

**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:

**ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВАЯ АСТРОНОМИЯ**

---

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 член-корр. РАН Постнов Константин Александрович, 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**

Курс «Гравитационно-волновая астрономия» является дисциплиной по выбору на первом курсе магистратуры. Курс состоит из двух частей. В первой части выводятся линеаризованные уравнения ОТО А. Эйнштейна, рассматриваются принципы генерации гравитационных волн астрофизическими источниками. Во второй части излагаются принципы детектирования гравитационных волн наземными лазерными интерферометрами и приводятся результаты достижений гравитационно-волновой астрономии с 2015 года и обсуждаются основные источники гравитационных волн (сливающиеся компактные двойные системы, коллапсы сверхновых, монохроматическое излучение от быстровращающихся нейтронных звезд). Отдельно рассматриваются стохастические спектры гравитационных волн и принципы их детектирования методом пульсарного тайминга. Обсуждается роль современных гравитационно-волновых исследований в многоканальной астрономии.

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: основные современные научные достижения в профессиональной области; основные методы анализа и оценки современных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских задач, в том числе и в междисциплинарных областях; основные законы, теоретические модели и современные методы исследований и математического моделирования в области гравитационно-волновой астрономии.</p> <p>Уметь: проводить анализ литературных данных в рамках поставленной исследовательской (практической, образовательной) задачи, выявлять основные вопросы и проблемы, существующие в современной науке.;</p>

		<p>интерпретировать в рамках современных физических моделей данные наблюдений; использовать полученные знания для анализа результатов научных исследований и решения практических задач в области гравитационно-волновой астрономии.</p> <p>Владеть/Иметь опыт: навыками критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских, практических и образовательных задач в своей профессиональной области, в том числе в междисциплинарных областях; навыками самостоятельной работы; разработкой методов научного исследования для получения новых фундаментальных знаний в области гравитационно-волновой астрономии и способами применения этих знаний для создания прикладных технологий и решения практических задач.</p>
--	--	---

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) <i>Виды контактной работы, академические часы<sup>1</sup></i>			Всего			
		Занятия лекционного типа (лекции)	Семинары	Лабораторные занятия*				
<i>Tema 1.</i> Специальная теория относительности. Метрика Минковского. Кинематика СТО. Уравнения Эйлера-Лагранжа. Свободное движение. Безмассовые частицы. 3+1 расщепление.	4	2				2		
<i>Tema 2.</i> Метрика в слабом гравитационном поле. Локально-	4	2				2		

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

инерциальные (Лоренцевы) системы отсчета. Ортонормированный базис (тетрада). Координатный базис. Преобразования базисов.							
<i>Тема 3. Геодезические. Уравнения геодезических. Символы Кристоффеля. Сохраняющиеся величины вдоль геодезических. Векторы Киллинга. Энергия ГВ. Поток энергии в ГВ. Принципы детектирования ГВ.</i>	<b>6</b>	<b>3</b>				<b>3</b>	
<i>Тема 4. Линеаризованная гравитация. Метрика слабой гравитационной волны (ГВ). Поляризации ГВ. Энергия ГВ. Поток энергии в ГВ. Принципы детектирования ГВ.</i>	<b>6</b>	<b>3</b>				<b>3</b>	<b>опрос</b>
<i>Тема 5. Основы ОТО. Базисы и дуальные базисы. Метрический</i>	<b>4</b>	<b>2</b>				<b>2</b>	

тензор. Ковариантное дифференцирование. Свободно-падающие СО.							
<i>Тема 6.</i> Кривизна. Приливной характер гравитационных сил. Уравнение отклонения геодезических. Тензор Римана в координатном базисе и в свободно-падающей СО. Тензор Риччи. Уравнения Эйнштейна в вакууме.	<b>5</b>	<b>3</b>				<b>2</b>	
<i>Тема 7.</i> Линеаризованные уравнения Эйнштейна в вакууме. Лоренцева калибровка возмущений. Волновое уравнение для возмущений. Переход к ТТ-калибровка. Гравитационные волны.	<b>6</b>	<b>3</b>				<b>3</b>	
<i>Тема 8.</i> Источники кривизны. Тензор энергии-импульса и его свойства. Локальный закон сохранения энергии-импульса. Уравнения Эйнштейна.	<b>5</b>	<b>2</b>				<b>3</b>	

<i>Тема 9.</i> Излучение ГВ. Решение волнового уравнения с источником. Запаздывающие потенциалы.	<b>4</b>	<b>2</b>					<b>2</b>	
<i>Тема 10.</i> ГВ в дальней зоне. Мультипольное разложение. Квадрупольный формализм для источников ГВ.	<b>4</b>	<b>2</b>					<b>2</b>	
<i>Тема 11.</i> ГВ от двойных систем. Астрофизические источники ГВ.	<b>6</b>	<b>3</b>					<b>3</b>	<b>опрос</b>
<i>Тема 12.</i> Наземные ГВ- интерферометры. Принципы работы. Шумы. Принципы обнаружения ГВ- сигнала методом оптимальной фильтрации.	<b>6</b>	<b>3</b>					<b>3</b>	
<i>Тема 13.</i> Результаты работы ГВ- интерферометров с 2015 года. Сливающиеся двойные черные дыры, возможные каналы их образования. Стохастические ГВ.	<b>5</b>	<b>3</b>					<b>2</b>	

Регистрация методом пульсарного тайминга.							
<i>Тема</i> 14. Многоканальная астрономия. Регистрация электромагнитных сигналов от сливающихся двойных нейтронных звезд. Новейшие результаты и перспективы. Будущие наземные и космические детекторы ГВ.	<b>5</b>	<b>3</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:

Примеры заданий устного опроса:

1. Вывести уравнения свободного движения в СТО из вариационного принципа.
2. Вывести соотношения эффекта Доплера без применения преобразований Лоренца.
3. Записать координатные компоненты тетрады для диагональной метрики.
4. Оценить необходимую длину плеч ГВ-интерферометра для регистрации ГВ от двойных систем.

**Примеры заданий для промежуточной аттестации:**

1. Вывести свойства гравитационных волн в ТТ-калибровке из линеаризованных уравнений Эйнштейна в вакууме.
2. Получить ограничения на скорость распространения гравитационных волн из анализа задержки ЭМ сигнала по отношению к моменту слияния ГВ-источника на примере системы GW170817/GRB170817A.
3. Провести сравнительный анализ возможных астрофизических ГВ-источников для наземных и космических ГВ-интерферометров.

---

**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.;*
- *типовыe 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

- Thorne K, Blandford R. Modern Classical Physics. Princeton Univ. Press, 2018
- М.А. Шил, К.С. Торн «[Геометродинамика: нелинейная динамика искривлённого пространства-времени](#)» УФН 184 367–378 (2014)
- Д. Райтце «[Первые детектирования гравитационных волн, излучаемых при слияниях двойных чёрных дыр](#)» УФН 187 884–891 (2017)
- А.В. Тутуков, А.М. Черепашук «[Эволюция тесных двойных звёзд: теория и наблюдения](#)» 190 УФН 225–263 (2020)
- Многоканальная астрономия (под ред. А.М. Черепашку). Фрязино: Век-2, 20

• 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).