

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН»

УТВЕРЖДАЮ
директор ИЯФ СО РАН,

академик РАН _____ П.В.Логачев

« 05 » _____ октября _____ 2018 г.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ГЛАВЫ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Рабочая программа дисциплины

Направление подготовки

03.06.01 Физика и астрономия (уровень подготовки кадров высшей квалификации)

Общая трудоемкость дисциплины: 6 зачетные единицы – **216** часов.

Форма промежуточной аттестации: зачет

Виды деятельности:

Лекции	64	контактная работа обучающихся с преподавателем	128
Семинарские занятия	64		
Самостоятельная работа	80	занятия в активной и интерактивной форме	128
Консультации			
Зачеты	8	Экзамены	

Новосибирск- 2020

Программа курса «Дополнительные главы Общей теории относительности» составлена в соответствии с требованиями федерального государственного стандарта высшего образования 03.06.01 Физика и астрономия. Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, семинары, самостоятельная работа студента.

Предлагаемый курс лекций является частью профессионального цикла подготовки аспирантов по специальностям 01.04.02 Теоретическая физика и 01.04.16 Физика атомного ядра и элементарных частиц (уровень подготовки кадров высшей квалификации). Он ставит перед собой две основные задачи. Первой задачей является подготовка аспирантов указанных специальностей к сдаче кандидатского экзамена по широкому кругу вопросов. Второй задачей является детальное обсуждение некоторых вопросов, которые не входят в стандартную университетскую программу, но знание и правильное понимание которых очень важно для работы исследователей. Обучение предполагается проводить не на основе повторения университетского курса, а на основе обсуждения нетривиальных и интересных физических проблем, решение которых потребует напоминания основ теории. Это позволит подготовиться к сдаче кандидатских экзаменов, а также повысить интерес к исследовательской работе. В рамках курса излагаются основные теоретические подходы к описанию черных дыр в классической общей теории относительности, излучение Хокинга, термодинамика и механика черных дыр. Знание представленного материала важно как для теоретиков и вычислителей, так и для экспериментаторов.

Продолжительность курса - два семестра (одна лекция и один семинар в неделю)

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: сдача заданий в течение семестра.

Промежуточная аттестация: зачёт в каждом из семестров.

Общая трудоемкость составляет 6 зачетных единиц, 216 часов.

Составитель:

к.ф.-м.н., доцент А. В. Грабовский

Рабочая программа

Содержание

1. Цели освоения дисциплины	4
2. Место дисциплины в структуре программы обучения	4
3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины	4
4. Структура и содержание дисциплины	5
5. Образовательные технологии	8
6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов и аспирантов.....	8
7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины:.....	8
8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины .	11
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины.....	11

«Дополнительные главы общей теории относительности»

Рабочая программа дисциплины

1. Цели освоения дисциплины

Предлагаемый курс лекций является частью профессионального цикла подготовки аспирантов по специальностям 01.04.02 Теоретическая физика и 01.04.16 Физика атомного ядра и элементарных частиц (уровень подготовки кадров высшей квалификации). Он ставит перед собой две основные задачи. Первой задачей является подготовка аспирантов указанных специальностей к сдаче кандидатского экзамена по широкому кругу вопросов. Второй задачей является детальное обсуждение некоторых вопросов, которые не входят в стандартную университетскую программу, но знание и правильное понимание которых очень важно для работы исследователей. Обучение предполагается проводить не на основе повторения университетского курса, а на основе обсуждения нетривиальных и интересных физических проблем, решение которых потребует напоминания основ теории. Это позволит подготовиться к сдаче кандидатских экзаменов, а также повысить интерес к исследовательской работе.

В рамках курса излагаются основные теоретические подходы к описанию черных дыр в классической общей теории относительности, излучение Хокинга, термодинамика и механика черных дыр. Знание представленного материала важно как для теоретиков и вычислителей, так и для экспериментаторов.

2. Место дисциплины в структуре программы обучения

Дисциплина «Дополнительные главы общей теории относительности» входит в набор вариативных дисциплин блока 1 "Дисциплины (модули)". Дисциплина является элективной (дисциплиной по выбору), ориентированной на аспирантов, специализирующихся в области теоретической физики и физики элементарных частиц. Аспиранты, приступающие к изучению этой дисциплины, должны иметь общую базовую подготовку в рамках программы 5-6 лет обучения в ВУЗе, в том числе:

- должны быть знакомы с основами нерелятивистской классической механики и специальной теории относительности,
- должны знать основы классической электродинамики,
- должны быть знакомы с основами нерелятивистской квантовой механики,
- должны владеть основами математического анализа и теории функций комплексного переменного.

