

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА АСТРОФИЗИКИ И ЗВЕЗДНОЙ АСТРОНОМИИ

УТВЕРЖДАЮ  
Декан физического факультета  
МГУ  
\_\_\_\_\_ / Н.Н. Сысоев /  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20 г.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

**Наименование дисциплины:**

ТЕСНЫЕ ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ

---

**Уровень высшего образования:**

Специалитет

---

**Направление подготовки:**

03.05.01 Астрономия

---

**Направленность (профиль) ОПОП:**

Общая специальность

---

Квалификация «Специалист»

**Форма обучения:** Очная форма обучения

---

Рабочая программа рассмотрена и одобрена  
Ученым советом физического факультета МГУ

(протокол № \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_)

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.

Год (годы) приема на обучение \_\_\_\_\_

**Авторы–составители:**

1. Д.ф.-м.н., профессор, академик РАН Черепашук Анатолий Михайлович, кафедра астрофизики звездной астрономии физического факультета МГУ.

Заведующий кафедрой

Д.ф.-м.н. профессор Постнов Константин Александрович.

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины «Тесные двойные системы»**

В лекционном курсе содержатся базовые знания о физике и эволюции тесных двойных звездных систем (ТДС), излагаются современные методы интерпретации фотометрических и спектральных наблюдений ТДС, а также описываются результаты наблюдений и их интерпретации для ТДС разных типов. Особое внимание уделяется исследованиям ТДС на поздних стадиях эволюции, содержащих такие резко пекулярные объекты, как звезды Вольфа-Райе, белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. В курсе излагаются также современные методы решения обратных задач астрофизики на компактных множествах специальной структуры и на конечно-параметрических множествах функций. Данный курс в последние годы приобрел особую актуальность в связи с открытием гравитационных волн от слияния черных дыр и нейтронных звезд в двойных системах.

### **Разделы рабочей программы**

1. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
4. Форма обучения.
5. Язык обучения.
6. Содержание дисциплины.
7. Объем дисциплины
8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.
10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
11. Шкала оценивания.
12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Тесные двойные системы» реализуется на 5-ом курсе в 9-ом семестре и является составной частью профессионального блока вариативной части.

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

Требуется знать основы астрофизики.

## 3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
УК-1.Б	<p><b>З-1 Знать:</b> фундаментальные законы образования и эволюции тесных двойных систем (ТДС)</p> <p><b>З-2 Знать:</b> основные методы наблюдений ТДС и их математической обработки</p> <p><b>У-1 Уметь:</b> строить теоретические модели ТДС, используя критически анализ данных</p> <p><b>У-2 Уметь:</b> планировать и проводить наблюдательные исследования в области изучения ТДС, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе наблюдений</p> <p><b>В-1 Владеть:</b> математическим аппаратом, применяемым в астрофизике</p> <p><b>В-2 Владеть:</b> методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике</p>
ОПК-1.Б	<p><b>З-1 Знать:</b> основные математические методы, используемые при решении задач астрофизики при исследовании ТДС</p> <p><b>У-1 Уметь:</b> решать типовые задачи теории ТДС</p> <p><b>У-2 Уметь:</b> строить математические модели явлений и процессов при исследовании ТДС</p> <p><b>В-1 Владеть:</b> навыками проведения астрономических наблюдений и обработки их результатов</p>

2. **Форма обучения:** очная.

3. **Язык обучения:** русский.

4. **Содержание дисциплины**

*Тема 1. Предмет исследования тесных двойных систем (ТДС)*

Понятие тесной двойной системы (ТДС). Типы ТДС и их наблюдательные проявления.

*Тема 2. Методы спектральных исследований ТДС*

Анализ кривых лучевых скоростей ТДС. Методы определения масс звезд-компонент ТДС. Функция масс и ее свойства.

*Тема 3. Анализ фотометрических исследований ТДС*

Искажения кривых лучевых скоростей ТДС эффектами близости компонент (эффекты эллипсоидальности и отражения, газовые потоки, дискообразные оболочки). Анализ кривых блеска ТДС с тонкими атмосферами. Сферические звезды на круговых орбитах. Метод Рессела. Методы определения радиусов звезд-компонент ТДС.

