

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

УТВЕРЖДАЮ

Директор

С.В. Иванов

13 » 04 2022 г.



Рабочая программа факультативной дисциплины

СИЛЬНЫЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ПОЛЯ В АСТРОФИЗИКЕ

программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре

по научной специальности 1.3.3 Теоретическая физика

Принята решением Ученого совета
от 04.03.2022 № 03/22

Санкт-Петербург

2022 г.

Рабочая программа факультативной дисциплины «Сильные гравитационные поля в астрофизике» составлена на основании программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.3.3 Теоретическая физика (далее - программа аспирантуры)

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями изучения дисциплины является:

- Углубление знаний по ряду теоретических проблем в области физики гравитационных полей и общей теории относительности и знакомство с проблемами современной астрофизики сильных гравитационных полей;

- Приобретение опыта использования теоретических методов общей теории относительности.

Задачи дисциплины заключаются в изучении:

- Фундаментальных понятий, законов и теорий, относящихся к общей теории относительности и астрофизики сильных гравитационных полей.

- Математических методов используемых в общей теории относительности.

Для достижения задач, поставленных при изучении дисциплины, используется набор методических средств: учебная, учебно-методическая литература, информационные ресурсы библиотеки, электронные курсы и др.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ПРОГРАММЫ АСПИРАТУРЫ

2.1. Дисциплина «Сильные гравитационные поля в астрофизике» входит в факультативную часть программы аспирантуры с целью расширения и углубления научных и прикладных знаний аспирантов и организуется по выбору и желанию аспиранта.

2.2. Программа данной дисциплины строится на преемственности программ в системе высшего образования и предназначена для аспирантов ФТИ им. А.Ф.Иоффе, прошедших обучение по программе подготовки магистров, прослушавших соответствующие курсы и имеющих по ним положительные оценки. Она основывается на положениях, отраженных в учебных программах указанных уровней.

3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

По окончании изучения дисциплины аспиранты должны будут:

знать:

- основные понятия и законы общей теории относительности; базовые методы теоретических подходов в описании и изучении явлений в общей теории относительности;

уметь:

- пользоваться основными формулами общей теории относительности для оценок величин, характеризующих сильные гравитационные поля в астрофизике;

- самостоятельно изучать и понимать специальную научную и методическую литературу, связанную с проблемами сильных гравитационных полей в астрофизике и общей теории относительности;

- владеть опытом:

- понимания качества исследований, относящихся к области астрофизики сильных гравитационных полей и общей теории относительности;

- самостоятельного изучения и анализа специальной научной и методической литературы, связанной с проблемами общей теории относительности и сильных гравитационных полей в астрофизике;

- применения пакета прикладных программ Mathematica для аналитических вычислений в рамках общей теории относительности.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. Разделы дисциплины и виды занятий

Приводимая ниже таблица показывает распределение бюджета учебного времени, отводимого на освоение основных разделов курса согласно учебному плану.

4.1.1 Содержание тем

Наименование разделов и тем	Трудо- емкость (в ЗЕТ)	Объем работы (в часах)	Всего учебных занятий (в часах)			
			лек- ции	Лаб. прак- тика	само- стоя- тель- ная ра- бота	кон- троль
Тема 1.1. Введение в ОТО и его математический аппарат.		12	2		10	
Тема 1.2. Сферически- симметричное пространство.		32	4		28	
Тема 1.3. Гравитационные волны. Метрика Керра.		32	4		28	
Тема 1.4. Введение в ADM- формализм.		32	4		28	
Всего по дисциплине	2	108	14		94	зачет

Тема 1.1. Введение в ОТО и его математический аппарат.

