

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова**

Кафедра теоретической физики

УТВЕРЖДАЮ

Декан физического факультета  
  
(подпись) И.С. Огнев

23 мая 2023 года

**Рабочая программа дисциплины**  
**«Введение в общую теорию относительности»**

Направление подготовки  
03.04.02 Физика

Направленность (профиль)  
«Теоретическая физика»

Форма обучения  
очная

Программа одобрена  
на заседании кафедры

от «17» апреля 2023 года, протокол № 8

Программа одобрена НМК  
физического факультета

протокол № 5 от «25» апреля 2023 года

Ярославль

### 1. Цели освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины «Введение в общую теорию относительности» является приобретение студентами знаний по базовым разделам общей теории относительности и умение использовать полученные знания для физического анализа имеющихся экспериментальных тестов ОТО.

### 2. Место дисциплины в структуре ООП

Дисциплина «Введение в общую теорию относительности» относится к части Блока 1, формируемой участниками образовательных отношений.

Дисциплина «Введение в общую теорию относительности» расширяет математический фундамент студентов, углубляет физическое понимание явлений, необходимые для успешного освоения дисциплин магистерской программы «Теоретическая физика», и является логическим продолжением дисциплин «Электродинамика», «Релятивистская квантовая механика» и «Введение в релятивистскую теорию классического поля».

Для овладения данной дисциплиной студенты должны знать основы дисциплин «Линейная алгебра», «Векторный и тензорный анализ», «Методы математической физики» и «Введение в релятивистскую теорию классического поля».

### 3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ООП

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих элементов компетенций в соответствии с ФГОС ВО, ОП ВО и приобретения следующих знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности:

Формируемая компетенция (код и формулировка)	Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)	Перечень планируемых результатов обучения
<b>Профессиональные компетенции</b>		
<b>ПК-1</b> Способен осуществлять научно-исследовательскую деятельность по решению комплексных фундаментальных задач физики	<b>ИД-ПК-1_2</b> Знает современные теории и модели физики	<b>Знать</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• постулаты, лежащие в основе общей теории относительности (ОТО);</li><li>• основные наблюдаемые следствия ОТО;</li><li>• метрику сферически-симметричного распределения материи;</li><li>• общие свойства движения пробной частицы в метрике Шварцшильда;</li><li>• метрику однородного изотропного распределения материи.</li></ul>
	<b>ИД-ПК-1_3</b> Участвует в проведении научных исследований по заданной тематике	<b>Уметь</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• получать уравнения Эйнштейна в пределе слабого гравитационного поля;</li><li>• вычислять основные наблюдательные эффекты ОТО;</li><li>• вычислять темп расширения Вселенной для пылевой материи и темной энергии.</li></ul> <b>Владеть навыками</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• тензорного исчисления в искривленном пространстве-времени;</li><li>• применения методов общей теории</li></ul>

		относительности для описания гравитации; <ul style="list-style-type: none"> <li>использования полученных знаний о современной космологии в физике частиц.</li> </ul>
--	--	---

#### 4. Структура и содержание дисциплины «Введение в общую теорию относительности»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетные единицы, 108 акад. часов.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	С е м е с т р	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов, и их трудоемкость (в академических часах)						Формы текущего контроля успеваемости  Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
			<b>Контактная работа</b>						
			лекц ии	прак тиче ские	лабо ра торн ые	КСР	а ттес та цион ные ис пы та ния	сам ост оят ель ная рабо та	
1	Элементы векторного анализа	2	4	4				5	Задания для самостоятельной работы
2	Общая теория относительности (ОТО)	2	4	4		1		5	Задания для самостоятельной работы
3	Наблюдательные проявления ОТО	2	4	4		1		6	Задания для самостоятельной работы
4	Метрика Шварцшильда	2	4	4		1		6	Задания для самостоятельной работы
5	Элементы современной	2	4	4		1		6	Задания для самостоятельной работы

	КОСМОЛОГИИ								
					2	0,5	33,5	Экзамен	
	<b>Всего</b>		<b>20</b>	<b>20</b>		<b>6</b>	<b>0,5</b>	<b>61,5</b>	

### Содержание разделов дисциплины:

#### 1. Элементы векторного анализа.

Криволинейные координаты. Метрический тензор. Скаляры, векторы и тензоры в общей теории относительности и законы их преобразования. Физическое расстояние и временные интервалы в искривленном пространстве-времени. Ковариантное дифференцирование. Символы Кристоффеля. Тензор кривизны.

#### 2. Общая теория относительности.

Гравитация в нерелятивистской физике. Гравитационное поле в релятивистской механике. Уравнения Эйнштейна. Тензор энергии-импульса. Действие для гравитационного поля. Синхронная система отсчета. Уравнения Эйнштейна в приближении слабого гравитационного поля.

#### 3. Наблюдательные проявления ОТО.

Закон Ньютона. Гравитационное красное смещение. Отклонение света массивными телами. Смещение перигелия Меркурия. Слабые гравитационные волны. Излучение гравитационных волн.

