

**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

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора (индикаторов) достижения компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с индикаторами достижения компетенций
		<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					Самостоятельная работа обучающегося, академические часы	Форма текущего контроля успеваемости, наименование
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, академические часы <sup>1</sup>						
		Занятия лекционного типа (лекций)	Занятия семинарского типа			Всего		
Семинары	Лабораторные занятия*		Практические занятия*					
Тема 1. Специальная теория относительности. Метрика Минковского. Кинематика СТО. Уравнения Эйлера-Лагранжа. Свободное движение. Безмассовые частицы. 3+1 расщепление.	4	2					2	
Тема 2. 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.								
Тема 3. Геодезические. Уравнения геодезических. Символы Кристоффеля. Сохраняющиеся величины вдоль геодезических. Векторы Киллинга. Энергия ГВ. Поток энергии в ГВ. Принципы детектирования ГВ.	6	3					3	
Тема 4. Линеаризованная гравитация. Метрика слабой гравитационной волны (ГВ). Поляризации ГВ. Энергия ГВ. Поток энергии в ГВ. Принципы детектирования ГВ.	6	3					3	опрос
Тема 5. Основы ОТО. Базисы и дуальные базисы. Метрический	4	2					2	

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>	

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

Регистрация методом пульсарного тайминга.								
Тема 14. Многоканальная астрономия. Регистрация электромагнитных сигналов от сливающихся двойных нейтронных звезд. Новейшие результаты и перспективы. Будущие наземные и космические детекторы ГВ.	5	3					2	
Промежуточная аттестация: экзамен	4						4 <sup>2</sup>	
Итого	72	36					36	

\*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.;
- 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

- 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. Черепашука). 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).