

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(САО РАН)

ПРИНЯТО

решением Ученого совета

САО РАН № 445

от «06» мая 2026 г.

УТВЕРЖДАЮ

И.о. Директора САО РАН,

« 28 » августа 2026 г.



РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

по дисциплине «НАБЛЮДАТЕЛЬНАЯ РАДИОАСТРОНОМИЯ»

Научная специальность 1.3.1. ФИЗИКА КОСМОСА, АСТРОНОМИЯ

Объем занятий: Итого 72 ч. 1 1/3 нед.

Из них:

Лекций 28 ч.

Практических занятий 24 ч.

Самостоятельной работы 20 ч.

п. Нижний Архыз 2026

Рабочая программа составлена в соответствии с федеральными государственными требованиями, утвержденными приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 20 октября 2021 года № 951, утвержденной Программой кандидатского экзамена по специальной дисциплине, соответствующей научной специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия, принятой на заседании Ученого совета САО РАН.

Авторы: доктор физ.-мат. наук, заведующий лабораторией радиоастрофизики С.А. Трушкин.

1. Общие положения

Базовая дисциплина «Наблюдательная радиоастрономия» посвящена методам, предмету исследования и результатам радиоастрономии. Актуальность данного курса определяется существенным продвижением в развитии инструментов и методов радиоастрофизики. Уже к 1990-м годам исследователи реликтового излучения и радиопульсаров были награждены четырьмя Нобелевскими премиями по физике. Огромный успех космических экспериментов WMAP и PLAKCK полностью изменил наше представление о эволюции Вселенной, а космологическая теория впервые получила эпитет «точная», что еще в 80е годы 20 века казалось фантастикой.

В результате курса лекций аспирант познакомится с историей развития радиоастрономии, прослушает обзор о современных радиоастрономических методах исследования небесных объектов, узнает о принципах работы приемников радиоизлучения и радиотелескопов. Аспирант получит представление с теорией механизмов радиоизлучения и исследованиями объектов, которые наблюдаются на радиотелескопах, в Солнечной системе, в нашей Галактике и за ее пределами. Упор в данном курсе делается на методах исследования галактических и внегалактических объектов: активных звезд, микроквazarов, радиогалактик, квазаров. Современные данные о свойствах реликтового излучения вносят основополагающий вклад в современную космологию.

Дисциплина «Наблюдательная радиоастрономия» – 2.1.9. относится к элективным дисциплинам образовательного компонента.

Предшествующими курсами, на которых непосредственно базируется дисциплина «Наблюдательная радиоастрономия», являются базовые дисциплины бакалавриата, магистратуры и специалитета и дисциплина базовой части 2.1.2. «Иностранный язык».

Дисциплина «Наблюдательная радиоастрономия» логически, содержательно и методически связана с последующими компонентами программы аспирантуры – 1.1. «Научная деятельность, направленная на подготовку диссертации на соискание научной степени кандидата наук к защите», 1.2. «Подготовка публикаций и (или) заявок на государственную регистрацию результатов интеллектуальной деятельности, предусмотренных абзацами первым и третьим пункта 12¹ Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. N 842», 2.1.3. «Физика космоса, астрономия», 2.1.15. (Ф) «Современная галактическая радиоастрономия», 2.2. «Практика», 3. «Итоговая аттестация».

2. Планируемые результаты освоения дисциплины, соотнесённые с планируемыми результатами освоения программы

№ п/п	Результаты освоения дисциплины	Результаты освоения программы
Аспирант должен знать:		
1.	принцип работы и основные характеристики радиотелескопа (эффективная площадь, угловое разрешение, диаграмма направленности).	РД-1, РД-2
2.	методы радиоастрономических исследований в области радиоинтерферометрии (синтез изображений);	РД-1, РД-2
3.	космические радиоисточники, принципы обнаружения радиоисточников (отношение сигнал/шум, вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения);	РД-1, РД-2, РД-3, РД-4, РД-5
4.	методы анализа изображений;	РД-1, РД-2
5.	основные компоненты радиоизлучения и их вклад на различных радиочастотах;	РД-1, РД-2
6.	основные механизмы радиоизлучения; последние достижения в наблюдательной радиоастрономии и космологии.	РД-1, РД-2, РД-3
Аспирант должен уметь:		
6.	объяснять наблюдаемые свойства радиоастрономического сигнала на основе многокомпонентного разложения с учетом вклада атмосферы, Солнечной системы, Галактики, внегалактических радиоисточников и космического микроволнового фона;	РД-1, РД-2, РД-4, РД-5
7.	вычислять распределение энергии в спектре радиоисточника и угловые спектры мощности протяженного излучения; строить простейшие модели радиоизлучающих областей и точечных источников на небесной сфере;	РД-1, РД-2
8.	излагать полученные результаты в виде разделов статьи.	РД-1, РД-2, РД-4
Аспирант должен владеть:		
9.	современными методами и программным обеспечением анализа радиоастрономических данных, включающими калибровку наблюдательных данных, получение физических характеристик объектов, моделирование механизмов излучения, графический анализ данных;	РД-1, РД-2, РД-4, РД-5
10.	системой подготовки статей LaTeX.	РД-4

3. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 1 1/3 недели (72 часа).

