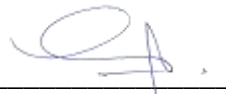


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова  
Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова в городе  
Сарове

**«УТВЕРЖДАЮ»**



Директор филиала МГУ в г.Сарове  
Член-корреспондент РАН В.В. Воеводин

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

**Наименование дисциплины:**

Общая теория относительности

---

**Уровень высшего образования:**

Магистратура

---

**Направление подготовки:**

03.04.02 Физика

---

**Направленность (профиль) ОПОП:**

Теоретическая физика

---

Квалификация «Магистр»

**Форма обучения:** Очная

---

Саров 2021 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика в редакции приказа по МГУ от 30 декабря 2020 г. №1366.

Разработчик (разработчики) программы.

д.ф.-м.н., профессор Кафедры теоретической физики Физического факультета МГУ Д.В. Гальцов

д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ОТФВЭ НИИЯФ МГУ И.П. Волобуев

к.ф.-м.н., старший научный сотрудник ОТФВЭ НИИЯФ МГУ М.Н. Смоляков

**1. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО:**

**Дисциплина «Общая теория относительности» реализуется в 2-м семестре магистратуры и является частью общенаучного блока вариативной части.**

**2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (если есть):**

Освоение следующих дисциплин: «Математический анализ», «Линейная алгебра», «Теория функции комплексной переменной».

*Например:*

*отсутствуют или*

*освоение дисциплины «\_\_\_\_\_» и т.д.*

**3. Результаты обучения по дисциплине (модулю):**

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

<b>Формируемые компетенции (код компетенции)</b>	<b>Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений в области теоретической физики в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1).</li></ul>	<p><b>ЗНАТЬ</b> основные законы и направления современных научных исследований в области теоретической физики.</p> <p><b>УМЕТЬ</b> на основе фундаментальных знаний в области теоретической физики, определять возможные направления научных исследований.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ</b> необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования области теоретической физики.</p>
<ul style="list-style-type: none"><li>Способность организовать и планировать физические исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области теоретической</li></ul>	<p><b>ЗНАТЬ</b> базовые принципы организации научных исследований с использованием информационных технологий, основные методики работы на современном научном оборудовании.</p> <p><b>УМЕТЬ</b> используя знания в области теоретической физики проводить научные исследования.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ</b></p>

<p>физики и решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования и информационных технологий (СПК-2).</p>	<p>навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области теоретической физики (СПК-3).</li> </ul>	<p><b>ЗНАТЬ</b> основные направления инновационного развития в области теоретической физики. <b>УМЕТЬ</b> проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области теоретической физики для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов. <b>ВЛАДЕТЬ</b> методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области теоретической физики.</p>

4. Объем дисциплины (модуля) составляет 2 з.е.

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

*Тема 1. Физические основы общей теории относительности.*

Ньютоновская теория гравитации. Принцип эквивалентности. Гравитационное поле как риманова метрика.

*Тема 2. Введение в математический аппарат ОТО.*

Дифференцируемые многообразия. Локальные координаты. Касательное и кокасательное пространства. Векторные поля и дифференциальные формы. Ассоциативные алгебры и алгебры Ли. Тензорные поля. Линейная связность и ковариантное дифференцирование. Параллельный перенос и геодезические. Риманова метрика. Риманова связность. Тензор кривизны Римана. Тетрадный формализм. Спинорная связность. Изометрии и уравнения Киллинга.

*Тема 3. Движение частиц и волновые уравнения в гравитационном поле.*

Расстояния и промежутки времени. Движение частицы в гравитационном поле. Слабое гравитационное поле, ньютоновский предел. Распространение света в постоянном гравитационном поле. Гравитационное смещение спектральных линий. Волновые уравнения для спинов 0,  $\frac{1}{2}$ , 1. Векторы и тензоры Киллинга, законы сохранения и разделение переменных.

