

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ:
Декан физического факультета
С.Н. Филимонов

Оценочные материалы по дисциплине

Общая теория относительности

по направлению подготовки

03.03.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки:
«Фундаментальная и прикладная физика»

Форма обучения
Очная

Квалификация
Бакалавр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
С.Н. Филимонов

Председатель УМК
О.М. Сюсина

Томск – 2025

1. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

- ОПК-2 – Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;
- ПК-1 – Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 2.2 – Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные;

ИПК 1.1 – Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования.

2. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания

По дисциплине «Общая теория относительности» предусмотрен коллоквиум. Коллоквиум проводится в форме собеседования. Билет коллоквиума включает теоретический вопрос и задачу из открытого банка.

Открытый банк теоретических вопросов к коллоквиуму (ИОПК 2.2, ИПК 1.1).

1. Алгебра тензоров, риманова метрика и аффинная связность.
2. Тензор кривизны, тензор Риччи и скаляр Риччи.
3. Векторы Киллинга.
4. Свободное движение тел в искривлённом пространстве-времени. Ньютоновское приближение. Электродинамика в общей теории относительности.
5. Тензор энергии-импульса.
6. Уравнения гравитационного поля в теории Ньютона и в общей теории относительности.
7. Лагранжев вывод уравнений гравитационного поля.
8. Решение Шварцшильда.
9. Уравнения движения тел в сферически симметричном гравитационном поле.
10. Движение планет. Смещение перигелия.
11. Отклонение луча света полем массивного тела.

Открытый банк задач к коллоквиуму:

1. Вывести закон кругового обращения планет в ньютоновской теории тяготения и сопоставить его с тем, что получается в ОТО.
2. Вывести законы Кеплера из ньютоновской теории тяготения. Удовлетворяет ли движение по законам Кеплера уравнения движения пробных частиц в пространстве с метрикой Шварцшильда (точно или хотя бы приближённо)?
3. Доказать, что коэффициенты аффинной связности не удовлетворяют закону преобразования тензоров.
4. Пользуясь выражением коэффициентов связности через компоненты метрического тензора, доказать, что метрический тензор ковариантно постоянен.
5. Найти тензор Римана в одномерном пространстве.
6. Выразить тензор Римана в двумерном пространстве через метрический тензор и скаляр Риччи.
7. Выразить тензор Римана в трёхмерном пространстве через метрический тензор и тензор Риччи.
8. Доказать, что вторые производные скалярного поля коммутируют.

9. Сколько независимых компонент имеет тензор Римана в n -мерном пространстве?
10. Доказать циклическое тождество и тождество Бианки для тензора Римана.
11. В плоском пространстве-времени Минковского найти 10 линейно независимых векторов Киллинга.
12. Небольшой спутник обращается с круговой частотой ω по орбите радиусом r вокруг центрального тела с массой m . Показать, что если известна только круговая частота обращения спутника ω , то мы не можем найти по отдельности ни r , ни m , а можем определить лишь эффективную «кеплеровскую плотность» центрального тела, получающуюся путём усреднения его массы по шару с радиусом, равным радиусу орбиты. Выразить ω через кеплеровскую плотность.

Критерии оценивания. Ответ на вопрос и решение задачи должны быть развернутыми, содержать полную логическую цепочку аргументов, необходимые формулы и пояснения к обозначениям. Кроме этого, студенту на коллоквиуме задаются три дополнительных вопроса, требующих краткого ответа. Результаты коллоквиума определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». Оценка «отлично» ставится при правильном ответе не менее чем на 90% вопросов билета и дополнительных вопросов. Оценка «хорошо» ставится при правильном ответе не менее чем на 75% вопросов билета и дополнительных вопросов. Оценка «удовлетворительно» ставится при правильном ответе не менее чем на 60% вопросов билета и дополнительных вопросов. Оценка «неудовлетворительно» ставится при правильном ответе менее чем на 60% вопросов билета и дополнительных вопросов.

3. Оценочные материалы итогового контроля (промежуточной аттестации) и критерии оценивания.

Дифференцированный зачёт в 8 семестре проводится в устной форме по экзаменационным билетам.

Билет содержит два теоретических вопроса и задачу, проверяющие компетенции ОПК-2 и ПК-1 в соответствии с индикатором достижения ИОПК-2.2 и ИПК-1.1. Если по результатам текущего контроля студент имеет оценку за коллоквиум «отлично», «хорошо» или «удовлетворительно», то ему разрешается отвечать только на второй теоретический вопрос билета и дополнительные вопросы (из открытого перечня теоретических вопросов). При этом оценка за коллоквиум учитывается в качестве оценки ответа на первый теоретический вопрос и задачу. Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». Оценка «отлично» ставится при правильном ответе не менее чем на 90% вопросов билета и дополнительных вопросов. Оценка «хорошо» ставится при правильном ответе не менее чем на 75% вопросов билета и дополнительных вопросов. Оценка «удовлетворительно» ставится при правильном ответе не менее чем на 60% вопросов билета и дополнительных вопросов. Оценка «неудовлетворительно» ставится при правильном ответе менее чем на 60% вопросов билета и дополнительных вопросов.