№ п/п	Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу аспирантов и трудоемкость (в часах)			Формы контроля успеваемости
		Лекции	Практ. занятия	Самостоят. работа	
1.	Радиотелескопы (отклик антенны на радиоизлучение, формирование изображения, преобразование Фурье, теоремы отсчетов). Параметры радиотелескопа (Главный и боковые лепестки, разрешение). Типы радиотелескопов (классификация, одиночные зеркала и интерферометры). Радиотелескопы широкого назначения. Антенна Карла Янского. Антенна Гроута Ребера. Интерферометр Мартина Райла. Кембриджский интерферометр. Радиотелескоп Энтони Хьюиша. Интерферометр АМІ. Радиотелескоп РАТАН-600. Радиотелескопы обсерваторий Метсахови, Эффельсберг, Оуэнс-Вэлли (Owens Valley Radio Observatory, OVRO). Большая антенная решетка (Very Large Array - VLA, США). Радиотелескопы FAST и Аресибо. Вестерборкский радиотелескоп. Телескоп в Грин Бэнке. Низкочастотная решетка LOFAR. Атакамская большая миллиметровая /субмиллиметровая решетка (ALMA). Интерферометр площадью квадратный км (SKA). Специализированные радиотелескопы для исследования реликтового излучения. Антенна Пензиаса и Вильсона. Спутник COBE. Интерферометр DASI (Degree Angular Scale Interferometer). Интерферометр CBI (Cosmic Background Imager). Баллонный инструмент BOOMERanG. Баллонный инструмент MAXIMA. Атакамский космологический телескоп. Южный полярный телескоп (SPT). Космическая миссия WMAP. Космическая миссия Planck.	4		2	

№ п/п	Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу аспирантов и трудоемкость (в часах)			Формы контроля успеваемости
2.	Интерферометрический синтез в радиоастрономии. Простейший интерферометр. Восстановление изображений. Алгоритм CLEAN. Метод максимальной энтропии.	2	4	1	
3.	Приемники радиоизлучения. Основные схемы радиометров. Шумовая температура и чувствительность радиометров.	2	4		
4.	Наблюдения в радиоконтинууме. Радиоизлучение атмосферы. Обработка данных и их интерпретация.	2	8	6	текущий контроль
5.	Солнечная и звездная радиоастрономия (солнечная активность, солнечный ветер, фотосфера, хромосфера, корона).	2			
6.	Радиоизлучение Луны и планет.	2			
7.	Микрокварзы — двойные рентгеновские звезды со струйными выбросами. Радиогалактики и квазары. Исследования радиогалактик в России. Ярчайшие радиогалактики (Лебедь А, Центавр А, Дева А). Основные каталоги радиоисточников. Базы данных радиоисточников (CATS, NED, SIMBAD). Механизмы излучения и радиоспектры галактик. Морфологические особенности радиогалактик (Ядро, протяженные структуры, джеты, горячие пятна). Центральная машина радиогалактик и феномен сверхмассивных ЧД. Объединенная модель (квазары и радиогалактики). Эволюция излучения радиогалактик. Космологическая эволюция радиогалактик/квазаров. Поиск далеких радиогалактик (отождествление, спектральный индекс). Обзоры по исследованию радиогалактик (от 3CR до VLASS). Многоволновые свойства активных ядер галактик. Интерпретация наблюдаемой переменности нетеплового излучения.	3	8	4	текущий контроль
8.	Подсчеты радиоисточников. Соотношение K-z для радиогалактик. Скучивание радиоисточников. Размер радиогалактик. Иерархическая модель и проблема появления сверхмассивных черных дыр. Эффект	3			

