

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования "Пермский
государственный национальный исследовательский
университет"**

Кафедра теоретической физики

Авторы-составители: **Голдобин Денис Сергеевич
Циберкин Кирилл Борисович
Демин Виталий Анатольевич**

Рабочая программа дисциплины
ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ
Код УМК 62007

Утверждено
Протокол №6
от «08» июня 2020 г.

Пермь, 2020

1. Наименование дисциплины

Общая теория относительности

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина входит в вариативную часть Блока « Б.1 » образовательной программы по направлениям подготовки (специальностям):

Направление: **03.03.02** Физика

направленность Фундаментальная физика

3. Планируемые результаты обучения по дисциплине

В результате освоения дисциплины **Общая теория относительности** у обучающегося должны быть сформированы следующие компетенции:

03.03.02 Физика (направленность : Фундаментальная физика)

ОПК.7 способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач

ПК.1 способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин

4. Объем и содержание дисциплины

Направления подготовки	03.03.02 Физика (направленность: Фундаментальная физика)
форма обучения	очная
№№ триместров, выделенных для изучения дисциплины	11
Объем дисциплины (з.е.)	4
Объем дисциплины (ак.час.)	144
Контактная работа с преподавателем (ак.час.), в том числе:	56
Проведение лекционных занятий	28
Проведение практических занятий, семинаров	28
Самостоятельная работа (ак.час.)	88
Формы текущего контроля	Входное тестирование (1) Итоговое контрольное мероприятие (1) Письменное контрольное мероприятие (2)
Формы промежуточной аттестации	Экзамен (11 триместр)

5. Аннотированное описание содержания разделов и тем дисциплины

Общая теория относительности. Первый семестр

Риманова геометрия

Гравитационные поля. Пропорциональность инертной и гравитационной масс. Принцип эквивалентности. Метрический тензор. Криволинейные координаты. Ко- и контравариантный 4-вектор. Скалярное произведение. Ко- и контравариантный тензор, смешанный тензор. Единичный 4-тензор. Взаимно обратные тензоры. Дифференциалы 4-объема, поверхности. Интегральные теоремы в криволинейных координатах. Измерение расстояний и промежутков времени. Собственное время, его связь с мировым временем. Ковариантное дифференцирование. Параллельный перенос вектора. Символы Кристоффеля. Тензор кривизны. Тензор кривизны Римана. Свойства тензора кривизны. Тождество Бианки. Упрощение тензора Римана. Тензор Риччи. Скалярная кривизна.

Уравнения гравитационного поля

Действие для гравитационного поля. Действие для гравитационного поля и скалярная кривизна. Вариация действия для гравитационного поля. Тензор энергии-импульса. Действие для материи. Приращение компонент метрического тензора при преобразовании координат. Уравнения Киллинга. Вариация действия для вещества. Тензор энергии-импульса. Уравнения Эйнштейна. Разные формы записи уравнений Эйнштейна. Нелинейность уравнений. Синхронная система отсчета.

Движение частицы в гравитационном поле

Движение материальной частицы. Уравнения движения. Геодезические линии. 4-сила. Уравнение Гамильтона-Якоби для частицы в гравитационном поле. Распространение света. Уравнение эйконала в гравитационном поле. Связь метрического тензора и гравитационного потенциала. Постоянное гравитационное поле. Статическое поле. Стационарные поля. Гравитационное замедление хода часов. Гравитационное красное смещение.

Поля тяготеющих тел

Закон Ньютона как предельный случай уравнений поля. Центральное-симметричное гравитационное поле. Квадрат интервала. R- и T-области. Вычисление символов Кристоффеля. Тензор Риччи. Гравитационный радиус. Решение Шварцшильда. Замедление хода часов. Инерциальное ускорение в поле Шварцшильда. Радиальное движение фотонов. Красное смещение. Радиальное движение массивных частиц. Закон свободного падения. Радиальное движение с точки зрения удаленного и сопутствующего наблюдателя. Время падения. Гравитационный коллапс. Нерадиальное движение. Фотонная сфера. Устойчивость орбит. Решение Керра. Горизонт событий. Эффект Унру и предел статичности. Эргосфера.

Релятивистская космология

Космологический постулат. Синхронная система отсчета. Линейный элемент Робертсона-Уокера. Метрика однородных и изотропных космологических моделей. Вычисление символов Кристоффеля. Вычисление компонент тензора Риччи. Уравнения Фридмана. Закрытая пылевая Вселенная. Дуговое время. Время существования Вселенной. Горизонт событий. Закрытая радиационно-доминированная Вселенная, ее время существования. Сохранение знака кривизны в ходе расширения Вселенной. Плоское сопутствующее пространство. Открытые модели. Инфляционная стадия. Отрицательное давление. Экспоненциальное расширение.

6. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Освоение дисциплины требует систематического изучения всех тем в той последовательности, в какой они указаны в рабочей программе.

Основными видами учебной работы являются аудиторские занятия. Их цель - расширить базовые знания обучающихся по осваиваемой дисциплине и систему теоретических ориентиров для последующего более глубокого освоения программного материала в ходе самостоятельной работы. Обучающемуся важно помнить, что контактная работа с преподавателем эффективно помогает ему овладеть программным материалом благодаря расстановке необходимых акцентов и удержанию внимания интонационными модуляциями голоса, а также подключением аудио-визуального механизма восприятия информации.

Самостоятельная работа преследует следующие цели:

- закрепление и совершенствование теоретических знаний, полученных на лекционных занятиях;
- формирование навыков подготовки текстовой составляющей информации учебного и научного назначения для размещения в различных информационных системах;
- совершенствование навыков поиска научных публикаций и образовательных ресурсов, размещенных в сети Интернет;
- самоконтроль освоения программного материала.

Обучающемуся необходимо помнить, что результаты самостоятельной работы контролируются преподавателем во время проведения мероприятий текущего контроля и учитываются при промежуточной аттестации.

Обучающимся с ОВЗ и инвалидов предоставляется возможность выбора форм проведения мероприятий текущего контроля, альтернативных формам, предусмотренным рабочей программой дисциплины. Предусматривается возможность увеличения в пределах 1 академического часа времени, отводимого на выполнение контрольных мероприятий.

Процедура оценивания результатов обучения инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья по дисциплине предусматривает предоставление информации в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации.

При проведении текущего контроля применяются оценочные средства, обеспечивающие передачу информации, от обучающегося к преподавателю, с учетом психофизиологических особенностей здоровья обучающихся.

7. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

При самостоятельной работе обучающимся следует использовать:

- конспекты лекций;
- литературу из перечня основной и дополнительной учебной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля);
- текст лекций на электронных носителях;
- ресурсы информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимые для освоения дисциплины;
- лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение из перечня информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине;
- методические указания для обучающихся по освоению дисциплины.

8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Основная:

1. Алексеев С. О. Введение в общую теорию относительности, ее современное развитие и приложения: Учебное пособие/Алексеев С. О.-Екатеринбург: Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2015, ISBN 978-5-7996-1584-0.-380. <http://www.iprbookshop.ru/69754.html>
2. Вергелес, С. Н. Теоретическая физика. Общая теория относительности : учебник для бакалавриата и магистратуры / С. Н. Вергелес. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 190 с. — (Бакалавр и магистр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-03243-7. — Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. <https://www.urait.ru/bcode/437658>
3. Лобов Н. И., Любимов Д. В. Общая теория относительности: учебно-методическое пособие/Н. И. Лобов, Д. В. Любимов.-Пермь, 2013, ISBN 5-7944-0816-2.-1. <http://k.psu.ru/library/node/190530>

Дополнительная:

1. Бабурова, О. В. Математические основы современной теории гравитации : монография / О. В. Бабурова, Б. Н. Фролов. — Москва : Прометей, 2012. — 127 с. — ISBN 978-5-7042-2362-7. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [сайт]. <http://www.iprbookshop.ru/18585.html>
2. Основы специальной теории относительности и ее связь с электродинамикой/сост. В. А. Демин.- Пермь:Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2016.-20. <https://elis.psu.ru/node/590603>
3. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. учебное пособие для студентов физических специальностей университетов : в 10 т. Т. 2. Теория поля/Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; ред. Л. П. Питаевский.-8-е изд., стер.-Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006, ISBN 5-9221-0056-4.-536

9. Перечень ресурсов сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

<http://library.psu.ru/node/738> Ресурсы Научной библиотеки ПГНИУ

10. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине

Образовательный процесс по дисциплине **Общая теория относительности** предполагает использование следующего программного обеспечения и информационных справочных систем:

- доступ в режиме on-line в Электронную библиотечную систему (ЭБС)
- доступ в электронную информационно-образовательную среду университета.
- Интернет-сервисы и электронные ресурсы (поисковые системы, электронная почта и т.д.)

Перечень необходимого лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения:

- приложение, позволяющее просматривать PDF-файлы
- офисный пакет приложений «LibreOffice».
- пакет аналитических вычислений Maxima

Дополнительный перечень используемых информационных технологий определяется преподавателями дисциплины.

При освоении материала и выполнении заданий по дисциплине рекомендуется использование материалов, размещенных в Личных кабинетах обучающихся ЕТИС ПГНИУ (student.psu.ru).