*Тема 4. Эффекты взаимодействия компонент ТДС*

Эффекты близости компонент: эффект эллипсоидальности, роль гравитационного потемнения и потемнения к краю. Вид кривой блеска обусловленной эллипсоидальностью в разных диапазонах спектра. Полость Роша. Эффекты близости компонент: эффект отражения. Вид кривой блеска обусловленной эффектом отражения. Случай звезд с близкими температурами и случай когда температуры компонент ТДС сильно различаются. Ректификация кривых блеска ТДС.

*Тема 5. Современные методы анализа кривых блеска ТДС*

Метод синтеза кривых блеска ТДС, содержащих звезды с тонкими атмосферами.

*Тема 6. Современные методы анализа кривых лучевых скоростей ТДС*

Метод синтеза профилей линий и кривых лучевых скоростей ТДС с тонкими атмосферами.

*Тема 7. Обратные параметрические задачи в астрофизике*

Обратные задачи в астрофизике. Статистическая постановка обратной параметрической задачи интерпретации кривых блеска и кривых лучевых скоростей ТДС. Проверка адекватности модели, оценка доверительных интервалов для решения.

*Тема 8. Методы определения масс релятивистских объектов*

Определение масс черных дыр и нейтронных звезд в рентгеновских двойных системах и в гравитационно-волновых системах.

*Тема 9. ТДС с протяженными атмосферами*

Анализ кривых блеска ТДС с протяженными атмосферами в континууме. Постановка задачи. Классическая и полуклассическая модели. Критерий единственности решения.

*Тема 10. Звезды WR в двойных системах*

Методы восстановления структуры звездных ветров звезд Вольфа-Райе в затменных WR+O двойных системах. Случаи континуума и эмиссионных линий.

*Тема 11. Понятие о методах решения некорректных задач в астрофизике*

Некорректные задачи и их особенности. Понятие о методе регуляризации Тихонова. Понятие о методе решения обратных задач на компактных множествах функций. Примеры компактных множеств, используемых в астрофизических задачах.

*Тема 12. Физика областей взаимодействия компонент ТДС*

Структура ветров звезд Вольфа-Райе в двойных WR+O системах: область взаимодействия ветров и невозмущенный ветер звезды WR.

*Тема 13. Эллиптические орбиты*

Особенности методов анализа наблюдений ТДС с эллиптическими орбитами.

*Тема 14. Методы исследования внутренней структуры звезд-компонент ТДС*

Изучение вращения линии апсид ТДС. Учет эффектов общей теории относительности.

*Тема 15. Эволюция ТДС*

Парадокс Алголя. Механизм «перемены ролей» компонент ТДС. Первичный и вторичный обмен масс. Различия в эволюции массивных и маломассивных ТДС.

*Тема 16. ТДС на поздних стадиях эволюции*

Типы поздних ТДС, их классификация и важнейшие характеристики. Гравитационно-волновые ТДС и их характеристики.

**7. Объем дисциплины**

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах				
		Общая трудоемкость	в том числе			Самостоятельная работа студентов
			ауд.	занятий		
		Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров		
Тесные двойные системы	2	72	36	36	0	36

**8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий**

Изучение курса «Тесные двойные системы» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса. На лекциях также происходит обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины. Предусматривается самостоятельная работа, заключающаяся в подготовке к лекционным занятиям. По вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы					Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Всего часов	Лекции	Научно-практические занятия	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Предмет исследования тесных двойных систем	2	2	-	-	-	Опрос в конце лекции
2	Методы спектральных исследований ТДС	2	2	-	-	-	
3	Анализ фотометрических исследований ТДС	4	2	-	-	2	
4	Эффекты взаимодействия компонент ТДС	4	2	-	-	2	
5	Современные методы анализа кривых блеска ТДС	6	4	-	-	2	
6	Современные методы анализа кривых лучевых скоростей ТДС	6	4	-	-	2	
7	Обратные параметрические задачи в астрофизике	6	2	-	-	4	
8	Методы определения масс релятивистских объектов	6	2	-	-	4	
9	ТДС с протяженными атмосферами	4	2	-	-	2	
10	Звезды WR в двойных системах	6	2	-	-	4	
11	Понятие о методах решения некорректных задач в астрофизике	4	2	-	-	2	
12	Физика областей взаимодействия компонент ТДС	4	2	-	-	2	
13	Эллиптические орбиты	4	2	-	-	2	
14	Методы исследования внутренней структуры звезд-компонент ТДС	4	2	-	-	2	
15	Эволюция ТДС	4	2	-	-	2	
16	ТДС на поздних стадиях эволюции	4	2	-	-	2	
							Зачет
<b>ИТОГО:</b>		<b>72</b>	<b>36</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>36</b>	