*Тема 4. Уравнения гравитационного поля.*

Уравнения Эйнштейна и вариационный принцип. Лагранжиан гравитационного поля. Тензор энергии-импульса материи. Космологическая постоянная. Линеаризованная теория и ньютоновский предел. Законы сохранения в ОТО. Гравитационные волны. Плоские гравитационные волны, поляризация. Излучение гравитационных волн. Регистрация гравитационных волн и эксперименты по их поиску.

*Тема 5. Центральное-симметричное гравитационное поле.*

Решение Шварцшильда. Движение частиц в поле Шварцшильда. Смещение перигелия орбит. Распространение света в поле Шварцшильда. Гравитационное отклонение световых лучей. Фотонная сфера и сильное гравитационное линзирование. Радиальное движение в центрально-симметричном гравитационном поле. Черные дыры. Гравитационный коллапс.

*Тема 6. Физика черных дыр.*

Основы теории черных дыр. Классификация черных дыр, теоремы единственности. Метрика Керра, эргосфера, процесс Пенроуза. Разделение переменных в уравнениях геодезических и в волновых уравнениях. Супerrрадиация. Нормальные моды. Тепловое излучение Хокинга. Теоремы о горизонтах. Термодинамика черных дыр. Принцип космической цензуры.

*Тема 7. Космологические решения в ОТО.*

Метрика Фридмана-Робертсона-Уокера. Закрытая и открытая космологические модели. Теория Большого взрыва. Космологическая инфляция. Основные этапы эволюции Вселенной. Темная материя и темная энергия.

*Тема 8. Скалярно-тензорные теории гравитации.*

Теории с конформным скалярным полем. Теории со связью скаляра с кривизной через производные. Дисформные преобразования. Понятие о массивной гравитации.

*Тема 9. Теории гравитации в пространстве-времени с дополнительными измерениями.*

Теория Калуцы-Клейна. Физические степени свободы в линейном приближении. Нулевые моды. Редукция действия. Проблема электрического заряда. Браны и решение Рэндалл-Сундрума. Фундаментальный энергетический масштаб пятимерной теории и его связь с массой Планка. Стабилизация размера дополнительного измерения. Калуца-клейновские возбуждения пятимерного гравитационного поля.

**5.1.** Структура дисциплины (модуля) по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий (в строгом соответствии с учебным планом)

Наименование разделов и тем дисциплины (модуля),	Номинальные трудозатраты обучающегося		часов	экс-пери-менты*
	Контактная работа	Самостоятельная		

Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	(работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, академические часы		работа обучающегося, академические часы		(наименование)
	Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа			
Тема 1. Физические основы общей теории относительности.	1	1	3	5	
Тема 2. Введение в математический аппарат ОТО.	2	2	4	8	
Тема 3. Движение частиц и волновые уравнения в гравитационном поле.	2	2	4	8	
Тема 4. Уравнения гравитационного поля.	2	2	4	8	
Тема 5. Центральное-симметричное гравитационное поле.	2	2	4	8	
Тема 6. Физика черных дыр.	2	2	4	8	
Тема 7. Космологические решения в ОТО.	2	2	4	8	
Тема 8. Скалярно-тензорные теории гравитации.	2	2	4	8	
Тема 9. Теории гравитации в пространстве-времени с дополнительными измерениями.	2	2	3	7	
Другие виды самостоятельной работы (при наличии): <i>Например,</i> <i>Курсовая работа</i> <i>Творческая работа (эссе)</i> ...	—	—			—
Промежуточная аттестация (зачет(ы) и			4	4	—

(или) экзамен(ы))					—
<b>Итого</b>	17	17	38	<b>72</b>	—

*\* Примеры форм текущего контроля успеваемости:  
опрос;  
тестирование;  
контрольная работа;  
коллоквиум;  
реферат и и.д.*