№ п/п	Наименование разделов и тем дисциплины, их краткое содержание	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу аспирантов и трудоемкость (в часах)			Формы контроля успеваемости
	Сюняева-Зельдовича.				
9.	Современная космологическая модель. Расширяющаяся Вселенная. Фундаментальные наблюдательные данные (реликтовое излучение, распределение видимой материи, стандартные свечи, легкие элементы). Состав материи Вселенной. Космологическая модель и ее параметры. Этапы эволюции Вселенной: очень ранняя Вселенная, ранняя Вселенная, эпоха доминирования материи, эпоха доминирования темной энергии. Инфляция.	4		1	
10.	Реликтовое излучение. Рекомбинация водорода. Искажение спектра РИ в ходе рекомбинации. Ре-ионизация водорода. Типы начальных возмущений (скалярные, векторные и тензорные моды). Модуляция спектра возмущений плотности. Первичная анизотропия (эффекты Сакса-Вольфа, Силка и Доплера). Вторичная анизотропия (тепловой и кинематический эффекты Сюняева-Зельдовича, эффект реионизации). Зависимость углового спектра мощности $C(l)$ от параметров космологической модели. Анализ данных микроволнового фона. Разделение компонент. Гармонический анализ на сфере (пикселизация, низкие и высокие гармоники). Угловой спектр мощности и статистика сигнала. Базы данных карт протяженного излучения (архивы WMAP и Planck, виртуальный телескоп SkyView). Первичная негауссовость. Статистическая анизотропия. Основные тесты на гауссовость (биспектр, функционалы Минковского, фазовый анализ, сферические вейвлеты).	4		6	текущий контроль итоговый зачет
Итого:		28 ч	24 ч	20 ч	72 ч

4. Наименование и содержание практических занятий

№ п/п	Наименование работы	Кол-во часов	Форма проведения
1.	Тема 2. Интерферометрический синтез в радиоастрономии. Методы и примеры.	4	разноуровневые индивидуальные задания, опрос

2.	Тема 3. Приемники радиоизлучения. Схемы и параметры.	4	разноуровневые индивидуальные задания, опрос
3.	Тема 4. Наблюдения в непрерывном радиоспектре. Радиоизлучение атмосферы. Обработка данных и их интерпретация	8	разноуровневые индивидуальные задания, опрос
4.	Тема 7. Радиогалактики и квазары. История, современные модели активности ядер галактик, результаты исследований в мире, России и САО. Анализ наблюдательных данных. Построение непрерывных радиоспектров. Отождествление радиоисточников в радио, оптическом, инфракрасном и рентгеновском диапазонах.	8	разноуровневые индивидуальные задания, опрос
Итого:		24 ч	

5. Текущий контроль успеваемости и промежуточная аттестация

5.1. Форма проведения текущего контроля успеваемости

Текущий контроль осуществляется по результатам работы на практических занятиях. Промежуточный контроль – быстрый опрос на лекциях.

Текущий контроль работы аспирантов проводится преподавателем, ведущим занятия по дисциплине.

Итоговый зачет проводится в рамках промежуточной аттестации.

Перед итоговым зачетом по дисциплине аспиранту необходимо полностью выполнить практические работы по дисциплине. При наличии задолженностей по практическим работам аспирант к итоговому зачету не допускается.

5.2. Форма проведения промежуточной аттестации

Промежуточная аттестация проводится в форме итогового зачета по дисциплине. Итоговый зачет по дисциплине предусмотрен в устной форме.

Оценивание знаний обучающегося происходит по результатам устного ответа на два вопроса из перечня. На подготовку к ответу отводится 30 минут. При подготовке к ответу аспиранту предоставляется право пользования программой дисциплины.

Итоговый контроль работы аспирантов проводится преподавателем, ведущим занятия по дисциплине.

При сдаче итогового зачета по дисциплине отметка «зачет» выставляется, если аспирант демонстрирует знание основного материала, излагает его, применяет теоретические положения при решении практических задач.

Отметка «незачет» выставляется в случае, если аспирант не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки в изложении основного материала, не может увязывать теорию с практикой.

5.3. Вопросы к зачету

1. Какая классификация радиотелескопов существует?
2. Каков принцип действия радиоинтерферометра?
3. Чем определяется диапазон принимаемых волн и разрешение радиотелескопа?
4. Что такое «крутой» радиоспектр радиоисточника?
5. Какая классификация радиоисточников существует?
6. С какими оптическими объектами отождествляются радиоисточники?
7. Почему далекие радиогалактики могут помочь в поиске протоскоплений?
8. Какие факторы уменьшают вероятность правильного отождествления

радиоисточников с оптическими кандидатами?

9. Компоненты плотности Вселенной и текущая космологическая модель, ее наблюдательная основа.

10. Что такое спектр мощности карты излучения?