## 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Тесные двойные системы» осуществляется на лекциях и заключается в оценке активности и качества участия в опросах и собеседованиях по проблемам, изучаемых в рамках тем лекционных занятий, аргументированности позиции; оценивается широта используемых теоретических знаний.

Аттестация по дисциплине «Тесные двойные системы» проводится в конце девятого семестра в форме зачета.

Результаты сдачи зачета оцениваются по шкале «зачет – незачет».

## 10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

### Требования к структуре и содержанию фонда оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
<b>Оценочные средства текущего контроля</b>		
Тематический опрос (в форме ответов на контрольные вопросы)	Средство контроля, организованное как специальная беседа по тематике предыдущей лекции и рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Собеседование (в форме беседы, а также дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
<b>Оценочные средства промежуточной аттестации</b>		
Собеседование	Средство, позволяющее получить экспертную оценку знаний, умений и навыков по для оценивания и анализа различных фактов и явлений в своей профессиональной области.	Требования к порядку проведения собеседования



## 11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	незачет	зачет		
ЗНАТЬ: фундаментальные законы астрофизики и их взаимосвязь УК-1.Б 3-1	Отсутствие знаний фундаментальных законов астрофизики и их взаимосвязей	В целом успешные, но не систематические знания фундаментальных законов астрофизики и их взаимосвязей	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знания фундаментальных законов астрофизики и их взаимосвязей	Успешные и систематические знания фундаментальных законов астрофизики и их взаимосвязей
ЗНАТЬ: основные понятия математической обработки эксперимента астрофизики УК-1.Б 3-2	Отсутствие знаний или фрагментарное знание основных понятий математической обработки эксперимента астрофизики	В целом успешное, но не систематическое знание основных понятий математической обработки эксперимента астрофизики	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знание основных понятий математической обработки эксперимента астрофизики	Успешное и систематическое знание основных понятий математической обработки эксперимента астрофизики
ЗНАТЬ: основные математические методы, используемые при решении задач астрофизики ОПК-1.Б 3-1	Отсутствие знаний или фрагментарное применение основных математических методов, при решении задач астрофизики	В целом успешное, но не систематическое применение основных математических методов, при решении задач астрофизики	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знание основных математических методов, при решении задач астрофизики	Успешное и систематическое знание основных математических методов, при решении задач астрофизики
УМЕТЬ: строить теоретические модели астрофизики, используя критический анализ	Отсутствие умения строить теоретические модели астрофизики, используя критический анализ данных	В целом успешное, но не систематическое умение строить теоретические модели	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы умение строить теоретические модели	Успешное и систематическое умение строить теоретические модели астрофизики, используя критический анализ

данных УК-1.Б У-1		астрофизики, используя критически анализ данных	модели астрофизики, используя критически анализ данных	анализ данных
УМЕТЬ: планировать и проводить эксперименталь ные исследования в области астрофизики, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе эксперимента УК-1.Б У-2	Отсутствие умения планировать и проводить эксперименталь ные исследования в области астрофизики, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе эксперимента	В целом успешное, но не систематическо е умение планировать и проводить экспериментал ьные исследования в области астрофизики, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе эксперимента	В целом успешно е, но содержащее отдельные пробелы умение планировать и проводить экспериментал ьные исследования в области астрофизики, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе эксперимента	Успешное и систематическое планировать и проводить эксперименталь ные исследования в области астрофизики, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе эксперимента
УМЕТЬ: решать типовые задачи астрофизики ОПК-1.Б У-1	Отсутствие умения решать типовые задачи	В целом успешное, но не систематическо е умение решать типовые задачи	В целом успешно е, но содержащее отдельные пробелы умение решать типовые задачи	Успешное и систематическое умение решать типовые задачи
УМЕТЬ: строить математическ ие модели явлений и процессов астрофизики ОПК-1.Б У-2	Отсутствие умения строить математические модели физических явлений и процессов	В целом успешное, но не систематическо е умение строить математически е модели физических явлений и процессов	В целом успешно е, но содержащее отдельные пробелы умение строить математически е модели физических явлений и процессов	Успешное и систематическое умение строить математические модели физических явлений и процессов
ВЛАДЕТЬ: математическ им аппаратом,	Отсутствие/фраг ментарное владение	В целом успешное, но не	В целом успешно е, но	Успешное и систематическое владение