## 5.2. Содержание разделов (тем) дисциплины

№ п/п	Наименование разделов (тем) дисциплины	Содержание разделов (тем) дисциплин
1.	Тема 1. Физические основы общей теории относительности.	Ньютоновская теория гравитации. Принцип эквивалентности. Гравитационное поле как риманова метрика.
2.	Тема 2. Введение в математический аппарат ОТО.	Дифференцируемые многообразия. Локальные координаты. Касательное и кокасательное пространства. Векторные поля и дифференциальные формы. Ассоциативные алгебры и алгебры Ли. Тензорные поля. Линейная связность и ковариантное дифференцирование. Параллельный перенос и геодезические. Риманова метрика. Риманова связность. Тензор кривизны Римана. Тетрадный формализм. Спинорная связность. Изометрии и уравнения Киллинга.
3.	Тема 3. Движение частиц и волновые уравнения в гравитационном поле.	Расстояния и промежутки времени. Движение частицы в гравитационном поле. Слабое гравитационное поле, ньютоновский предел. Распространение света в постоянном гравитационном поле. Гравитационное смещение спектральных линий. Волновые уравнения для спинов 0, $\frac{1}{2}$ , 1. Векторы и тензоры Киллинга, законы сохранения и разделение переменных.
4.	Тема 4. Уравнения гравитационного поля.	Уравнения Эйнштейна и вариационный принцип. Лагранжиан гравитационного поля. Тензор энергии-импульса материи. Космологическая постоянная. Линеаризованная теория и ньютоновский предел. Законы

		сохранения в ОТО. Гравитационные волны. Плоские гравитационные волны, поляризация. Излучение гравитационных волн. Регистрация гравитационных волн и эксперименты по их поиску.
5.	Тема 5. Центральнo-симметричное гравитационное поле.	Решение Шварцшильда. Движение частиц в поле Шварцшильда. Смещение перигелия орбит. Распространение света в поле Шварцшильда. Гравитационное отклонение световых лучей. Фотонная сфера и сильное гравитационное линзирование. Радиальное движение в центрально-симметричном гравитационном поле. Черные дыры. Гравитационный коллапс.
6.	Тема 6. Физика черных дыр.	Основы теории черных дыр. Классификация черных дыр, теоремы единственности. Метрика Керра, эргосфера, процесс Пенроуза. Разделение переменных в уравнениях геодезических и в волновых уравнениях. Суперрадиация. Нормальные моды. Тепловое излучение Хокинга. Теоремы о горизонтах. Термодинамика черных дыр. Принцип космической цензуры.
7.	Тема 7. Космологические решения в ОТО.	Метрика Фридмана-Робертсона-Уокера. Закрытая и открытая космологические модели. Теория Большого взрыва. Космологическая инфляция. Основные этапы эволюции Вселенной. Темная материя и темная энергия.
8.	Тема 8. Скалярно-тензорные теории гравитации.	Теории с конформным скалярным полем. Теории со связью скаляра с кривизной через производные. Дисформные преобразования. Понятие о массивной гравитации.
9.	Тема 9. Теории гравитации в пространстве-времени с дополнительными измерениями.	Теория Калуцы-Клейна. Физические степени свободы в линейном приближении. Нулевые моды. Редукция действия. Проблема электрического заряда. Браны и решение Рэндалл-Сундрума. Фундаментальный энергетический масштаб пятимерной теории и его связь с массой Планка. Стабилизация размера дополнительного измерения. Калуца-Клейновские возбуждения пятимерного гравитационного поля.



6. Фонд оценочных средств (ФОС, оценочные и методические материалы) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
<b>Оценочные средства текущего контроля</b>		
Тематический опрос (в форме ответов на 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, 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>		
Письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к экзамену

Собеседование	Средство, позволяющее получить экспертную оценку знаний, умений и навыков для оценивания и анализа различных фактов и явлений в своей профессиональной области.	Требования к порядку проведения собеседования
---------------	---	---

6.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости, критерии и шкалы оценивания (в отсутствие утвержденных соответствующих локальных нормативных актов на факультете)

В локальных координатах показать, что коммутатор двух векторных полей является векторным полем.

Вычислить компоненты 2-формы напряженности электромагнитного поля  $F = dA$ .

Найти метрику трехмерного пространства по метрике пространства-времени.

Из принципа наименьшего действия вывести уравнения движения пробной частицы в гравитационном поле.