11. Какое количество пятен на сфере образует мультиполь с номером L ?

12. На каких мультиполях вклад точечных источников в спектр мощности становится существенным?

13. Почему при вычитании дипольной компоненты не меняется остальной спектр?

14. Сколько пиков на спектре мощности СМВ в модели Вселенной Λ CDM до $L < 1000$?

6. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

6.1. Перечень основной литературы, необходимой для освоения дисциплины

1. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н., Радиотелескопы и радиометры (М.: Наука, 1973).

2. Верхованов О.В., Парийский Ю.Н., Радиогалактики и космология, (М.:Физмалит, 2009).

3. Насельский П.Д., Новиков Д.И., Новиков И.Д., Реликтовое излучение (Изд-во Наука, 2003).

4. Горбунов Д.С., Рубаков В.А., Введение в теорию ранней Вселенной:3. Космологические возмущения. Инфляционная теория. (М.:КРАСАНД, 2010).

5. Галактическая и внегалактическая радиоастрономия, под ред. Верскера и Келлермана. (Изд-во Мир, 1976) .

6. Лукаш В.Н., Михеева Е.В., Физическая космология. (М.:ФизМатЛит, 2010).

7. Краус Д. Радиастрономия, МИР, 1972.

8. Коллектив авторов. «Наблюдательная и теоретическая космология», Труды Летней школы Фонда Дмитрия Зимина «Династия» (7-ой Школы современной астрофизики, САО РАН, Нижний Архыз, 2011) (М.:URSS, 2012), с.381-392.

9. Тегмарк М. Наша Математическая Вселенная, АСТ, 2016

10. Уилсон Т. И др. Инструменты и методы радиоастрономии, ФИЗМАТЛИТ, 2012.

6.2. Перечень дополнительной литературы, рекомендуемой для освоения дисциплины

1. В.Н. Лукаш, В.А. Рубаков «[Темная энергия: мифы и реальность](#)» УФН, 178 301–308 (2008)

2. О.В. Верхованов, А.Г. Дорошкевич «[Системы пикселизации неба для анализа протяжённого излучения](#)» УФН, 183 849–862 (2013)

3. О.В. Верхованов «[Космологические результаты космической миссии "Планк". Сравнение с данными экспериментов WMAP и ВІСЕР2](#)» УФН 186 3–46 (2016)

4. В.Л. Гинзбург «[Астрофизика космических лучей \(история и общий обзор\)](#)» УФН 166 169–183 (1996)

5. В.Ф. Муханов «[Квантовая Вселенная](#)» УФН 186 1117–1125 (2016)

6. А.М. Черепашук «[Наблюдения звёздных и сверхмассивных чёрных дыр](#)» УФН 186 778–789 (2016)

6.3. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

– Сеть Астронет: <http://www.astronet.ru/db/msg/1169494/index.html#Contents>

– База данных по внегалактическим объектам: <http://ned.ipac.caltech.edu/>

– Астрофизическая информационная система ADS - <https://ui.adsabs.harvard.edu/>

- База данных объектов за пределами Солнечной системы SIMBAD <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>
- Звездные каталоги VIZIER - <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>
- Цифровой обзор неба DSS - <http://archive.eso.org/dss/dss>
- Слоановский цифровой небесный обзор SDSS - <http://www.sdss.org>

7. Перечень информационных технологий, включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем, профессиональных баз данных

- ОС Linux;
- система анализа континуальных данных PATAH-600 FADPS ();
- пакет анализа данных реликтового излучения GLESP ().

8. Материально-техническое обеспечение

- экран;
- мультимедийный проектор;
- компьютер;
- выход в Интернет и сеть CAO РАН в лабораторных корпусах;
- сервер общего доступа для обработки и хранения данных;
- текстовые и электронные ресурсы Научной библиотеки CAO РАН;
- оборудование научно-исследовательских лабораторий CAO РАН.

9. Особенности освоения дисциплины лицами с ограниченными возможностями здоровья

Освоение дисциплины лицами с ограниченными возможностями здоровья осуществляется на основе адаптированной рабочей программы с использованием специальных методов обучения и дидактических материалов, составленных с учетом особенностей психофизического развития, индивидуальных возможностей и состояния здоровья таких аспирантов.

Адаптированная рабочая программа входит в структуру адаптированной программы аспирантуры, которая разрабатывается под потребности конкретного обучающегося по его личному заявлению или решению комиссии по определению вида инклюзии и условий обучения сразу после зачисления такого аспиранта на 1 курс.

Порядок разработки адаптированной рабочей программы определяется локальным нормативным актом.