Для лучшего усвоения дисциплины, ее изучение должно проводиться после прохождения аспирантом курса "Избранные главы современной физики"

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующих компетенций:

- Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);
- Готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3);
- Способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1);
- Способность построения теоретических моделей физических явлений и процессов для решения научных и практических задач (в соответствии с направленностью подготовки) (ПК-1);

- Способность к получению, критическому осмыслению и реферативному изложению научных результатов в области физики (в соответствии с направленностью подготовки) (ПК-2);

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **иметь представление** о черных дырах, процессах их образования, о точных стационарных решениях уравнений Эйнштейна, о физических процессах, происходящих вблизи черных дыр.
- **уметь** проводить анализ и оценку величин различных эффектов, которые важны в физике черных дыр.
- **знать** современное состояние и направление развития физики черных дыр.

4. Структура и содержание дисциплины

Дисциплина «Стандартная модель и ее расширения» представляет собой годовой курс, читаемый в аспирантуре ИЯФ СО РАН. Общая трудоемкость дисциплины составляет 6 зачетных единиц, 216 часов.

Раздел дисциплины	Неделя	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)			Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
		Лекции	Семинары	Самостоятельная работа	
Первый семестр					
Гравитационный коллапс. Предел Чандрасекара. Белые карлики. Нейтронные звезды.	1	2	2	3	Решение задач студентами на каждом семинаре В начале каждого очередного занятия проверка задач, заданных на дом.
Геодезические. Аффинная параметризация.	2	2	2	3	Решение задач студентами на каждом семинаре В начале каждого очередного занятия проверка задач, заданных на дом.
Симметрии и векторы Киллинга. Решение Шварцшильда.	3	2	2	3	Решение задач студентами на каждом семинаре В начале каждого очередного занятия проверка задач, заданных на дом.
Сферически симметричный коллапс облака пыли. Черные и белые дыры.	4	2	2	3	Решение задач студентами на каждом семинаре В начале каждого очередного занятия проверка задач, заданных на дом.
Координаты Эддингтона-Финкельштейна, Крускала – Шекереса. Вечные черные дыры.	5	2	2	3	Контрольная работа по пройденному материалу.
Нулевые	6	2	2	3	Разбор контрольной работы

гиперповерхности. Горизонты поля Киллинга.					
Пространство – время Риндлера.	7	2	2	3	Решение задач студентами на каждом семинаре В начале каждого очередного занятия проверка задач, заданных на дом.
Поверхностная гравитация. Температура Хокинга.	8	2	2	3	Решение задач студентами на каждом семинаре В начале каждого очередного занятия проверка задач, заданных на дом.
Закон Толмана. Температура Унру.	9	2	2	2	Контрольная работа по пройденному материалу.
Конформная компактификация. Диаграммы Картера – Пенроуза.	10	2	2	2	Разбор контрольной работы
Горизонт событий. Голые сингулярности.	11	2	2	2	
Заряженные черные дыры. Решение Рейснера — Нордстрёма.	12	2	2	2	
Гравитационный коллапс к решению Рейснера — Нордстрёма.	13	2	2	2	
Горизонты Коши. Изотропные координаты для решения Рейснера — Нордстрёма.	14	2	2	2	
Экстремальное решение Рейснера — Нордстрёма.	15	2	2	2	
Решение для нескольких экстремальных черных дыр.	16	2	2	2	
Зачеты					4
Итого за 1 семестр		32	32	40	4
Второй семестр					
Теоремы единственности. Семейство решений Керра-Ньюмана. Решение Керра с $M^2 < a^2$. Замкнутые временные кривые.	1	2	2	2	Решение задач студентами на каждом семинаре В начале каждого очередного занятия проверка задач, заданных на дом.
Решение Керра с $M^2 > a^2$ и $M^2 = a^2$. Угловая скорость горизонта.	2	2	2	3	
Эргосфера. Процесс Пенроуза. Площадь горизонта. Закручивание инерциальных систем.	3	2	2	3	
Энергетические условия. Интегралы Комара.	4	2	2	3	
Полный момент, заряд и масса слабой статической пыли.	5	2	2	2	Контрольная работа по пройденному материалу.
Энергетические условия. Конгруэнции	6 7	2 2	2 2	3 2	Разбор контрольной работы