1. Введение. Принцип эквивалентности. Криволинейные координаты. Вектора, тензора. Метрический тензор, символы Кристоффеля, параллельный перенос. Примеры.
2. Кривизна пространства, тензор Римана, его свойства. Тензоры Риччи, Эйнштейна, Вейля.
3. Пространство с симметрией. Вектора Киллинга. Коммутатор векторных полей, теорема Фробениуса. Максимально-симметричные подпространства.
4. Системы отсчета. Введение в хронометрически-инвариантные величины. Интервал времени, метрика 3-пространства. Сила тяжести, сила Кориолиса.
5. Уравнение движения точечных частиц, переход к ньютоновскому пределу. Уравнения электромагнитного поля.
6. Действие для гравитационного поля. Метод Паллатини. Уравнения Эйнштейна. Тензор энергии-импульса. Закон сохранения энергии-импульса. Примеры.
7. Уравнения гидродинамики. Тензор энергии-импульса идеальной жидкости. Закон сохранения энтропии. Примеры.
8. Уравнения гидродинамики вязкой жидкости. Формализмы Ландау и Еккарта.

Тема 1.2. Сферически-симметричное пространство.

1. Сферически-симметричное пространство-время. Уравнения Эйнштейна. Использование пакета Maxima для вычисления тензоров Риччи, Эйнштейна. Уравнение Оппенгеймера-Волкова. Примеры.
2. Метрика Шварцшильда. Движение частиц в метрике Шварцшильда, классификация орбит. Отклонение луча света в слабом гравитационном поле, эффект Шапиро, смещение перигелия Меркурия.
3. Метрика Шварцшильда. Движение по радиальным геодезическим. Горизонт событий. Метрика Леметра.
4. Диаграмма Пенроуза для метрики Шварцшильда, R и T области, черные и белые дыры. Мост Эйнштейна-Розена.
5. Метрика электрически заряженной черной дыры. Диаграмма Пенроуза.
6. Синхронная система отсчета. Коллапс пылевидной сферы. Проблема гладкости метрических коэффициентов.
7. Метрика де-Ситтера. Статическое решение и экспоненциально расширяющееся пространство. Диаграмма Пенроуза мира де-Ситтера.

Тема 1.3. Гравитационные волны. Метрика Керра.

1. Слабые гравитационные поля, линеаризация уравнений Эйнштейна. Слабые стационарные поля, метрика медленно вращающегося тела. Плоские гравитационные волны. Движение частицы в плоской гравитационной волне. Излучение гравитационных волн. Проблемы детектирования гравитационных волн.

2. Псевдотензор-энергии импульса гравитационного поля. Суперпотенциалы. Проблема энергии гравитационного поля. Теорема Меллера. Потеря энергии двойным пульсаром.

3. Метрика Керра. Горизонт событий, эргосфера. Движение частиц в метрике Керра. Возможность извлечения энергии из вращающейся черной дыры.

4. Диаграмма Пенроуза для метрики Керра. Кольцевая сингулярность, замкнутые времениподобные кривые.

Тема 1.4. Введение в ADM-формализм.

1. Кинематически-инвариантные величины. 3+1 расщепление пространства времени. Тензор внешней кривизны, его связь с метрикой. Производная Ли.

2. 3+1 формулировка уравнений Эйнштейна. Соотношения Гаусса-Кодацци и Кодацци-Майнарди.

3. Динамические уравнения для гравитационного поля. Проблема начальных условий для уравнений Эйнштейна. Гамильтонова формулировка ОТО.

5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Технология процесса обучения по дисциплине «Сильные гравитационные поля в астрофизике» включает в себя следующие образовательные мероприятия:

- а) аудиторные занятия (лекционно-семинарская форма обучения);
- б) самостоятельная работа студентов;
- г) контрольные мероприятия в процессе обучения и по его окончанию;
- д) зачет по окончании изучения дисциплины.

Аудиторные занятия проводятся в интерактивной форме с использованием мультимедийного обеспечения и технологии проблемного обучения.

Презентации позволяют качественно иллюстрировать практические занятия схемами, формулами, чертежами, рисунками. Кроме того, презентации позволяют четко структурировать материал занятия.

Электронная презентация позволяет отобразить процессы в динамике, что улучшает восприятие материала.

Самостоятельная работа организована в соответствии с технологией проблемного обучения и предполагает следующие формы активности:

- самостоятельная проработка учебно-проблемных задач, выполняемая с привлечением основной и дополнительной литературы;
- поиск научно-технической информации в открытых источниках с целью анализа и выявления ее ключевых особенностей.