#### 4. Метрика Шварцшильда.

Центрально-симметричное гравитационное поле. Сферически-симметричное решение уравнения Эйнштейна. Движение пробных частиц в центрально-симметричном гравитационном поле. Гравитационное поле вдали от системы тел.

#### 5. Элементы современной космологии.

Изотропное пространство. Закрытая и открытая изотропные модели. Метрика Фридмана–Робертсона–Уокера. Уравнения Фридмана. Решение для пылевой материи. Решение уравнения Фридмана для темной энергии.

### 5. Образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

**Вводная лекция** – дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Студенты знакомятся с назначением и задачами курса, его ролью и местом в системе учебных дисциплин и в системе подготовки в целом. Дается краткий обзор курса, история развития науки и практики, достижения в этой сфере, имена известных ученых, излагаются перспективные направления исследований. На этой лекции высказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой учебно-методической литературы.

**Академическая лекция** (или лекция общего курса) – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Требования к академической лекции: современный научный уровень и насыщенная информативность, убедительная аргументация, доступная и понятная речь, четкая структура и логика, наличие ярких примеров, научных доказательств, обоснований, фактов.

**Практическое занятие** – занятие, посвященное освоению конкретных умений и

навыков и закреплению полученных на лекции знаний.

**6. Перечень лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения, используемого при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются: для формирования материалов для текущего контроля успеваемости и проведения промежуточной аттестации, для формирования методических материалов по дисциплине:

- программы Microsoft Office;
- издательская система LaTeX;
- Adobe Acrobat Reader.

**7. Перечень современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (при необходимости)**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

1. Автоматизированная библиотечно-информационная система «БУКИ-NEXT»  
[http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_find.php](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php)

**8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (при необходимости), рекомендуемых для освоения дисциплины**

**а) основная литература:**

1. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Т. II. Теория поля: Учеб. пособ.: для вузов. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 536 с.  
<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN5922100564.html>
2. Вергелес С. Н. Теоретическая физика. Общая теория относительности : учебник для вузов / С. Н. Вергелес. — М. : Издательство Юрайт, 2022. — 190 с.  
<https://urait.ru/bcode/491741>
3. Дирак П. А. М. Общая теория относительности – М. : Атомиздат, 1978. - 65 с.  
[https://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=1472821&cat\\_cd=YARSU](https://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=1472821&cat_cd=YARSU)

**б) дополнительная литература:**

1. Бескин, В. С. Гравитация и астрофизика / В. С. Бескин – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2009. - 160 с. <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922110549.html>
2. С. И. Блинников. Основы релятивистской астрофизики: учебное пособие для вузов. — М. : Издательство Юрайт, 2022. — 221 с. <https://urait.ru/bcode/495791>
3. Рубаков, В. А. Актуальные вопросы космологии : курс лекций / В. А. Рубаков. - Вып. 6. – М. : Издательский дом МЭИ, 2015. - 272 с.  
<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785383009376.html>

**9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине включает в свой состав специальные помещения:

- учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа и практических занятий (семинаров);
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций,

- учебные аудитории для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы;
- помещения для хранения и профилактического обслуживания технических средств обучения.

Специальные помещения укомплектованы средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Для проведения занятий лекционного типа предлагаются наборы демонстрационного оборудования и учебно-наглядных пособий, хранящиеся на электронных носителях и обеспечивающие тематические иллюстрации, соответствующие рабочим программам дисциплин.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду организации.

Число посадочных мест в лекционной аудитории больше либо равно списочному составу потока, а в аудитории для практических занятий (семинаров) – списочному составу группы обучающихся.

Автор:

Доцент кафедры теоретической физики, к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_  
(подпись)

М.В. Чистяков

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины  
«Введение в общую теорию относительности»**

**Фонд оценочных средств  
для проведения текущей и промежуточной аттестации студентов  
по дисциплине**

**1. Типовые контрольные задания или иные материалы,  
необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности,  
характеризующих этапы формирования компетенций**

**1.1 Контрольные задания и иные материалы,  
используемые в процессе текущей аттестации**

**Задания по темам №1-5:**

Задачи и упражнения из глав X-XIV книги:

Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Т. II. Теория поля: Учеб. пособ.: Для вузов. /  
Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 536 с.

**1.2 Список вопросов к экзамену**

1. Гравитационное поле в нерелятивистской механике.
2. Криволинейные координаты и системы криволинейных координат. Метрический тензор.
3. Скаляры, векторы и тензоры в общей теории относительности и законы их преобразования.
4. Физическое расстояние и временные интервалы в искривленном пространстве-времени.
5. Ковариантное дифференцирование. Символы Кристоффеля.
6. Тензор кривизны.
7. Гравитационное поле в релятивистской механике. Уравнения Эйнштейна. Тензор энергии-импульса.
8. Действие для гравитационного поля.
9. Синхронная система отсчета.
10. Уравнения Эйнштейна в приближении слабого гравитационного поля.
11. Закон Ньютона.
12. Гравитационное красное смещение.
13. Отклонение света массивными телами.
14. Смещение перигелия Меркурия.
15. Слабые гравитационные волны.
16. Излучение гравитационных волн.
17. Центральное-симметричное гравитационное поле. Сферически-симметричное решение уравнения Эйнштейна.
18. Движение безмассовой частицы в центральное-симметричном гравитационном поле.
19. Движение массивной частицы в центральное-симметричном гравитационном поле.
20. Гравитационное поле вдали от системы тел.
21. Изотропное пространство. Закрытая и открытая изотропные модели.
22. Метрика Фридмана–Робертсона–Уокера. Уравнения Фридмана.
23. Решение для пылевой материи.
24. Решение уравнения Фридмана для темной энергии.

### 1.3 Правила выставления оценки на экзамене.

В экзаменационный билет включается два теоретических вопроса. На подготовку к ответу дается не менее 1 часа.

По итогам экзамена выставляется одна из оценок: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно».

**Оценка «Отлично»** выставляется студенту, который демонстрирует глубокое и полное владение материалом; осуществляет межпредметные связи; умеет связывать теорию с практикой. Студент дает развернутые, полные и четкие ответы на вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы, соблюдает логическую последовательность при изложении материала. Грамотно использует введенную терминологию.

**Оценка «Хорошо»** выставляется студенту, ответ которого на экзамене в целом соответствуют указанным выше критериям, но отличается меньшей обстоятельностью, глубиной, обоснованностью и полнотой. В ответе имеют место отдельные неточности (несущественные ошибки), которые исправляются самим студентом после дополнительных и (или) уточняющих вопросов экзаменатора.

**Оценка «Удовлетворительно»** выставляется студенту, который дает недостаточно полные и последовательные ответы на вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы, но при этом демонстрирует умение выделить существенные и несущественные признаки и установить причинно-следственные связи. Ответы излагаются с использованием введенных терминов, но при этом допускаются ошибки в определении и раскрытии некоторых основных понятий, формулировке положений, которые студент затрудняется исправить самостоятельно. При аргументации ответа студент не обосновывает свои суждения. На часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

**Оценка «Неудовлетворительно»** выставляется студенту, который демонстрирует разрозненные, бессистемные знания; беспорядочно и неуверенно излагает материал; не умеет выделять главное и второстепенное, не умеет соединять теоретические положения с практикой, не устанавливает межпредметные связи; допускает грубые ошибки при определении сущности раскрываемых понятий, явлений, вследствие непонимания их существенных и несущественных признаков и связей; дает неполные ответы, логика и последовательность изложения которых имеют существенные и принципиальные нарушения, в ответах отсутствуют выводы. Дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора не приводят к коррекции ответов студента. На основную часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

Оценка «Неудовлетворительно» выставляется также студенту, который взял экзаменационный билет, но отвечать отказался.

## **Приложение № 2 к рабочей программе дисциплины «Введение в общую теорию относительности»**

### **Методические указания для студентов по освоению дисциплины**

Основной формой изложения учебного материала по дисциплине «Введение в общую теорию относительности» являются лекции. Это связано с тем, что в основе дисциплины лежит особый математический аппарат, с помощью которого решаются довольно сложные и громоздкие задачи. По всем темам предусмотрены практические занятия, на которых происходит закрепление лекционного материала путем применения его к конкретным задачам и отработка навыков работы с аппаратом математической физики.

Для успешного освоения дисциплины важно решение достаточно большого количества задач, как в аудитории, так и самостоятельно в качестве домашних заданий. Примеры решения задач разбираются на лекциях и практических занятиях. Основная цель решения задач – помочь усвоить фундаментальные понятия и основы математической физики. Для решения всех задач необходимо знать и понимать лекционный материал. Поэтому в процессе изучения дисциплины рекомендуется регулярное повторение пройденного лекционного материала. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо дома еще раз прорабатывать и при необходимости дополнять информацией, полученной на практических занятиях или из учебной литературы.

Большое внимание должно быть уделено выполнению домашней работы. В качестве заданий для самостоятельной работы дома студентам предлагаются задачи, аналогичные разобранным на лекциях и практических занятиях или немного более сложные, которые являются результатом объединения нескольких базовых задач.

В конце семестра изучения дисциплины студенты сдают экзамен. Экзамен принимается по экзаменационным билетам, каждый из которых включает в себя два теоретических вопроса. На самостоятельную подготовку к экзамену выделяется три дня, во время подготовки к экзамену предусмотрена групповая консультация.

Освоить вопросы, излагаемые в процессе изучения дисциплины «Введение в общую теорию относительности» самостоятельно студенту крайне сложно. Это связано со сложностью изучаемого материала и большим объемом курса. Поэтому посещение всех аудиторных занятий является совершенно необходимым. Без упорных и регулярных занятий в течение семестра сдать зачет по итогам изучения дисциплины студенту практически невозможно.