Открытый перечень вопросов, выносимых на экзамен.

1. Алгебра тензоров, риманова метрика и аффинная связность.
2. Тензор кривизны, тензор Риччи и скаляр Риччи.
3. Векторы Киллинга.
4. Свободное движение тел в искривлённом пространстве-времени. Ньютоновское приближение. Электродинамика в ОТО.
5. Тензор энергии-импульса.

6. Уравнения гравитационного поля в теории Ньютона и в ОТО.
7. Лагранжев вывод уравнений гравитационного поля.
8. Решение Шварцшильда.
9. Уравнения движения тел в сферически симметричном гравитационном поле.
10. Движение планет. Смещение перигелия.
11. Отклонение луча света полем массивного тела.
12. Геометрия пространства-времени и законы сохранения.
13. Псевдотензор энергии-импульса гравитационного поля.
14. Гравитационные волны.
15. Метрика Фридмана-Робертсона-Уокера.
16. Измерение космических расстояний.
17. Космологическое красное смещение.
18. Решение Фридмана и динамика расширения Вселенной.
19. Ускоряющееся расширение: данные наблюдений.
20. Реликтовое излучение.
21. Трудности учения о Большом взрыве и космологическая инфляция как способ их разрешения.
22. Инфляция в режиме медленного скатывания.
23. Модели инфляции: инфляция с большим полем, инфляция вблизи максимума потенциала, гибридная инфляция.
24. Анизотропное космологическое решение.

4. Оценочные материалы для проверки остаточных знаний (сформированности компетенций)

Тесты (ИОПК-2.2, ИПК-1.1):

1. Метрический тензор:
 - а) должен быть симметричен;
 - б) должен быть антисимметричен;
 - с) не должен быть ни симметричным, ни антисимметричным.

Ключи: а)

2. В общей теории относительности гравитационное поле описывается:
 - а) скаляром;
 - б) вектором;
 - с) тензором второго ранга.

Ключи: с)

3. Какое пространство называется плоским?
 - а) то, чей метрический тензор имеет диагональный вид;
 - б) то, чей тензор Римана равен нулю;
 - с) то, которое не имеет векторов Киллинга.

Ключи: б)

4. Незаряженная неврацающаяся чёрная дыра описывается решением:
 - а) Фридмана;
 - б) Шварцшильда;
 - с) Керра.

Ключи: б)

5. В настоящее время расширение Вселенной происходит:
 - а) с ускорением;
 - б) с замедлением;
 - с) равномерно.

Ключи: а)

Проверка знания основных определений и утверждений:

1. Назовите несколько (не менее трёх) экспериментальных или наблюдательных подтверждений общей теории относительности.
Возможный ответ: смещение перигелия Меркурия, отклонение луча света при прохождении вблизи Солнца, гравитационное красное смещение.
2. Что говорят теория и эксперимент (наблюдение) о скорости гравитационной волны?
Ответ: теория говорит, что скорость гравитационной волны равна скорости света в вакууме. Наблюдение слияния нейтронных звёзд подтверждает этот вывод: вспышка электромагнитного излучения пришла практически одновременно со вспышкой гравитационного.
3. Что может служить источником гравитационных волн?
Ответ: любое ускоренно движущееся массивное тело.
4. Какими событиями были порождены первые из принятых гравитационных волн?
Ответ: слияниями двойных чёрных дыр.
5. Что описывается векторами Киллинга?
Ответ: векторами Киллинга описываются симметрии пространства.
6. Из каких соображений ищется решение Шварцшильда?
Ответ: решение Шварцшильда ищется как сферически-симметричное решение уравнений гравитационного поля в вакууме. Может искаться также как сферически-симметричное стационарное решение уравнений гравитационного поля в вакууме.
7. Из каких соображений получается метрика Фридмана-Робертсона-Уокера?
Ответ: как метрика однородного изотропного пространства.
8. В чём состоит проблема скрытой массы в космологии?
Ответ: проблема состоит в том, что, если судить по гравитационным проявлениям, то массы галактик и их скоплений существенно превосходят массу видимого вещества в них.
9. Назовите несколько (не менее двух) проблем теории Большого Взрыва, которые решаются введением космологической инфляции.
Возможный ответ: проблема горизонта и проблема кривизны.
10. Что такое чёрная дыра?
Ответ: область пространства-времени, ограниченная горизонтом событий.
11. Сформулируйте теорему «об отсутствии волос» у чёрной дыры.
Ответ: стационарная асимптотически плоская чёрная дыра, взаимодействующая с электромагнитным полем и являющаяся несингулярной вне горизонта событий, полностью описывается тремя параметрами: массой, электрическим зарядом и угловым моментом.

Информация о разработчиках

Кирнос Илья Васильевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры квантовой теории поля физического факультета ТГУ.