геодезических. Уравнения Райчаудхури.					
Нулевой закон механики черных дыр. Формула Смарра.	8	2	2	3	
Первый закон механики черных дыр, $Q=0$.	9	2	2	3	Контрольная работа по пройденному материалу.
Совращающийся потенциал. Производная Ли. Первый закон механики черных дыр с $Q=\lambda=0$.	10	2	2	3	Разбор контрольной работы
Второй закон механики черных дыр.	11	2	2	3	
Преобразования Боголюбова.	12	2	2	2	
Решение уравнения Клейна – Гордона в Шварцшильдовом поле вблизи и вдали от горизонта. Излучение Хокинга для скалярного безмассового поля.	13	2	2	2	
Температура Хокинга. Выводы Бекенштейна и Хокинга энтропии черной дыры. Обобщенные законы термодинамики.	14	2	2	2	
Пространство де Ситтера. Кривизна. Различные координаты. Диаграмма Пенроуза. Горизонт, поверхностная гравитация, площадь.	15	2	2	2	
Черные дыры в пространстве де Ситтера.	16	2	2	2	
Зачет					4
Итого за 2 семестр		32	32	40	4

Содержание дисциплины:

1. Гравитационный коллапс. Предел Чандрасекара. Белые карлики. Нейтронные звезды.
2. Геодезические. Аффинная параметризация. Симметрии и векторы Киллинга. Нулевые гиперповерхности. Горизонты поля Киллинга.
3. Решение Шварцшильда. Сферически симметричный коллапс облака пыли. Черные и белые дыры. Координаты Эддингтона-Финкельштейна, Крускала – Шекереса. Вечные черные дыры.
4. Пространство – время Риндлера. Поверхностная гравитация. Температура Хокинга. Закон Толмана. Температура Унру.
5. Конформная компактификация. Диаграммы Картера – Пенроуза. Горизонт событий. Голые сингулярности.
6. Заряженные черные дыры. Решение Рейснера — Нордстрёма. Гравитационный коллапс к решению Рейснера – Нордстрёма. Горизонты Коши. Изотропные координаты для решения Рейснера — Нордстрёма. Экстремальная черная дыра.

7. Теоремы единственности. Семейство решений Керра – Ньюмана. Решение Керра. Замкнутые временные кривые. Эргосфера. Процесс Пенроуза.
8. Энергия АДМ слабой статической пыли. Интегралы Комара. Энергетические условия. Конгруэнции геодезических. Уравнения Райчаудхури.
9. Законы механики черных дыр. Формула Смарра.
10. Преобразование Боголюбова. Температура Хокинга. Определение вакуума. Число частиц в вакууме. Выводы Бекенштейна и Хокинга энтропии черной дыры. Обобщенные законы термодинамики.
11. Пространство де Ситтера. Космологический горизонт, его температура, энтропия, излучение Хокинга. Черные дыры в дС. Диаграмма Пенроуза пространства де Ситтера, Шварцшильда – дС, Керра – Ньюмана – дС.

5. Образовательные технологии

При проведении лекционных занятий используется мультимедийное оборудование. Практические занятия включают в себя самостоятельное решение различных задач, иллюстрирующих лекционный материал. Особый упор делается на обучении аспирантов делать качественные оценки эффектов, а также на обучении аспирантов умению проводить всесторонний анализ полученных результатов и исследованию различных предельных случаев.

Лекции и семинары по курсу проводятся в малых группах (до 6 человек) в интерактивном режиме, с возможностью привлечения слушателей к обсуждению рассматриваемых вопросов.

6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов и аспирантов

Самостоятельная работа студентов поддерживается регулярными приемами заданий. Система контроля включает текущий (по ходу семестра) контроль освоения практического материала. В качестве текущего контроля успеваемости используется контроль посещаемости. Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на зачете, который проводится в конце семестра по билетам в устной форме.

7. Фонд оценочных средств для проведения аттестации по итогам освоения дисциплины:

Билеты для зачета за 1 семестр

Билет N: 1

1. Предел Чандрасекара. Белые карлики и нейтронные звезды.
2. Найти максимальное собственное время при движении по времени-подобной кривой под горизонтом в решении Шварцшильда.

Билет N:2

- 1.Решение Шварцшильда в координатах Эддингтона-Финкельштейна. Черные и белые дыры.
- 2.Оценить температуру в центре солнца.