Исходя из нерелятивистского действия для точечной частицы в гравитационном поле найти выражение для метрики в ньютоновском пределе.

Вывести формулу для эффекта гравитационного замедления времени в ньютоновском пределе.

Найти тензор энергии-импульса сплошной среды в локально галилеевой системе координат.

Найти калибровочные преобразования тензора возмущения гравитационного поля в линеаризованной теории.

Показать, что в линеаризованной теории на тензор возмущения гравитационного поля можно наложить калибровочное условие Лоренца.

Доказать, что в метрике Шварцшильда квадрат полного момента количества движения является интегралом движения для любой геодезической.

Выведите уравнение для траектории световых лучей в метрике Шварцшильда.

Покажите, что классический электрон не может быть черной дырой Керра-Ньюмена, сравнив их значения заряда, массы и момента количества движения.

Доказать, что если пространство-время не содержит материи и является всюду изотропным, то оно представляет собой плоское пространство Минковского.

Для решения Рэндалл-Сундрума найдите связь фундаментального пятимерного энергетического масштаба с массой Планка для наблюдателя на обеих бранах.

6.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине (модулю), критерии и шкалы оценивания (в отсутствие утвержденных соответствующих локальных нормативных актов на факультете)

В локальных координатах показать, что коммутатор двух векторных полей является векторным полем.

Вычислить компоненты 2-формы напряженности электромагнитного поля  $F = dA$ .

Найти метрику трехмерного пространства по метрике пространства-времени.

Из принципа наименьшего действия вывести уравнения движения пробной частицы в гравитационном поле.

Исходя из нерелятивистского действия для точечной частицы в гравитационном поле найти выражение для метрики в ньютоновском пределе.

Вывести формулу для эффекта гравитационного замедления времени в ньютоновском пределе.  
Найти тензор энергии-импульса сплошной среды в локально галилеевой системе координат.  
Найти калибровочные преобразования тензора возмущения гравитационного поля в линеаризованной теории.  
Показать, что в линеаризованной теории на тензор возмущения гравитационного поля можно наложить калибровочное условие Лоренца.  
Доказать, что в метрике Шварцшильда квадрат полного момента количества движения является интегралом движения для любой геодезической.  
Выведите уравнение для траектории световых лучей в метрике Шварцшильда.  
Покажите, что классический электрон не может быть черной дырой Керра-Ньюмена, сравнив их значения заряда, массы и момента количества движения.  
Доказать, что если пространство-время не содержит материи и является всюду изотропным, то оно представляет собой плоское пространство Минковского.  
Для решения Рэндалл-Сундрума найдите связь фундаментального пятимерного энергетического масштаба с массой Планка для наблюдателей на обеих бранах.

## 7. Ресурсное обеспечение:

### 7.1. Перечень основной и дополнительной литературы

#### Основная литература:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том 2. Теория поля. М.:Физматлит, 2018. (<https://znanium.com/>)
2. Фок В.А. Теория пространства, времени и тяготения. М.: Физматгиз, 1961.
3. Дирак П.М.А. Общая теория относительности. М.: Атомиздат, 1978.
4. Вейнберг С. Гравитация и космология. М.: Мир, 1975.
5. Гальцов Д.В. Частицы и поля в окрестности черных дыр. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1986.
6. Абрамов А.А. Введение в тензорный анализ и риманову геометрию. М.: Либроком, 2009.
7. Волобуев И.П., Кубышин Ю.А. Дифференциальная геометрия и алгебры Ли и их приложения в теории поля. М.: URSS, 2020.
8. G.Cjmperey. Advanced Lectures on General Relativity. (Lecture Notes in Physics, V. 984). Springer, 2021 ([www.springer.com/gp/book/9783030042592](http://www.springer.com/gp/book/9783030042592)).
9. М. Hall, General Relativity: An Introduction to Black Holes, Gravitational Waves, and Cosmology. Morgan & Claypool Publishers, 2018 ([iopscience.iop.org/book/978-1-6817-4885-6/](http://iopscience.iop.org/book/978-1-6817-4885-6/))

#### Дополнительная литература:

1. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация. Том 1. М.: Мир, 1977.
2. Горбунов Д.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. М.: URSS, 2020.
3. Горбунов Д.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной: Космологические возмущения. М.: URSS, 2020.
4. Иваненко Д.Д., Сарданашвили Г.А. Гравитация. М.: Изд-во ЛКИ, 2012.

