

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ, АСТРОМЕТРИИ И ГРАВИМЕТРИИ

УТВЕРЖДАЮ

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Наименование дисциплины:

**РАДИОАСТРОНОМИЯ**

Уровень высшего образования:

**Специалитет**

Специальность:

**03.05.01 Астрономия**

Направленность (профиль)/специализация образовательной программы:

Общая специальность

Форма обучения:

Очная

Москва 2023

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по специальности 03.05.01 «Астрономия», утвержденным приказом МГУ от 30.12.2020 г. № 1381.

Год (годы) приема на обучение \_\_\_\_\_

**Авторы–составители:**

1. Д.ф.-м.н., профессор, профессор РАН Пширков Максим Сергеевич, кафедра небесной механики, астрометрии и гравиметрии физического факультета МГУ

Заведующий кафедрой

Д.ф.-м.н. профессор Жаров Владимир Евгеньевич, , заведующий кафедрой небесной механики, астрометрии и гравиметрии

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины**

В курсе "Радиоастрономия" последовательно излагаются теоретические основы предмета, результаты астрономических наблюдений в радиодиапазоне и их интерпретацию. Подробно рассматриваются методы и приборы радиоастрономических наблюдений. Курс начинается с краткого исторического обзора предмета. Затем рассматривается устройство радиотелескопов от антенны до приёмников, в том числе и специализированных поляриметров и спектрометров. Две лекции курса посвящены методам радиоинтерферометрии, в том числе и радиоинтерферометрии с сверхдлинной базой. В курсе содержатся базовые теоретические знания о механизмах генерации радиоизлучения в космических условиях: тормозной, магнитотормозном, синхротронным, плазменным, излучении в линиях. Рассматриваются источники в радиодиапазоне: в Солнечной системе -- Солнце и планеты, в Галактике -- диффузный фон, оболочки сверхновых и пульсары, внегалактические -- активных ядра галактик и других. Отдельно обсуждаются быстропеременные источники и транзиенты, прежде всего быстрые радиовсплески.

Дисциплина реализуется на 5 курсе в 10 семестре и является дисциплиной по выбору для освоения обучающимися.

Объем дисциплины составляет 3 з.е., в том числе 68 академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 40 академических часов, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

Промежуточная аттестация по дисциплине (модулю): экзамен в 10 семестре.

### 1. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина по выбору

### 2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

ОТСУТСТВУЮТ

(указать, если требуются, в следующей последовательности: входная компетенция или входные результаты обучения или перечень освоенных ранее дисциплин (модулей), практик)

### 3. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с требуемыми компетенциями выпускников

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора (индикаторов) достижения компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с индикаторами достижения компетенций
		<p><b>Знать</b> основные инструменты и методы, используемые в радиоастрономии, методы наблюдений отдельными телескопами и с использованием метода апертурного синтеза радиоинтерферометрии. Знать о применении основных детекторов -- болометров, спектрометров, поляриметров, пульсарных машин. Знать основные процессы, приводящие в астрофизических условиях к излучению в радиодиапазоне -- синхротронное излучение, свободно-свободное излучение, тепловое излучение от объектов с большой оптической толщиной, излучение в линиях, включая линию 21 см нейтрального водорода. Представлять основные источники радиоизлучения и процессы, происходящие в них, от объектов Солнечной системы до галактических (звёзды, остатки сверхновых, межзвёздная среда, пульсары) до внегалактических (галактики и активные ядра галактик) и космологических (реликтовое излучение), включая транзиенты.</p> <p><b>Уметь</b> оперировать понятиями, принятыми в радиоастрономии. <b>Уметь</b> подсчитать поток от источника с известными свойствами и спланировать программу</p>

		<p>наблюдений, которая приведёт к детектированию источника на необходимом уровне отношения сигнала к шуму, как в случае когерентных, так и некогерентных наблюдений.</p> <p><b>Уметь</b> рассчитать наблюдаемые характеристики источника синхротронного излучения из свойств популяции релятивистских электронов и магнитного поля в нём.</p> <p><b>Уметь</b> рассчитать вклады различных ступеней тракта прибора в результирующий шум и понимать основные вклады в этот шум и как они могут быть уменьшены. <b>Уметь</b> оценить влияние атмосферы на радионаблюдения.</p> <p><b>Владеть/Иметь</b> опыт с планированием наблюдений, учётом влияния атмосферы и помеховой обстановки и методами уменьшения этих эффектов. <b>Иметь опыт</b> оценивания паразитного влияния земных источников на радионаблюдения.</p>
--	--	--

4. Объем дисциплины (модуля) составляет 3 з.е., в том числе: 68 академических часов, отведенных на контактную работу обучающихся с преподавателем, 40 академических часов, отведенных на самостоятельную работу обучающихся.