Билет N: 3

1. Центральное симметричный коллапс облака пыли.
2. Нарисовать диаграмму Пенроуза для метрики Робинсона – Бертотти.

Билет N: 4

1. Геодезические. Аффинная параметризация.

2. Нарисовать диаграммы Пенроуза для метрики Рейсснера – Нордстрема с $Q>M$ и $Q<M$.

Билет N: 5

1. Векторы Киллинга. Горизонт Киллинга. Нулевые гиперповерхности.
2. Оценить время, за которое коллапсирующая звезда массы M погаснет, с точки зрения удаленного наблюдателя.

Билет N: 6

1. Решение Шварцшильда в координатах Крускала-Шекереса. Максимальное аналитическое расширение.
2. Оценить температуру Унру для ускорения свободного падения на поверхности Земли.

Билет N: 7

1. Решение Шварцшильда в изотропных координатах. Мост Эйнштейна – Розена – Подольского.
2. Оценить температуру Хокинга для черной дыры с массой порядка массы Солнца.

Билет N: 8

1. Диаграммы Пенроуза.
2. В экстремальной метрике Рейсснера – Нордстрема найти расстояние от $r>r_+$ до r_+ по кривой с $t=\text{const}$. Показать, что собственное время при движении от $r>r_+$ до r_+ по времени подобной геодезической конечно.

Билет N: 9

1. Горизонт Киллинга. Горизонт событий. Горизонт Коши. Теорема Фробениуса.
2. Нарисовать диаграммы Пенроуза для метрики Шварцшильда с $M>0$ и $M<0$.

Билет N: 10

1. Пространство-время Риндлера. Температура Унру.
2. Нарисовать диаграмму Пенроуза для пространства Минковского.

Билет N: 11

1. Поверхностная гравитация. Температура Хокинга.
2. Нарисовать диаграмму Пенроуза для пространства Риндлера.

Билет N: 12

1. Решение Рейсснера – Нордстрема. Коллапс заряженной пыли.
2. Показать эквивалентность действий $S_1[x] = -m \int d\lambda (-x_\lambda^\mu x_\lambda^\nu g_{\mu\nu})^{1/2}$ и $S_2[x, e] = 1/2 \int d\lambda (1/e x_\lambda^\mu x_\lambda^\nu g_{\mu\nu} - m^2 e)$.

Билет N: 13

1. Решение Рейсснера – Нордстрема в изотропных координатах.
2. Найти собственное время падения частицы на сингулярность в метрике Шварцшильда.

Билет N: 14

1. Экстремальное решение Рейсснера – Нордстрема.
2. Найти радиус ближайшей к центру круговой орбиты в метрике Шварцшильда.

Билет N: 15

1. Решение для двух экстремальных заряженных черных дыр.
2. Показать, что для вектора Киллинга $k D_\alpha D_\beta k^\gamma = R_{\gamma\beta\alpha}{}^\mu k_\mu$, где тензор Римана $R_{\gamma\beta\alpha}{}^\mu v_\mu = [D_\gamma D_\beta] v_\alpha$.

Билет N: 16

1. Вечные черные дыры. Голые сингулярности. Гипотеза космической цензуры.
2. Показать, что на горизонте Киллинга поля k квадрат поверхностной гравитации $\kappa^2 = -1/2 (D_\alpha k_\beta)(D^\alpha k^\beta)$.

Билеты для зачета за 2 семестр

Билет N: 1

1. Пространство де Ситтера. Группа симметрии. Глобальные, конформные, планарные, статические координаты. Координаты Эддингтона – Финкельштейна и Крускала. Диаграмма Пенроуза.
2. Вычислить АДМ энергию ч.д. Шварцшильда.

Билет N: 2

1. Решение Керра с $M^2 < a^2$. Замкнутые временные кривые.
2. Доказать, что поверхностная гравитация постоянна на горизонте.

Билет N: 3

1. Решение Керра с $M^2=a^2$. Угловая скорость горизонта.
2. Производная Ли. Доказать, что совращающийся потенциал постоянен на горизонте.

Билет N: 4

1. Решение Керра с $M^2>a^2$. Площадь горизонта.
2. Оценив время жизни ч.д. Шварцшильда засчет излучения Хокинга при $M=1g$, M Земли, M Солнца.

Билет N: 5

- 1.Эргосфера. Процесс Пенроуза. Закручивание инерциальных систем. Gravity Probe B.
2. Найти асимптотику решения уравнения Клейна – Гордона вблизи горизонта ч. д. Шварцшильда.