При организации дистанционной работы и проведении занятий в режиме онлайн могут использоваться:

- система видеоконференцсвязи на основе платформы BigBlueButton (<https://bigbluebutton.org/>).
- система LMS Moodle (<http://e-learn.psu.ru/>), которая поддерживает возможность использования текстовых материалов и презентаций, аудио- и видеоконтент, а так же тесты, проверяемые задания, задания для совместной работы.
- система тестирования Indigo (<https://indigotech.ru/>).

11. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине

Для лекционных занятий требуется аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук) с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

Для проведения практических занятий - аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук) с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

Для групповых (индивидуальных) консультаций - аудитория, оснащенная презентационной техникой (проектор, экран, компьютер/ноутбук) с соответствующим программным обеспечением, меловой (и) или маркерной доской.

Для проведения текущего контроля - аудитория, оснащенная меловой (и) или маркерной доской.
Самостоятельная работа студентов: аудитория, оснащенная компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет», с обеспеченным доступом в электронную информационно-

образовательную среду университета, помещения Научной библиотеки ПГНИУ

Помещения научной библиотеки ПГНИУ для обеспечения самостоятельной работы обучающихся:

1. Научно-библиографический отдел, корп.1, ауд. 142. Оборудован 3 персональными компьютера с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

2. Читальный зал гуманитарной литературы, корп. 2, ауд. 418. Оборудован 7 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

3. Читальный зал естественной литературы, корп.6, ауд. 107а. Оборудован 5 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

4. Отдел иностранной литературы, корп.2 ауд. 207. Оборудован 1 персональным компьютером с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

5. Библиотека юридического факультета, корп.9, ауд. 4. Оборудована 11 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

6. Читальный зал географического факультета, корп.8, ауд. 419. Оборудован 6 персональными компьютерами с доступом к локальной и глобальной компьютерным сетям.

Все компьютеры, установленные в помещениях научной библиотеки, оснащены следующим программным обеспечением:

Операционная система ALT Linux;

Офисный пакет Libreoffice.

Справочно-правовая система «КонсультантПлюс»

**Фонды оценочных средств для аттестации по дисциплине
Общая теория относительности**

**Планируемые результаты обучения по дисциплине для формирования компетенции и
критерии их оценивания**

Компетенция	Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения
<p>ПК.1 способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин</p>	<p>Знать: основные понятия и методы римановой геометрии, уравнения гравитационного поля Уметь: строить метрический тензор, вычислять вариацию действия. Владеть: навыками вычисления тензора энергии-импульса.</p>	<p align="center">Неудовлетворител</p> <p>Не знает основные понятия и методы римановой геометрии, уравнения гравитационного поля. Не умеет производить расчеты, строить метрический тензор, вычислять вариацию действия. Не владеет навыками вычисления тензора энергии-импульса.</p> <p align="center">Удовлетворительн</p> <p>Общие, но не структурированные знания основных понятий и методов римановой геометрии, уравнений гравитационного поля. Демонстрирует частично сформированное умение производить расчёты, строить метрический тензор, вычислять вариацию действия, давать интерпретацию результатов. Имеет представление о навыках вычисления тензора энергии-импульса.</p> <p align="center">Хорошо</p> <p>Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания основных понятий и методов римановой геометрии, уравнений гравитационного поля. В целом успешные, но содержащие отдельные пробелы умения производить расчёты, строить метрический тензор, вычислять вариацию действия. В целом успешно, но с отдельными пробелами владеет навыками вычисления тензора энергии-импульса.</p> <p align="center">Отлично</p> <p>Сформированные систематические знания основных понятий и методов римановой геометрии, уравнений гравитационного поля. Сформированное умение производить расчёты, строить метрический тензор, вычислять вариацию действия. Успешное и систематическое применение навыков</p>

Компетенция	Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения
<p>ОПК.7 способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач</p>	<p>Знать: предельные переходы к теории тяготения Ньютона, метрику Шварцшильда, космологический постулат, уравнения Фридмана. Уметь: вычислять метрический тензор, символы Кристоффеля, тензор Риччи в различных системах координат, анализировать модели эволюции Вселенной Владеть: понятиями горизонта событий, метрики Шварцшильда, метрики Керра, представлениями об эволюции Вселенной, инфляционной модели.</p>	<p>Отлично вычисления тензора энергии-импульса.</p> <p>Неудовлетворител Не знает предельные переходы к теории тяготения Ньютона, метрику Шварцшильда, космологический постулат, уравнения Фридмана. Не умеет вычислять метрический тензор, символы Кристоффеля, тензор Риччи в различных системах координат, описывать физические явления с учетом релятивистских эффектов. Не владеет понятиями горизонта событий, метрики Шварцшильда, метрики Керра, представлениями об эволюции Вселенной, инфляционной модели.</p> <p>Удовлетворительн Общие, но не структурированные знания предельных переходов к теории тяготения Ньютона, метрики Шварцшильда, космологического постулата, уравнений Фридмана. Демонстрирует частично сформированное умение вычислять метрический тензор, символы Кристоффеля, тензор Риччи в различных системах координат, описывать физические явления с учетом релятивистских эффектов, анализировать модели эволюции Вселенной. Имеет представление о понятиях горизонта событий, метрики Шварцшильда, метрики Керра, моделях эволюции Вселенной, инфляционной модели.</p> <p>Хорошо Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания предельных переходов к теории тяготения Ньютона, метрики Шварцшильда, космологического постулата, уравнений Фридмана.. В целом успешные, но содержащие отдельные пробелы умения вычислять метрический тензор, символы Кристоффеля, тензор Риччи в различных системах координат, описывать физические явления с учетом релятивистских эффектов, анализировать модели эволюции Вселенной. В целом успешно, но с отдельными пробелами владеет понятиями горизонта</p>

