

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова**

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АСТРОФИЗИКИ И ЗВЕЗДНОЙ АСТРОНОМИИ**

УТВЕРЖДАЮ

«__» _____ 20__ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины:

Строение и эволюция звезд

Уровень высшего образования:

Специалитет

Специальность:

03.05.01 Астрономия

Направленность (профиль)/специализация образовательной программы:

Общая специальность

Форма обучения:

Очная

Москва 20__

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по специальности 03.05.01 «Астрономия», утвержденным приказом МГУ от 30.12.2020 г. № 1381.

Год (годы) приема на обучение_____

Авторы-составители:

1. Д.ф.-м.н. Ламзин Сергей Анатольевич, кафедра астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ

Заведующий кафедрой

Д.ф.-м.н. профессор член-корр. РАН Постнов Константин Александрович,
заведующий кафедрой астрофизики и звездной астрономии

Аннотация к рабочей программе дисциплины «Строение и эволюция звезд»

В первой части курса рассматриваются физические процессы, определяющие внутреннее строение и эволюцию звезд: излагаются сведения об уравнении состояния звездного вещества, источниках энергии звезд и различных механизмах переноса тепла. Выводятся уравнения, позволяющие моделировать эволюцию звезд, и рассматриваются методы их решения. Вторая половина курса посвящена сравнению численных расчетов с результатами наблюдений одиночных звезд на разных стадиях эволюции. Для понимания физического смысла численных расчетов привлекаются порядковые оценки и простые аналитические модели. Рассматривается процесс рождения звезд, стадия главной последовательности, красного гиганта и продвинутые этапы звездной эволюции, завершающиеся формированием белых карликов, нейтронных звезд или черных дыр. В последней лекции рассматривается теория звездных пульсаций и основы астросейсмологии.

Дисциплина реализуется на 5 курсе в 9 семестре и является дисциплиной по выбору для освоения обучающимися.

Объем дисциплины составляет 3 з.е., в том числе 72 академических часа, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 36 академических часа, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

Промежуточная аттестация по дисциплине (модулю) – экзамен в 9 семестре.

1. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

(относится к базовой или вариативной части, является обязательной для освоения или дисциплиной по выбору, является факультативом)

Пример.

Дисциплина «Механика» входит в модуль «Общая физика» блока «Профессиональный» базовой части и является обязательной для освоения обучающимися.

2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия Отсутствуют

(указать, если требуются, в следующей последовательности: входная компетенция или входные результаты обучения или перечень освоенных ранее дисциплин (модулей), практик)

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора (индикаторов) достижения компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с индикаторами достижения компетенций
		<p>Знать: фундаментальные законы, определяющие строение и эволюцию звезд и их взаимосвязь; основные методы расчета структуры и эволюции звезд; основные математические методы, используемые при решении задач, связанных с физикой звезд</p> <p>Уметь: строить простые теоретические модели звезд; объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты численных расчетов моделей звезд; решать типовые задачи физики звезд.</p> <p>Владеть/Иметь опыт: математическим аппаратом, применяемым для расчета структуры и эволюции звезд; методами теоретического анализа наблюдений, лежащих в основе моделирования звездной эволюции.</p>

4. Объем дисциплины (модуля) составляет ____3____ з.е., в том числе: ____72____ академических часа, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, ____36____ академических часов, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

Контактная работа включает в себя:

занятия лекционного типа (лекции и иные учебные занятия, предусматривающие преимущественную передачу учебной информации педагогическими работниками организации и (или) лицами, привлекаемыми организацией к реализации образовательных программ на иных условиях, обучающимся), и (или) занятия семинарского типа (семинары, практические занятия, практикумы, лабораторные работы, коллоквиумы и иные аналогичные занятия), и (или) групповые консультации, и (или) индивидуальную работу обучающихся с педагогическими работниками организации и (или) лицами, привлекаемыми организацией к реализации образовательных программ на иных условиях (в том числе индивидуальные консультации);...

В конце данного пункта следует отметить, если дисциплина или часть ее реализуется с применением электронного обучения и дистанционных образовательных технологий)

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

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (ак.ч.)	В том числе					Самостоятельная работа обучающегося, академические часы	Форма текущего контроля успеваемости, наименование
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, академические часы ¹				Всего		
		Занятия лекционного типа (лекций)	Занятия семинарского типа					
	Семинары		Лабораторные занятия*	Практические занятия*				
Тема 1. Сферически симметричные звезды в рамках теории тяготения Ньютона. Закон сохранения массы и уравнение гидростатическое равновесие, теорема вириала, характерные времена процессов. Необходимое условие устойчивости звезд.	6	2	2				2	

¹Текущий контроль успеваемости может быть реализован в рамках занятий лекционного и(или) семинарского типа.