Билет N: 6

1. Суперсветимость.
2. Решить уравнение Клейна – Гордона для безмассового поля с нулевой частотой в поле Шварцшильда.

Билет N: 7

1. Энергетические условия. Интегралы Комара. АДМ энергия.
2. Какую максимальную энергию можно извлечь при слиянии Шварцшильдовых черных дыр?

Билет N: 8

1. Семейства геодезических. Уравнения Райчаудхури.
2. Может ли ч.д. распадаться на 2?

Билет N: 9

1. Конгруэнции геодезических. Скаляр расширения. Тензоры сдвига и вращения.
2. Найти совращающийся потенциал и угловую скорость горизонта, площадь и поверхностную гравитацию решения Керра – Ньюмана.

Билет N: 10

- 1.Нулевой закон механики черных дыр.
2. Оценить, при какой массе вечные черные дыры, образовавшиеся при рождении вселенной, могут дожить до наших дней.

Билет N: 11

1. Первый закон механики черных дыр ($Q=0$).
2. Найти теплоемкость заряженной черной дыры при постоянном заряде. Может ли она находиться в тепловом равновесии с конечным объемом излучения при фиксированной полной энергии системы?

Билет N: 12

- 1.Первый закон механики черных дыр ($Q=\dot{Q}=0$).
- 2.Найти потенциал для движения частицы в поле Керра в экваториальной плоскости.

Билет N: 13

- 1.Формула Смарра.
- 2.Когда идеальная жидкость удовлетворяет доминантному энергетическому условию?

Билет N: 14

- 1.Второй закон механики черных дыр.
2. Показать, что скалярное поле удовлетворяет доминантному энергетическому условию.

Билет N: 15

1. Преобразования Боголюбова. Коэффициенты Боголюбова. Число частиц в вакууме.
2. Построить диаграмму Пенроуза для решения Керра при $\theta=0$.

Билет N: 16

- 1.Излучение Хокинга для безмассового скалярного поля.
- 2.Вычислить полный момент ч. д. Керра с помощью интеграла Комара.

Билет N: 17

1. Испарение черных дыр. Потеря информации. Сохранение вероятности. Унитарность КТП.

2. Вычислить АДМ энергию ч.д. Керра.

Билет N: 18

1. Вывод Бекенштейна энтропии черной дыры.
2. Найти площадь горизонта и поверхностную гравитацию пространства де Ситтера.

Билет N: 19

1. Теоремы единственности в асимптотически плоском пространстве. Семейство решений Керра-Ньюмана.
2. Построить диаграмму Пенроуза для решения Шварцшильда де Ситтера.

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Основная литература

1. Алексеев С.О., Памятных Е.А., Урсулов А.В., Третьякова Д. А., Ранну К.А., Введение в общую теорию относительности, ее современное развитие и приложения, ФЛИНТА, 2017 г.
2. Ахмедов Э.Т., О рождении и смерти черных дыр, МЦНМО, 2015 г.
3. Рубаков В.А., Актуальные вопросы космологии: курс лекций, МЭИ, 2016 г.
4. Гусейханов М.К., Основы астрофизики, Лань, 2019 г.

Дополнительная литература

1. P.K. Townsend, Black Holes, arXiv:gr-qc/9707012 .
2. Matthias Blau, Lecture Notes on General Relativity, 2019, <http://www.blau.itp.unibe.ch/Lecturenotes.html>
3. J. B. Hartle, S. O. Hawking, Path-integral derivation of black-hole radiance, Phys. Rev. D. 13 (1976), 2188.
4. L. C. B. Crispino, A. Higuchi, G. E. A. Matsas, The Unruh effect and its applications, Rev. Mod. Phys., 80, 2008, 787.
5. M. Socolovsky, Rindler space, Unruh effect and Hawking temperature, Annales de la Fondation Louis de Broglie, Volume 39, 2014, 1.
6. S. Hawking, Particle Creation by Black Holes, Commun. math. Phys. 43, 199-220 (1975).
7. G. W. Gibbons and S. W. Hawking, Cosmological event horizons, thermodynamics, and particle creation, Phys. Rev. D. 15 (1977), 2738.
8. M. Spradlin, A. Strominger and A. Volovich, Les Houches Lectures on de Sitter Space, hep-th/0110007.

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Лекционные занятия проводятся в аудитории, оборудованной мультимедийным проектором и компьютером, необходимых для презентации электронного варианта лекций и проведения компьютерных демонстраций.