применяемым в астрофизике УК-1.Б В-1	математическим аппаратом, математическим аппаратом, применяемым в астрофизике	систематическое владение математическим аппаратом, математическим аппаратом, применяемым в астрофизике	содержащее отдельные пробелы владение математическим аппаратом, математическим аппаратом, применяемым в астрофизике	математическим аппаратом, математическим аппаратом, применяемым в астрофизике
ВЛАДЕТЬ: методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике УК-1.Б В-2	Отсутствие/фрагментарное владение методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике	В целом успешное, но не систематическое владение методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владение методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике	Успешное и систематическое владение методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике
ВЛАДЕТЬ: навыками проведения физического эксперимента и обработки его результатов ОПК-1.Б В-1	Отсутствие/фрагментарное владение навыками проведения физического эксперимента и обработки его результатов	В целом успешное, но не систематическое владение навыками проведения физического эксперимента и обработки его результатов	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владение навыками проведения физического эксперимента и обработки его результатов	Успешное и систематическое владение навыками проведения физического эксперимента и обработки его результатов

## 12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

Текущая аттестация проводится еженедельно. Критерии формирования оценки – степень посещаемости занятий, активность студентов на лекциях и семинарах.

### *Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся*

Материалы для контрольных заданий можно найти в монографии А.М.Черепашука «Тесные двойные звезды», М., Физматлит, 2013. 90 авторских листов.

**Пример:** Из спектральных наблюдений рентгеновской двойной системы измерена функция масс оптической звезды. Определить массу релятивистского объекта и идентифицировать его с нейтронной звездой или черной дырой.

### **13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.**

Промежуточная аттестация проводится на 8 неделе в форме коллоквиума с оценкой. Критерии формирования оценки – четкость ответов студента на поставленные вопросы и уровень знаний пройденного предмета.

#### *Материалы промежуточной аттестации обучающихся*

*Монография А.М.Черепашука «Тесные двойные звезды», Том 1 и Том 2, М., Физматлит, 2013.*

**Пример:** Понятие тесной двойной системы. Парадокс Алголя. Отличие эволюции звезды в тесной двойной системе от эволюции одиночной звезды.

### **14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы**

Основная литература.

1. А.В.Гончарский, А.М.Черепашук, А.Г.Ягола, Некорректные задачи астрофизики, М., «Наука», 1985.
2. А.В.Гончарский, С.Ю.Романов, А.М.Черепашук, Конечнопараметрические обратные задачи астрофизики, М., «Изд. МГУ», 1991.
3. А.М.Cherepashchuk, N.A.Katysheva, T.S.Khruzina, S.Yu.Shugarov, Highly Evolved Close Binary Stars: Catalogue, Amsterdam, “Gordon and Breach Sci. Publ.”, 1996.
4. А.М.Черепашук «Тесные двойные звезды», Часть I и II, М., Физматлит, 2013.

Дополнительная литература.

1. А.М.Черепашук, Поиски черных дыр, УФН, т.173, с.342-384, 2003.
2. А.М.Черепашук, А.Д.Чернин, Горизонты Вселенной, Новосибирск, изд-во СО РАН, 2005.
3. А.М.Черепашук, Диагностика звездных атмосфер, в книге «Энциклопедия низкотемпературной плазмы» (ред. В.Е.Фортов), М., изд-во «Янус-К», 2006, с.324-354.
4. А.М.Черепашук, Открытие гравитационных волн – новый этап в исследованиях черных дыр, УФН, Т.186, 1001, 2016.
5. А.М.Черепашук (редактор-составитель), «Многоканальная астрономия», Фрязино, Изд.-во «Век-2», 2019.

#### **Материально-техническое обеспечение**

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

Курс может быть прочитан в поточной аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски.