

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

**ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА АСТРОФИЗИКИ И ЗВЕЗДНОЙ АСТРОНОМИИ, КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ  
ФИЗИКИ**

**УТВЕРЖДАЮ**

\_\_\_\_\_ / /  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

Наименование дисциплины:

**ТЕСНЫЕ ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ С КОМПАКТНЫМИ ОБЪЕКТАМИ**

---

Уровень высшего образования:  
**Магистратура**

---

Специальность:

**03.04.02 Физика**

Направленность (профиль)/специализация образовательной программы:  
**Гравитация и астрофизика**

---

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 03.04.02 «Физика», утвержденным приказом МГУ от 30.12.2020 г. № 1381.

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

**Авторы-составители:**

1. Д.ф.-м.н. профессор академик РАН Черепашук Анатолий Михайлович, кафедра астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ
2. Д.ф.-м.н. профессор Шакура Николай Иванович, отдел релятивистской астрофизики ГАИШ МГУ
- 3.

Заведующий кафедрой

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

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины**

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.

Дисциплина реализуется на 2 курсе в 3 семестре и является обязательной для освоения обучающимися.

Объем дисциплины составляет 2 з.е., в том числе 36 академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 36 академических часов, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

Промежуточная аттестация по дисциплине (модулю) – экзамен в 3 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**

*(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**

<b>Код и наименование компетенции</b>	<b>Код и наименование индикатора (индикаторов) достижения компетенции</b>	<b>Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с индикаторами достижения компетенций</b>
		<p>Знать: фундаментальные законы образования и эволюции тесных двойных систем (ТДС); основные методы наблюдений ТДС и их математической обработки; основные математические методы, используемые при решении задач астрофизики при исследовании ТДС.</p> <p>Уметь: строить теоретические модели ТДС, используя критически анализ данных; планировать и проводить наблюдательные исследования в области изучения ТДС, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе наблюдений; решать типовые задачи теории ТДС; строить математические модели явлений и процессов при исследовании ТДС.</p> <p>Владеть/Иметь опыт: математическим аппаратом,</p>

		применяемым в астрофизике; методами теоретического исследования явлений и процессов в астрофизике; навыками проведения астрономических наблюдений и обработки их результатов.
--	--	---

4. Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е., в том числе: 36 академических часов, 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					Форма текущего контроля успеваемости, наименование	
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, академические часы <sup>1</sup>			Всего			
		Занятия лекционного типа (лекции)	Семинары	Лабораторные занятия*	Практические занятия*			
<i>Тема 1. Предмет исследования тесных двойных систем (ТДС). Методы спектральных исследований ТДС. Понятие тесной двойной системы (ТДС). Типы ТДС и их наблюдательные проявления. Анализ кривых лучевых скоростей ТДС. Методы определения</i>	<b>4</b>	<b>2</b>				<b>2</b>	<i>Пример. Опрос Проверка домашнего задания Контрольная работа, Тестирование Коллоквиум Реферат ...</i>	

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

масс звезд-компонент ТДС. Функция масс и ее свойства.							
<p><i>Тема 2. Анализ фотометрических исследований ТДС. Эффекты взаимодействия компонент ТДС.</i></p> <p>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 орbitах. Метод Рессела. Методы определения радиусов звезд-компонент ТДС. Эффекты близости компонент: эффект эллипсоидальности, роль гравитационного потемнения и потемнения к краю. Вид кривой блеска обусловленной</p>	<b>4</b>	<b>4</b>				<b>4</b>	

<p>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.</p>								
<p><i>Тема 3. Современные методы анализа кривых блеска и кривых лучевых скоростей ТДС</i></p> <p>Метод синтеза кривых блеска ТДС, содержащих звезды с тонкими атмосферами.</p> <p>Метод синтеза профилей линий и кривых лучевых скоростей ТДС с тонкими атмосферами.</p>	<b>4</b>	<b>2</b>					<b>2</b>	
<p><i>Тема 4. Обратные параметрические задачи в астрофизике.</i></p>	<b>4</b>	<b>2</b>					<b>2</b>	

<p>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.</p>		
<p><i>Тема 5. Методы определения масс релятивистских объектов.</i> Определение масс черных дыр и нейтронных звезд в рентгеновских двойных системах и в гравитационно-волновых системах.</p>	<b>4</b>	<b>2</b>
<p><i>Тема 6. ТДС с протяженными атмосферами. Звезды WR в двойных системах</i> Анализ кривых блеска ТДС с протяженными атмосферами в континууме.</p>	<b>4</b>	<b>2</b>