Основные аспекты применяемой технологии проблемного обучения:

- постановка проблемных задач отвечает целям освоения дисциплины «Сильные гравитационные поля в астрофизике» и формирует необходимые компетенции;
- решаемые проблемные задачи стимулируют познавательную деятельность и научно-исследовательскую активность аспирантов.

6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

6.1. Текущий контроль

Текущий контроль успеваемости, т.е. проверка усвоения учебного материала, регулярно осуществляется на протяжении семестра. Текущий контроль знаний аспирантов организован как выступление на семинарах.

6.2. Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация завершает изучение дисциплины «Сильные гравитационные поля в астрофизике». Форма аттестации – зачет в письменной или устной форме.

Контрольные вопросы к зачету:

1. Тензора в произвольной системе координат. Метрический тензор, символы Кристоффеля, параллельный перенос.
2. Кривизна пространства, тензор Римана, его свойства. Тензоры Риччи и Эйнштейна.
3. Вектора Киллинга. Максимально-симметричные подпространства.
4. Системы отсчета. Интервал времени, метрика 3-пространства. Сила тяжести, сила Кориолиса.
5. Уравнение движения точечных частиц. Уравнения электромагнитного поля.
6. Действие для гравитационного поля. Уравнения Эйнштейна.
7. Тензор энергии-импульса. Закон сохранения энергии-импульса.
8. Уравнения гидродинамики для идеальной жидкости. Закон сохранения энтропии.
9. Уравнения гидродинамики вязкой жидкости. Формализмы Ландау и Еккарта.

10. Сферически-симметричное пространство-время. Уравнение Оппенгеймера-Волкова.
11. Метрика Шварцшильда. Движение частиц в метрике Шварцшильда, классификация орбит. Отклонение луча света в слабом гравитационном поле, эффект Шапиро, смещение перигелия Меркурия.
12. Метрика Шварцшильда. Движение по радиальным геодезическим. Горизонт событий. Метрика Леметра. Диаграмма Пенроуза для метрики Шварцшильда.
13. Метрика электрически заряженной черной дыры. Диаграмма Пенроуза.
14. Метрика де-Ситтера. Диаграмма Пенроуза мира де-Ситтера.
15. Синхронная система отсчета. Коллапс пылевидной сферы.
16. Уравнения Эйнштейна для слабых гравитационных полей. Гравитационные волны.
17. Излучение гравитационных волн. Потеря энергии двойным пульсаром.
18. Псевдотензор энергии-импульса гравитационного поля.
19. Метрика Керра. Движение частиц в метрике Керра.
20. Диаграмма Пенроуза для метрики Керра.
21. 3+1 расщепление пространства времени. Тензор внешней кривизны.
22. Соотношения Гаусса-Кодацци и Кодацци-Майнарди.
23. 3+1 формулировка уравнений Эйнштейна.

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

7.1. Основная литература

1. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц т.II "Теория поля" 7-е изд. Л.Д. Ландау – 1988. М. «Наука».
2. В.А.Фок "Теория пространства, времени и тяготения" В.А.Фок – 2015. М. изд. «УРСС».
3. С. Вейнберг "Гравитация и космология" С. Вейнберг – 2000. Волгоград «Платон»
4. А.А.Логунов "Лекции по теории относительности и гравитации" А.А.Логунов – 2005. М. «Наука».
5. А.Лайтман, В.Пресс, Р.Прайс, С.Тюкопольски "Сборник задач по теории относительности и гравитации" А.Лайтман – 1979. М. «Мир».
6. П.К. Рашевский "Риманова геометрия и тензорный анализ" П.К. Рашевский – 2003. М. изд. «УРСС».

7.2. Дополнительная литература

1. Ю.С. Владимиров "Классическая теория гравитации" Ю.С. Владимиров – 2009. М.

изд. «УРСС».

2. M.Alcubierre "Introduction to 3+1 numerical relativity" M.Alcubierre – 2008. New York. Oxford University Press.

3. Н.В. Мицкевич "Физические поля в общей теории относительности" Н.В. Мицкевич – 1969. М. «Наука»

4. А.Л.Зельманов "Хронометрические инварианты" А.Л.Зельманов – 2006.