Компетенция	Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения
		<p style="text-align: center;">Хорошо</p> <p>событий, метрики Шварцшильда, метрики Керра, представлениями об эволюции Вселенной, инфляционной модели.</p> <p style="text-align: center;">Отлично</p> <p>Сформированные систематические знания предельных переходов к теории тяготения Ньютона, метрики Шварцшильда, космологического постулата, уравнений Фридмана.. Сформированное умение вычислять метрический тензор, символы Кристоффеля, тензор Риччи в различных системах координат, описывать физические явления с учетом релятивистских эффектов, анализировать модели эволюции Вселенной. Успешное и систематическое применение понятий горизонта событий, метрики Шварцшильда, метрики Керра, представлений об эволюции Вселенной, инфляционной модели.</p>

Оценочные средства текущего контроля и промежуточной аттестации

Схема доставки : Базовая

Вид мероприятия промежуточной аттестации : Экзамен

Способ проведения мероприятия промежуточной аттестации : Оценка по дисциплине в рамках промежуточной аттестации определяется на основе баллов, набранных обучающимся на контрольных мероприятиях, проводимых в течение учебного периода.

Максимальное количество баллов : 100

Конвертация баллов в отметки

«отлично» - от 81 до 100

«хорошо» - от 61 до 80

«удовлетворительно» - от 50 до 60

«неудовлетворительно» / «незачтено» менее 50 балла

Компетенция	Мероприятие текущего контроля	Контролируемые элементы результатов обучения
Входной контроль	Риманова геометрия Входное тестирование	Элементы специальной теории относительности, тензорное и векторное исчисление, законы электродинамики
ПК.1 способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин	Уравнения гравитационного поля Письменное контрольное мероприятие	Владение методами понятиями геометрии Римана, принципом наименьшего действия для поля и материи.
ОПК.7 способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач	Поля тяготеющих тел Письменное контрольное мероприятие	Знание различных метрик, владение навыками расчёта полей тяготеющих тел
ОПК.7 способность использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач	Релятивистская космология Итоговое контрольное мероприятие	Знание космологических постулатов, принципов описания эволюции Вселенной.

Спецификация мероприятий текущего контроля

Риманова геометрия

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **.25 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **0**

Проходной балл: **0**

Показатели оценивания	Баллы
Работа с индексной формой записи тензорных выражений	5
Преобразования Лоренца	5

Уравнения гравитационного поля

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **30**

Проходной балл: **15**

Показатели оценивания	Баллы
Символы Кристоффеля.	8
Тензор кривизны Римана. Тензор Риччи.	8
Метрический тензор. Криволинейные координаты. Ко- и контравариантный 4-вектор.	7
Операции над тензорами в криволинейных координатах. Интегральные теоремы в криволинейных координатах.	7

Поля тяготеющих тел

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **30**

Проходной балл: **15**

Показатели оценивания	Баллы
Владение навыками построения метрики Шварцшильда и других метрик центрально-симметричных полей.	9
Умение описывать движение безмассовых и массивных частиц в гравитационном поле, красное смещение, эффект Доплера.	9
Владение понятием горизонта событий, навыками анализа движения тел в центрально-симметричных полях.	6
Знание предельного перехода к закону Ньютона.	6

Релятивистская космология

Продолжительность проведения мероприятия промежуточной аттестации: **1 часа**

Условия проведения мероприятия: **в часы аудиторной работы**

Максимальный балл, выставляемый за мероприятие промежуточной аттестации: **40**

Проходной балл: **20**

Показатели оценивания	Баллы
Умение выводить уравнения Фридмана и анализировать их.	12
Знание моделей эволюции нестационарной Вселенной.	12
Владение представлениями об инфляционной стадии расширения Вселенной, современном	

ускорении расширения, прогнозами дальнейшей эволюции.	8
Знание космологического постулата, линейного элемента Робертсона-Уокера.	8