<p>Постановка задачи. Классическая и полуklassическая модели. Критерий единственности решения. Методы восстановления структуры звездных ветров звезд Вольфа-Райе в затменных WR+O двойных системах. Случай континуума и эмиссионных линий.</p>	
<p><i>Тема 7. Понятие о методах решения некорректных задач в астрофизике. Физика областей взаимодействия компонент ТДС.</i> 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</p>	<p><b>6</b>      <b>4</b>      <b>2</b></p>

астрофизических задачах. Структура ветров звезд Вольфа-Райе в двойных WR+O системах: область взаимодействия ветров и невозмущенный ветер звезды WR.								
<i>Тема 8. Эллиптические орбиты. Методы исследования внутренней структуры звезд-компонент ТДС Изучение вращения линии апсид ТДС. Учет эффектов общей теории относительности.</i>	<b>4</b>	<b>2</b>					<b>2</b>	
<i>Тема 9. Эволюция ТДС. ТДС на поздних стадиях эволюции Парадокс Алголя. Механизм «перемены ролей» компонент ТДС. Первичный и вторичный обмен масс. Различия в эволюции массивных и маломассивных ТДС. Типы поздних ТДС, их классификация и важнейшие</i>	<b>4</b>	<b>2</b>					<b>2</b>	

характеристики. Гравитационно-волновые ТДС и их характеристики.							
<i>Тема 10. Аккреция.</i> Аккреция – ее появление в астрономии, развитие и современное состояние проблемы (1940/50-2020гг.). Типы аккреции – сферическая, коническая, дисковая. Важность дисковой аккреции в астрономии, которая реализуется в ТДС, ядрах активных галактик, квазарах.	<b>4</b>	<b>2</b>				<b>2</b>	
<i>Тема 11. Космическая газодинамика</i> Основные уравнения космической газодинамики, которые описывают нестационарные аккреционные диски. Наличие турбулентности и магнитных полей как необходимое условие реализации дисковой аккреции. Физические	<b>4</b>	<b>2</b>				<b>2</b>	

неустойчивости, которые приводят к появлению турбулентности и генерации магнитных полей в аккреционных дисках. Магниторотационная неустойчивость Велихова-Чандрасекара и ее роль в аккреционных дисках.							
<i>Тема 12. Аккреционные диски</i> Стандартные и адвекционные аккреционные диски.	<b>4</b>	<b>2</b>				<b>2</b>	
<i>Тема 13. Электромагнитное излучение от аккреционных дисков.</i> Электромагнитное излучение от аккреционных дисков в приближении локального спектра черного тела. Роль Томсоновского и Комптоновского рассеяния в формировании наблюдаемого спектра от аккреционных	<b>4</b>	<b>2</b>				<b>2</b>	

дисков. Процессы многократного рассеяния фотонов на свободных, нерелятивистских электронах (обратный Комптон эффект и уравнение Компанейца).							
<i>Тема 14. Структура внутренних частей аккреционных дисков.</i> Структура внутренних частей аккреционных дисков и релятивистские эффекты вблизи нейтронных звезд и черных дыр (последняя устойчивая круговая орбита, траектории фотонов и т. д.).	<b>4</b>	<b>2</b>				<b>2</b>	
<i>Тема 15. Дисковая акреция.</i> Особенности дисковой акреции на замагниченные нейтронные звезды. Разрушение аккреционного диска дипольным магнитным полем звезды на больших расстояниях.	<b>4</b>	<b>2</b>				<b>2</b>	

Квази-сферическая акреция вещества с относительно небольшим моментом количества движения на замагниченные нейтронные звезды.							
<i>Тема 16. Нерешенные задачи</i> Нерешенные задачи дисковой и двух других типов акреции	<b>4</b>	<b>2</b>				<b>2</b>	
<b>Промежуточная аттестация: экзамен</b>	<b>4</b>					<b>4<sup>2</sup></b>	
<b>Итого</b>	<b>72</b>	<b>36</b>				<b>36</b>	

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

---

<sup>2</sup>Часы на проведение промежуточной аттестации выделяются из часов самостоятельной работы обучающегося

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

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

### ***Материалы промежуточной аттестации обучающихся***

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

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

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

---

***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

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. A.M.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.
5. Н.И. Шакура «Аккреционные процессы в астрофизике», Физматлит, 2016
6. Я.Б. Зельдович, С.И. Блинников, Н.И. Шакура «Физические основы строения и эволюции звезд», из-во МГУ, 1981

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.
6. Shakura N.I., Sunyaev R.A. 1973, A&A, 24, 337

- 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
  - 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.

*(приводится при необходимости)*

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