Тема 2. Политропные звезды Структура политропных и изотермических звезд, условие применимости политропных моделей.	6	2	2				2	
Тема 3. Уравнение состояния вещества в звездах. Ионизация и диссоциация идеального газа, неидеальный бoльцмановский газ, чернотельное излучение, образование электрон-позитронных пар, вырожденный газ электронов и нейтронов.	9	3	3				3	
Тема 4. Выделение ядерной и гравитационной энергии в звездах. Ядерные реакции: p-p цепочка, CNO-цикл, 3-alpha реакции, формирование элементов железного пика. Уравнения, описывающие изменение	9	3	3				3	

химического состава звезд. Бета-процессы и роль нейтрино в эволюции звезд.								
<i>Тема 5. Перенос энергии в звездах: лучистая и электронная теплопроводность. Диффузионное приближение, уравнение лучистой теплопроводности и его обобщение для учета электронной теплопроводности.</i>	6	2	2				2	
<i>Тема 6. Конвективный перенос энергии в звездах Условие возникновения конвекции, теория длины пути перемешивания и ее модификации .</i>	6	2	2				2	
<i>Тема 7. Полная система уравнений, описывающих структуру и эволюцию сферически симметричных звезд без учета эффектов ОТО.</i>	6	2	2				2	

Уравнение, описывающее закон сохранения энергии. Граничные условия и математические методы решения полной системы уравнений.								
Тема 8. Рождение звезд и планет. Эволюция протозвездного облака. Молодые звезды и коричневые карлики, предел Кумара. Формирование планетных систем.	6	2	2				2	Контрольная работа
Тема 9. Эволюция звезд на главной последовательности. Соотношение масса-радиус-светимость. Особенности эволюции звезд разных поколений. Влияние вращения и магнитного поля на эволюцию звезд. Механизмы потери массы и углового момента, меридиональная	6	2	2				2	

циркуляция (11 неделя).								
Тема 10. Продвинутое этапы эволюции звезд с массой $< 2.5 M_{\odot}$. Гелиевая вспышка, неустойчивость в гелиевом слоевом источнике, образование планетарных туманностей.	6	2	2				2	
Тема 11. Эволюция звезд с массой от 2.5 до 8 M_{\odot} после ухода с главной последовательности. Неустойчивость Шенберга- Чандрасекара. Интерпретация диаграмм цвет- величина звездных скоплений. Влияние потери массы на эволюцию звезд умеренных масс.	6	2	2				2	
Тема 12. Эволюция звезд с массой $> 8 M_{\odot}$ после ухода с главной последовательности. Звезды типа Вольфа- Райе. Механизм вспышек сверхновых	6	2	2				2	

типа II и Ibс. Образование черных дыр и природа гамма- всплесков. Химическая эволюция Вселенной.								
<i>Тема 13. Белые карлики</i> Строение белых карликов и их тепловая эволюция. Сверхновые типа Ia	6	2	2				2	
<i>Тема 14. Нейтронные звезды и черные дыры</i> Строение и тепловая эволюция нейтронных звезд. Эффекты общей теории относительности и черные дыры	6	2	2				2	
<i>Тема 15. Пульсации звезд, основы астросейсмологии.</i> Радиальные колебания звезд, цефеиды. Механизмы подпитки колебаний. Нерадиальные колебания звезд разных типов. Основы астросейсмологии.	6	2	2				2	Контрольная работа
Промежуточная аттестация экзамен	4						4²	

²Часы на проведение промежуточной аттестации выделяются из часов самостоятельной работы обучающегося

<i>(указывается форма проведения)</i>				
Итого	108	72	36	

*Лабораторные занятия, практические занятия относятся к практической подготовке обучающихся.

6. Фонд оценочных средств для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)

6.1. Типовые задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения:

Примеры задач для контрольной работы:

1. Вычислить молекулярный вес газа, который состоит из смеси молекулярного водорода и атомарного гелия, если относительное обилие водорода (по массе) $X=0,8$.
2. Рассмотрим звезды, давление в которых определяется идеальным больцмановским газом с постоянным по радиусу химическим составом. Найти, при каких индексах n политропные модели будут описывать звезды с лучистым и конвективным переносом энергии. Принять, что $\kappa_{\text{ad}}=2/5$.
3. У Солнца нет поверхности, однако его край виден отчетливо. Почему? Ответ подтвердить расчетом.
4. Найти характерную толщину атмосферы нейтронной звезды с $M=M_{\odot}$, $R=10$ км и $T_{\text{eff}}=10^6$ К.

Примеры экзаменационных вопросов.

1. Постановка задачи о внутреннем строении и эволюции сферически симметричных звезд в рамках теории тяготения Ньютона.
2. Гидростатическое равновесие, теорема вириала, характерные времена процессов.
3. Необходимое условие устойчивости звезд.
4. Политропные звезды.
5. Уравнение состояния вещества в звездах: ионизация и диссоциация идеального газа; чернотельное излучение.
6. Уравнение состояния вещества в звездах: вырожденный электронный газ.
7. Уравнение состояния вещества в звездах: образование электрон-позитронных пар; нейтронизация вещества; учет неидеальности газа.
8. Источники энергии в звездах: ядерные реакции и гравитационное сжатие.
9. Ядерные реакции: p-p, CNO цикл, 3-альфа.
10. Ядерные реакции: от углерода до элементов железного пика.
11. Перенос энергии в звездах: лучистая и электронная теплопроводность.
12. Перенос энергии в звездах: конвекция.

13. Бета-процессы, роль нейтрино в эволюции звезд.
14. Полная система уравнений, описывающих структуру и эволюцию сферически симметричных звезд без учета эффектов ОТО. Граничные условия и методы решения.
15. Рождение звезд. Звезды типа Т Тельца, Ae/Be Хербига и фюоры.
16. Предел Кумара. Коричневые карлики.
17. Эволюция звезд главной последовательности (ГП). Соотношение масса - радиус-светимость вдоль ГП.
18. Эволюция звезд с массой $< 2.5M_{\odot}$ после ухода с ГП. Гелиевая вспышка.
19. Неустойчивость горения гелия в слоевом источнике. Образование планетарных туманностей.
20. Эволюция звезд с массой в интервале от $2.5M_{\odot}$ до $8M_{\odot}$ после ухода с ГП. Неустойчивость Шенберга-Чандрасекара.
21. Интерпретация диаграмм Гершпрунга-Рессела рассеянных и шаровых скоплений.
22. Белые карлики: структура, предельная масса и тепловая эволюция.
23. Сверхновые типа Ia.
24. Эволюция звезд с массой $> 8M_{\odot}$ после ухода с ГП. Звезды типа Вольфа-Райе.
25. Механизм вспышки сверхновых II типа.
26. Нейтронные звезды: структура, диапазон масс и тепловая эволюция.
27. Радиальные пульсации звезд, полоса неустойчивости.
28. Основы астросейсмологии: нерадиальные пульсации звезд, p и g моды, информация, получаемая методами астросейсмологии.

В настоящем разделе приводятся:

- *примеры типовых заданий и иных материалов с учетом указанных в таблице п.5 наименований форм текущего контроля успеваемости, например, образцы вопросов (заданий) устного опроса и домашних заданий, контрольных работ, коллоквиумов, темы докладов, рефератов итп.;*
- *типовые вопросы, задания итп. для проведения промежуточной аттестации (зачета и (или) экзамена).*

6.2. Шкала и критерии оценивания

(шкала и критерии оценивания могут быть типовыми для всех дисциплин (модулей), входящих в ОПОП ВО)

7. Ресурсное обеспечение

- Перечень основной и дополнительной учебной литературы _____
Бисноватый-Коган Г.С., Физические вопросы теории звездной эволюции}, М. Наука (1989)
Бисноватый-Коган Г.С., Релятивистская астрофизика и физическая космология}, М. URSS (2010)
Зельдович Я.Б., Блинников С.И., Шакура Н.И., Физические основы строения и эволюции звезд}, М., МГУ (1981)
Зельдович Я.Б., Новиков И.Д., Теория тяготения и эволюции звезд}, М., Наука (1971)
Кокс Дж. П. Теория звездных пульсаций}, М.: Мир, (1983)
Лозинская Т.А., Взрывы звезд и звездный ветер в галактиках}, М.: УРСС Изд. КРАСАНД (2012)
Масевич А.Г., Тутуков А.В., Эволюция звезд: теория и наблюдения}, М., Наука (1988)
Сурдин В.Г., Рождение звезд}, М., УРСС (2001)
Тассуль Ж.-Л., Теория вращающихся звезд}, М. Мир (1982)
Тейлер Р. Дж., Происхождение химических элементов}, М.: Мир, 1975.
Черепашук А.М., Тесные двойные звезды}, М.: Физматлит (2012)
Шапиро С., Тьюколски С., Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды}, М., Мир (1985)
Aerts C., Christense-Dalsgaard J., Kurtz D.W., Asteroseismology}, A\& A Library, Springer Dordrecht Heidelberg London New York (2010).
Bodenheimer P.H., Principles of Star Formation}, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2011)
Branch D., Wheeler J.C., Supernova Explosions}, Astronomy and Astrophysics Library, Springer-Verlag GmbH Germany (2017)
Iben I., Stellar Evolution Physics, Volume 1: Physical Processes in Stellar Interiors}, Cambridge University Press (2012)
Iben I., Stellar Evolution Physics, Volume 2: Advanced Evolution of Single Stars}, Cambridge University Press (2013)
Iliadis C., Nuclear Physics of Stars}, J.Wiley \& Sons, Second edition (2015).
Kippenhahn R., Weigert A., Weiss A., Stellar Structure and Evolution}, Second Edition, Astron. and Astrophys. Library, Springer-Verlag (2012)
- Перечень лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения _____ *(приводится при необходимости)*
- Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем _____ *(приводится при необходимости)*
- Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» _____
- Описание материально-технической базы _____ *(приводится при необходимости)*

8. Язык преподавания: русский (отдельно укажите, если дисциплина может быть реализована на иностранном языке).