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

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),	Всего (ак.ч.)	В том числе				Самостоятельная работа обучающегося, академические часы	Форма текущего контроля успеваемости, наименование
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, академические часы <sup>1</sup>					
		Занятия	Занятия семинарского типа	Всего			

<sup>1</sup>Текущий контроль успеваемости может быть реализован в рамках занятий лекционного и(или) семинарского типа.

Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)			Семинары	Лабораторные занятия*	Практические занятия*			
<p><i>I. Историческое введение. Основы РА.</i></p> <p>Исторический обзор от Герца до SKA. Основные понятия: интенсивность, излучение абсолютно чёрного тела и законы Рэлея-Джинса и Планка. Распространение -- поглощение и излучение, уравнение переноса, закон Кирхгофа. Яркостная температура. Поляризация, параметры Стокса. Диполь Герца.</p>	12	4	4				4	
<p><i>II. Приборы и методы.</i></p> <p>Антенны, их параметры. Эффективная площадь. Теорема взаимности. Антенная температура. Примеры --короткий диполь, полуволновой диполь. Рефлекторы радиотелескопов. Диаграмма направленности --</p>	30	10	10				10	Контрольная работа

<p>одномерный и двумерные случаи. Требования к параметрам РТ. Монтировки и оптические схемы РТ. Волноводы и радиометры, уравнение радиометра. Радиометры Дикке и корреляционный. Пределы чувствительности, эффект путаницы. Простейшая схема наблюдений. АЦП. Болометры. Когерентные радиометры, супергетеродинарование. Анализаторы: спектрометры, поляриметры и др.</p> <p>Радиоинтерферометрия, двухэлементный РИ, апертурный синтез, решётки, чувствительность РИ. РСДБ.</p>								
<p>III. Механизмы излучения. Тепловое/нетепловое. Тепловое излучение пыли. Реликтовое</p>	<b>30</b>	<b>10</b>	<b>10</b>				<b>10</b>	<b>Контрольная работа</b>

<p>излучение. Свободно-свободное излучение: отдельный электрон, распределение электронов, спектр источника. Циклотронное излучение и и. кривизны.</p> <p>Синхротронное излучение: полная мощность, спектр, время высвечивания, поляризация, спектр от распределения электронов и его эволюция, самопоглощение, источники.</p> <p>Спектральные линии: рекомбинация, уравнения переноса, мазеры, молекулярные линии. Линия 21 см</p>								
<p>IV. Источники излучения и их использование в астрофизике.</p> <p>Солнце: постоянное излучение и вспышки разных типов.</p> <p>Солнечная система: Луна, Юпитер и планеты, астероиды и</p>	<b>26</b>	<b>8</b>	<b>8</b>				<b>10</b>	<b>Контрольная работа</b>



<p>радарные наблюдения. Галактика: диффузное излучение, излучение от областей НП и НІ. Остатки сверхновых: стадии эволюции, эволюция радиопотока, спектр и поляризация, ускорение частиц, магнитное поле. Пульсары: магнито-дипольное излучение, оценка возраста, светимость, индекс торможения, механизмы излучения, спектр, демография. Использование пульсарных наблюдений -- уравнение состояния ядерной материи, межзвёздная среда. Пульсарное хронометрирование -- поиск гравитационных волн и проверки теорий тяготения. Внегалактические источники: активные ядра галактик, галактики с активным звёздообразованием. Транзиенты: Солнечная система, RRATs,</p>								
--	--	--	--	--	--	--	--	--

вспышки новых и сверхновых, GRB. Быстрые радиовсплески.								
V. Будущее радиоастрономии. Мм и суб-мм. SKA.	6	2	2				2	
Промежуточная аттестация _____ экзамен (указывается форма проведения)							4	
Итого	108	34	34				40	

\*Лабораторные занятия, практические занятия относятся к практической подготовке обучающихся.

## 6. Фонд оценочных средств для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю)

### 6.1. Типовые задания и иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения:

Типовые задания для проведения промежуточной аттестации.

**1.а.** Радиолокационный спутник смотрит вниз и находится на орбите с высотой 500 км. Рабочая частота равна 90 ГГц. Предположим, что мощность излучается равномерно в полусфере. Пиковая мощность радара 1500 Вт, равномерно распределенная в полосе 1 ГГц. Если энергия не поглощается в земной атмосфере, то чему равняется пиковая плотность потока этого спутника, когда он находится непосредственно над головой? Радар работает на передачу 3% времени. Какова средняя мощность радара и соответствующую плотность потока?

