных работ, связанной с исследованием всех стадий эволюции одиночных и кратных звезд.

10. Образовательные технологии

Лекции читаются традиционными методами и с использованием современных мультимедийных возможностей и проекционного оборудования. Занятия могут проходить на русском или английском языках.

11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

Промежуточная аттестация проводится на 9 неделе в форме контрольной работы с оценкой. Критерии формирования оценки – уровень знаний пройденной части курса.

Текущая аттестация проводится еженедельно. Критерии формирования оценки – посещаемость занятий, активность студентов на лекциях.

Список задач для контрольной работы

1. Черная дыра с массой 20 солнечных масс влетает в молекулярное облако со скоростью 20 км/с. Можно ли ее наблюдать современными средствами, если облако удалено на расстояние 1 кпс, его плотность – 1000 атомов на см^2 , а энергия аккрецирующего вещества перерабатывается в рентгеновский диапазон с КПД 10% (чувствит. рентген. телескопа считать 10^{-14} эрг/ см^2 с)
2. Оценить время жизни электрона на возбужденном уровне (классический случай).
3. Найти отношение центральных плотностей звезд, если отношение их масс равно 3.
4. Оценить массу сверхмассивной черной дыры, которая способна разрушить звезды типа Солнца.
5. Вывести закон изменения масштабного фактора Вселенной для случая критической плотности на пылевидной стадии.

6. Найти зависимость температуры от оптической глубины фотосферы звезды в диффузном приближении при локальном термодинамическом равновесии. Считать коэффициент поглощения независимым от частоты.
7. Найти зависимость времени нарастания джинсовской неустойчивости от длины волны возмущения, если последняя много больше критической.
8. Определить постоянную затухания для возбужденного атома с двухуровневой структурой.
9. Найти зависимость эквивалентной ширины линии от скорости вращения звезды.
10. Оценить плотность диска в области R_{max} , где скорость вращения V_{max} максимальна, и массу диска, если известна радиальная дисперсия скоростей звезд. Использовать предположение о его пороговой гравитационной устойчивости. Значения параметров задаются преподавателем.
11. Найти освещенность на дне колодца радиуса R , глубиной H ($H \gg R$). Поток наверху равен F .
12. Нейтронная звезда движется по орбите вокруг голубого сверхгиганта на расстоянии 100 солнечных радиусов. Определить темп аккреции вещества на ее поверхность, если темп истечения сверхгиганта 10^{-6} масс Солнца в год, скорость звездного ветра 1000 км/с, масса нейтронной звезды 1,5 массы Солнца, а ее период равен 0,01 секунды при магнитном поле 10^{12} Гаусс. Масс сверхгиганта равна 30 солнечным.
13. Найти соотношение масса-радиус для звезд с протон-протонным циклом и свободно-свободным поглощением.

12. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

1. Липунов В.М. "Астрофизика нейтронных звезд", Москва «Наука», 1987
2. Липунов В.М. "В мире двойных звезд", Москва, Наука, 205 с., 1986.
3. "Сборник задач по астрофизике", Москва, Наука, 128 с., 1986 Липунов В.М., Д.Я.Мартынов
4. "Дисковая аккреция на замагниченные компактные объекты", Липунов В.М.. Астрометрия и Астрофизика, т.36, с.8-12, 1978а.
5. "The determination of the 'diffusion coefficients' and stellar wind velocities for X-ray binaries" *Astron. Astroph. Transactions*, Vol. 8, pp.221-226, 1995 V.M.Lipunov, S.B.Popov
- 6 "Evolution of the double neutron star merging rate and the cosmological origin of Gamma-ray burst sources" , *Astroph.J.*, 1995, v.454, 593-596 (with Postnov, K.A. , Prokhorov M.E.)
- 7 "How abundant is the population of binary radio pulsars with black holes?" 2005, MNRAS, V.359, P.1517 Lipunov, V. M.; Bogomazov, A. I.; Abubekеров, M. K.
- 8 "The binary radiopulsar with optical companion", *Astronomy and Astrophys.*, v.270, p.439-444, 1994 (совместно с С.Н. Назиным, Е.Ю.Осминкиным и М.Е.Прохоровым).
- 9."Эволюция нейтронных звезд в массивных двойных системах", "Физика нейтронных звезд, образование, строение и эволюция" (тематический сборник), ЛФТИ, Ленинград, т.2, с.74-76, 1988 (совместно с К.А.Постновым и М.Е.Прохоровым).
- 10."The Scenario Machine: Binary Population Synthesis", *Review of Astrophys. and Sp.Sci.*, Ed. R.A.Sunyaev, Harwood Acad. Publ., vol.17, pp.1-160, 1996 (With K.A.Postnov & M.E.Prokhorov)

Промежуточная аттестация проводится на 8 неделе в форме коллоквиума с оценкой. Критерии формирования оценки – уровень знаний пройденной части курса.

Текущая аттестация проводится еженедельно. Критерии формирования оценки – посещаемость занятий, активность студентов на лекциях, уровень подготовки к семинарам.

Интернет-ресурсы

<http://master.sai.msu.ru/ru/lectures/>

Методические указания к лабораторным занятиям -

Методические указания к практическим занятиям -

13. Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Астрономия».

Аудитория 26. ГАИШ МГУ. Проектор.