5. Дубровин Б.А., Новиков С.П., Фоменко А.Т. Современная геометрия. М.: Наука, 1986.
6. P.A. Hogan, D. Pützfeld, *Frontiers in General Relativity*. . (Lecture Notes in Physics, V. 952). Springer, 2019 ([www.springer.com/gp/book/9783030693695](http://www.springer.com/gp/book/9783030693695)).
7. R. Dick. *Special and General Relativity. An introduction to spacetime and gravitation*. Morgan & Claypool Publishers, 2019 ([iopscience.iop.org/book/978-1-64327-380-8](http://iopscience.iop.org/book/978-1-64327-380-8))

Перечень лицензионного программного обеспечения, в том числе отечественного производства  
При реализации дисциплины может быть использовано следующее программное обеспечение:

1. Программный продукт Red Hat Enterprise Linux Server for HPC Compute Node for Power, LE, Self-support 4 шт. №5540331
2. Программный продукт Red Hat Enterprise Linux Server for HPC Head Node for Power, LE, Standard 1 шт. №5540332
3. Операционная система SUSE Linux Enterprise Server 11 SP4 for x86\_64 16 шт.
4. Операционная система Red Hat Enterprise Linux Server 5.0 for x86\_64 14шт.
5. Операционная система SUSE Linux Enterprise Server 10 SP3 for ppc64 7 шт.
6. Операционная система Ubuntu 18.04.
7. Программное обеспечение для виртуализации Oracle VM VirtualBox
8. Операционная система ALTLinuxMATEStarterkit 9 лицензияGPL
9. Программный продукт JetBrains IntelliJ IDEA Community Edition Free Educational Licenses
10. Программный продукт JetBrains PyCharm Community Edition Free Educational Licenses
11. Программный продукт JetBrains CLion Community Edition Free Educational Licenses
12. Программный продукт UPPAAL (<http://www.uppaal.org/>) академическая лицензия
13. Программный продукт Java 8 (64-bit) Oracle Corporation
14. Программный продукт Java SE Development Kit 8(64-bit) Oracle Corporation
15. Программный продукт NetBeans IDE 8.2 NetBeans.org
16. Программный продукт Dev-C++ Bloodshed Software
17. Программный продукт CodeBlocks The Code::Blocks Team
18. Программный продукт Free Pascal 3.0.0 Free Pascal Team
19. Программный продукт Python 3.5.1 (64-bit) Python Software Foundation

20. Программный продукт R for Windows 3.2.2 R Core Team
21. Программный продукт Haskell Platform 7.10.3 Haskell.org
22. Операционная система Microsoft Windows 7 корпоративная академическая лицензия
23. Операционная система Microsoft Windows 10 Education академическая лицензия
24. Программный продукт Microsoft Project Professional 2013 академическая лицензия
25. Программный продукт Microsoft Visio Professional 2013 академическая лицензия
26. Программный продукт Microsoft Visual Studio Professional 2013 - RUS [Русский (Россия)] академическая лицензия

Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

1. <http://www.edu.ru> – портал Министерства образования и науки РФ
2. <http://www.ict.edu.ru> – система федеральных образовательных порталов «ИКТ в образовании»
3. <http://www.openet.ru> - Российский портал открытого образования
4. <http://www.mon.gov.ru> - Министерство образования и науки Российской Федерации
5. <http://www.fasi.gov.ru> - Федеральное агентство по науке и инновациям

7.2. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

7.3. Описание материально-технического обеспечения.

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

8. Соответствие результатов обучения по данному элементу ОПОП результатам освоения ОПОП указано в Общей характеристике ОПОП.