7.3. Интернет ресурсы:

Отечественные журналы:

1. Астрономический вестник (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7665;
2. Астрономический журнал (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7666;
3. Письма в астрономический журнал (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=79414;
4. Геомагнетизм и аэрномия (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7765;
5. Исследование Земли из космоса (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7842;
6. Космические исследования (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7859;
7. Вестник МГУ. Часть 3. Физика, астрономия (<http://vmu.phys.msu.ru/toc/list>;
8. Проблемы передачи информации

(http://www.mathnet.ru/php/journal.phtml?jrnid=ppi&wshow=details&option_lang=rus;

9. Земля и Вселенная (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7808;

Отечественные журналы в переводе:

1. Astronomy Reports (<http://link.springer.com/journal/11444>
2. Astronomy Letters (<http://www.springerlink.com/content/119837/>;
3. Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory

(<http://link.springer.com/journal/11989>;

4. Cosmic Research (<http://link.springer.com/journal/10604>;
5. Earth and Space Science

(<http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/agu/journal/10.1002/%28ISSN%292333-5084/>;

6. Geomagnetism and Aeronomy (<http://link.springer.com/journal/11478>;
7. Problems of Information Transmission (<http://link.springer.com/journal/11122>
8. Solar System Research (<http://link.springer.com/journal/11208>;
9. Radiophysics and Quantum Electronics

(<http://www.springer.com/astronomy/journal/11141>;

Международные журналы:

Gravitation and Cosmology (<http://link.springer.com/journal/12267>;

Иностранные журналы:

1. Astronomy and Astrophysics (<http://www.aanda.org/>;

2. Astronomy and Astrophysics Review (<http://link.springer.com/journal/159>;
3. Astronomy & Geophysics (<http://astrogeo.oxfordjournals.org/>;
4. Astroparticle Physics (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09276505/23/1>;
5. Astrophysics (<http://link.springer.com/journal/10511>;
6. Astrophysics and Space Science (<http://link.springer.com/journal/10509>;
7. Classical and Quantum Gravity (<http://iopscience.iop.org/0264-9381/>;
8. Computational Astrophysics and Cosmology (<http://link.springer.com/journal/40668>
9. Experimental Astronomy (<http://link.springer.com/journal/10686>;
10. Journal of Astrophysics and Astronomy (<http://link.springer.com/journal/12036>;
11. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (<http://iopscience.iop.org/1475-7516/>;
12. Microgravity Science and Technology (<http://link.springer.com/journal/12217>;
13. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (<http://mnras.oxfordjournals.org>
(<http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1111/%28ISSN%291365-2966>;
14. Monthly Notices Letters of the Royal Astronomical Society
(<http://mnrasl.oxfordjournals.org/>;
15. Nature (<http://www.nature.com/nature/index.html>;
16. Planetary Science (<http://link.springer.com/journal/13535>;
17. Research in Astronomy and Astrophysics (<http://iopscience.iop.org/1674-4527/>;
18. Space Science Reviews (<http://link.springer.com/journal/11214>;
19. Space Weather
(<http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/agu/journal/10.1002/%28ISSN%291542-7390/>
20. Solar Physics (<http://link.springer.com/journal/11207>;
21. The Astronomical Journal (<http://iopscience.iop.org/1538-3881>;
22. The Astrophysical Journal (<http://iopscience.iop.org/0004-637X/>;
23. The Astrophysical Journal Letters (<http://iopscience.iop.org/2041-8205/>;
24. The Astrophysical Journal. Supplement series (<http://iopscience.iop.org/0067-0049/>

8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Лекционная аудитория
2. Мультимедийный проектор и (или) LCD панель большого размера.
3. Персональный компьютер
4. Учебно-научная лаборатория, оборудованная установкой дифракции быстрых электронов на отражение.
5. Учебно-научная лаборатория, оборудованная аппаратурой для измерения теплопроводности и теплоемкости твердых тел.

6. Учебно-научная лаборатория, оборудованная аппаратурой для измерения магнитных свойств твердых тел

Программа разработана:
главный научный сотрудник-заведующий
сектором теоретической физики,
д-р физ.-мат. наук, Яковлев Д.Г.