

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»**

УТВЕРЖДЕНО

**Директор физтех-школы физики
и исследований им. Ландау
А.В. Рогачев**

	Рабочая программа дисциплины (модуля)
по дисциплине:	Активные ядра галактик: теория и ключевые параметры
по направлению:	Прикладные математика и физика
профиль подготовки:	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра проблем физики и астрофизики
курс:	1
квалификация:	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 60 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: Е.Е. Нохрина, д-р физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры проблем физики и астрофизики 26.02.2025

Аннотация

Курс посвящен изучению активных ядер галактик (АЯГ). Рассматривается теория активности этих объектов: формирование и распространение релятивистских выбросов, аккреция, излучение и современные методы оценки параметров.

Будут рассмотрены уравнения, описывающие стационарные осесимметричные релятивистские течения в астрофизике и подходы к их решению. Основные модели ускорения плазмы и энерговыделения АЯГ. Методы оценки ключевых параметров АЯГ, основанные на теоретическом моделировании и наблюдениях.

1. Цели и задачи

Цель дисциплины

1. Знакомство с современным состоянием в теории, описывающей активные ядра галактик.
2. Изучение современных методов и подходов описания АЯГ и оценок их ключевых параметров.

Задачи дисциплины

1. Знакомство с основными моделями описания аккреции на сверхмассивную черную дыру и запуска релятивистских струйных выбросов, их коллимации, ускорения плазмы и излучения.
2. Освоение методов теоретической оценки параметров АЯГ: мощность выброса, оценки величины и структуры магнитного поля, излучающей плазмы.
3. Знакомство с методами оценки ключевых параметров по данным наблюдений, в том числе планируемыми программами наблюдений.

2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

1. Основные методы теоретического моделирования релятивистских струйных выбросов.
2. Модели аккреции и коллимации джетов, ускорения плазмы.
3. Классификацию АЯГ и унифицированную модель.
4. Формирование излучения джетов.
5. Основной источник энерговыделения джетов.
6. Ограничения современных моделей и методов оценок параметров.
7. Основные проблемы моделирования АЯГ.

уметь:

1. Использовать подходы моделирования структуры джетов.
2. Проводить вычисления синхротронного спектра с самопоглощением для простейших распределений физических величин.
3. Классифицировать тип АЯГ по наблюдаемым параметрам.
4. Применять эффект видимого сдвига ядра для оценок параметров джетов.
5. Применять методы оценки масс черных дыр.

владеть:

1. Методами аналитического моделирования структуры выбросов и их излучения.
2. Методами оценки основных параметров АЯГ по данным наблюдений и моделированию.

4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Историческое введение, основные компоненты источника.	4			5
2	Магнитогидродинамическое (МГД) описание: основные уравнения.	4			5
3	МГД описание: интегралы движения, основные параметры модели, их связь с параметрами системы.	4			5
4	Коллимация: магнитное поле, внешняя среда.	4			5
5	Структура электромагнитного поля в релятивистском струйном выбросе.	4			5
6	Ускорение плазмы: магнитогидродинамическое, “нагрев” излучающей плазмы.	4			5
7	Аккреция.	4			5
8	Унифицированная модель АЯГ, знакомство с классификацией.	4			5
9	Излучение аккреционного диска и выброса: основы.	4			5
10	Излучение выброса: SED.	4			5
11	Методы и результаты оценки массы и спина сверхмассивной черной дыры.	4			5
12	Метод видимого сдвига ядра: оценки величины магнитного поля и концентрации излучающей плазмы.	4			5
13	Методы оценок скоростей в выбросе.	4			5
14	Обзор основных проблем.	4			5
15	Мощность выброса, модели Блэндфорда–Знайека и Блэндфорда–Пейна.	4			5
Итого часов		60			75
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

1. Историческое введение, основные компоненты источника.

Первые наблюдения джетов. Оценки красного смещения. Свойства источников. Сверхмассивная вращающаяся черная дыра, аккреционный диск, масштабы выбросов.

2. Магнитогидродинамическое (МГД) описание: основные уравнения.

МГД уравнения. Уравнение Грэда–Шафранова. Физический смысл отдельных членов уравнений.

3. МГД описание: интегралы движения, основные параметры модели, их связь с параметрами системы.

Интегралы движения. Основные масштабы расстояний, угловой скорости, магнитного поля, концентрации плазмы.

4. Коллимация: магнитное поле, внешняя среда.

Модели коллимации магнитным полем. Коллимация внешним давлением. Характерные масштабы давления.

5. Структура электромагнитного поля в релятивистском струйном выбросе.

Электрическое и магнитное поле в системе отсчета ядра и плазмы. Модели и наблюдения.

6. Ускорение плазмы: магнитогидродинамическое, “нагрев” излучающей плазмы.

Ускорение плазмы: численные и аналитические модели, простая картина. Возможные модели пространственного распределения излучающей плазмы. Механизмы “нагрева”.

7. Аккреция.

Обзор: модели аккреционного диска. Излучение.

8. Унифицированная модель АЯГ, знакомство с классификацией.

Классификация типов АЯГ. Унифицированная модель. Основные наблюдательные признаки.

9. Излучение аккреционного диска и выброса: основы.

Синхротронное излучение. Комптоновское излучение.

10. Излучение выброса: SED.

Модели формирования излучения. Спектральное распределение излучения.

11. Методы и результаты оценки массы и спина сверхмассивной черной дыры.

Оценки масс черных дыр. Оценки по кинематике, реверберационному картографированию, эмпирическим корреляциям. Последние данные подходы Gravity. Проблема оценок спина.

12. Метод видимого сдвига ядра: оценки величины магнитного поля и концентрации излучающей плазмы.

Видимый сдвиг ядра. Предположения. Оценки магнитного поля и концентрации плазмы в рамках разных моделей и предположений.

13. Методы оценок скоростей в выбросе.

Оценки по кинематике. Оценки по запаздыванию вспышек. Кинематика: вейвлет анализ.

14. Обзор основных проблем.

Проблемы множественности, оценок спина, пространственного распределения излучения плазмы и др.

15. Мощность выброса, модели Блэндфорда–Знайека и Блэндфорда–Пейна.

Оценки мощности выброса. Модели Блэндфорда–Знайека и Блэндфорда–Пейна. Результаты численного моделирования.

5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Стандартная учебная аудитория с доской, проектор.

6. Перечень рекомендуемой литературы

Основная литература

1. Осесимметричные стационарные течения в астрофизике [Текст] : учеб. пособие для вузов по направлению 010600 "Физика" и специальностям 010701 "Физика" и 010702 "Астрономия" / В. С. Бескин. — М. : Физматлит, 2005. — 384 с.
2. Radiative Processes in Astrophysics / G.B. Rybicki, A.P. Lightman. — Wiley-VCH, 2004. — 382 p.

Дополнительная литература

1. Relativistic Jets from Active Galactic Nuclei / R. Blandford, D. Meier, A. Readhead. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2019, V. 57, P. 467 – 509.
2. Магнитогидродинамические модели астрофизических струйных выбросов / В.С. Бескин. УФН, 2010, Т. 180. С. 1241–1278.
3. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei / C.M. Urry, P. Padovani. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1995, V. 107. P. 803.
4. Active Galactic Nucleus Black Hole Masses and Bolometric Luminosities / J.-H. Woo, C.M. Urry. ApJ, 2002, V. 579. P. 530 – 544.
5. Ultracompact jets in active galactic nuclei / A.P. Lobanov. 1998, A&A, V. 330. P. 79 – 89.

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Журналы по теоретической физике (ЖЭТФ, Physical Review Letters, Physical Review и др.), доступные через Internet научные и научно-технические журналы: <http://scitation.aip.org/>, электронный архив <http://arxiv.org/>

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

по направлению: Прикладные математика и физика
профиль подготовки: Общая и прикладная физика
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау
кафедра проблем физики и астрофизики
курс: 1
квалификация: магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Разработчик: Е.Е. Нохрина, д-р физ.-мат. наук, доцент

1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений

2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Активные ядра галактик: теория и ключевые параметры» обучающийся должен:

знать:

1. Основные методы теоретического моделирования релятивистских струйных выбросов.
2. Модели аккреции и коллимации джетов, ускорения плазмы.
3. Классификацию АЯГ и унифицированную модель.
4. Формирование излучения джетов.
5. Основной источник энерговыделения джетов.
6. Ограничения современных моделей и методов оценок параметров.
7. Основные проблемы моделирования АЯГ.

уметь:

1. Использовать подходы моделирования структуры джетов.
2. Проводить вычисления синхротронного спектра с самопоглощением для простейших распределений физических величин.
3. Классифицировать тип АЯГ по наблюдаемым параметрам.
4. Применять эффект видимого сдвига ядра для оценок параметров джетов.
5. Применять методы оценки масс черных дыр.

владеть:

1. Методами аналитического моделирования структуры выбросов и их излучения.
2. Методами оценки основных параметров АЯГ по данным наблюдений и моделированию.

3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

С целью контроля освоения обучающимися учебного материала проводится устный опрос в начале занятия по теме прошлого занятия.

4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

1. Основные уравнения релятивистской осесимметричной стационарной МГД. Интегралы движения.
2. Классификация АЯГ.
3. Формирование спектрального распределения излучения АЯГ.
4. Спектр синхротронного излучения с самопоглощением.
5. Амплитуда видимого сдвига ядра. Ее связь с величиной магнитного поля и концентрацией излучающей плазмы.

6. Вычислить компоненты электрического и магнитного поля для заданных интегралов и функции магнитного потока.
7. Получить характерный спектр синхротронного излучения для степенного распределения электронов по энергиям.
8. Получить зависимость положения с оптической толщиной, равной единице, от частоты наблюдения.
9. Оценить массу черной дыры по данным наблюдений в линиях.
10. Получить формулу для оценки магнитного поля по измеренному видимому сдвигу ядра.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Классификация АЯГ.
2. Синхротронное излучение от электронов со степенным распределением по энергиям.

Билет 2.

1. Модели аккреционного диска.
2. Коэффициенты излучения и поглощения синхротронного излучения.

Критерии оценивания

Оценка "отлично" (10 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка "отлично" (9 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка "отлично" (8 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочётами.

Оценка "хорошо" (7 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка "хорошо" (6 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка "хорошо" (5 баллов) выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка "удовлетворительно" (4 балла) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка "удовлетворительно" (3 балла) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка "неудовлетворительно" (2 балла) выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка "неудовлетворительно" (1 балл) выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Экзамен проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 60 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.