**б.** Какова плотность потока,  $\nu$ , источника, который излучает мощность 1 кВт в частотный диапазон микроволн равномерно от 2,6 до 2,9 ГГц, если он помещен на Луну ( $d=3.84 \cdot 10^5$  км)? Повторите для идентичного источника, если излучение находится в оптической полосе частот от  $3 \cdot 10^{14}$  до  $8 \cdot 10^{14}$  Гц.

**с.** В ближайшем будущем на автомобилях будет доступна опция радара предупреждения столкновений, который будет работать на частоте 78,5 ГГц. При полосе пропускания 10 МГц и на расстоянии 3 м, мощность на единицу площади -  $10^{-9}$  Вт  $\text{м}^{-2}$ . Предположим, что радар излучает равномерно во всей полосе пропускания 10 МГц. Какова плотность потока этого радара на расстоянии 1 км?

Типичный большой радиотелескоп может измерять до мЯн ( $=10^{-29}$  Вт  $\text{м}^{-2}$  Гц $^{-1}$ ). На каком расстоянии такие радары будут мешать чувствительным радиоастрономическим измерениям?

**2. а.** Предположим, что максимальная наблюдаемая температура галактики составляет  $10^5$  К при длине волны 14.6 м. Если это измерять телескопом с гауссовым лепестком  $24^\circ$ , то чему равна плотность потока в лепестке? Если используется полоса пропускания 100 кГц и сигнал собирается с площади 800 кв.м., то какова полученная мощность?

**б.** Дискретный источник Cas A имеет наблюдаемую пиковую яркостную температуру  $7 \cdot 10^4$  К на 20 МГц. Если размер лепестка антенны равен  $24^\circ$ , то чему равна наблюдаемая плотность потока?

Источник имеет размер  $4'$ . Какова фактическая температура источника,  $T_{\text{source}}$ ?

**с.** Если для Юпитера  $T_b=150$  К и  $\theta=40''$ , то чему равна  $S_\nu$  на 1.4 ГГц? 115 ГГц? Повторите для НП области Ori A, с  $\theta=2.5'$ , с  $T_b=330$  К на 4.8 ГГц, и  $T_b=24$  К на 23 ГГц.

**3. а.** Если за усилителем 30 db с шумовой температурой 4 К следует смеситель с шумовой температурой 100 К, каков процентный вклад смесителя в полную шумовую температуру

**б.** Мощность на входе приемника может быть  $10^{-16}$  Вт, в то время как мощность на выходе должна быть около милливатта. Каким должен быть коэффициент усиления такого приёмника. Выразите ответ в децибелах. Предположим, что стабильность коэффициента усиления этого приемника на уровне

$10^{-3}$  за 30 секунд. Каково изменение выходной мощности? Предположим, что шум системы - 100 К, а полоса пропускания - 1 ГГц. Такая установка используется для измерения источника с пиковой температурой 0,01 К. Найдите отношение интенсивности сигнала к флуктуациям, вызванным колебаниями коэффициента усиления? Флуктуации могут быть уменьшены путем периодического сравнения с опорным источником; как часто следует переключать приемник между наблюдаемым источником и опорным для стабилизации выходной мощности?

**4.** Исследуем влияние земной атмосферы на радионаблюдения с использованием приближения одиночного слоя:

$$T_b(s) = T_b(0) + T(1 - e^{-\tau(s)})$$

Пусть оптическая глубина атмосферы,  $\tau$ , равна 0.1, и  $T=250$  К.

**а)** Что такое избыточный шум из атмосферы, и чему равно уменьшение потока от внеатмосферного источника?

**б)** Повторите для  $\tau = 0,5, 0,7, 1,0, 1,5$ .

**с)** Если  $\tau$  связано с оптической глубиной в зените по  $\tau = \tau_z / \sin(\theta)$ , то определите изменение  $\tau$  между углами возвышения  $30^\circ$  и  $20^\circ$ ,  $20^\circ$  и  $19^\circ$ ,  $20^\circ$  и  $15^\circ$

**д)** В стандартном методе определения оптической толщи измеряется излучение атмосферы на частоте 225 ГГц. Предположим, что измеренная температура равна 15 К на  $90^\circ$ , 18 К на  $60^\circ$ , 30 К на  $30^\circ$  и 42 К на  $20^\circ$ . Если температура атмосферы 250 К, чему равна  $\tau$ ?

**5.**

Пусть объект радиусом 100 м, с однородной поверхностной температурой 100 К. проходит в пределах 0,01 а.е. от Земли

**а)** Какова плотность потока этого объекта на длине волны 1,3 мм?

**б)** Пусть объект наблюдается с помощью 30-метрового телескопа, на длине волны 1,3 мм, и размером лепестка 12". Предположим, что объект имеет гауссовскую форму; вычислите наблюдаемую пиковую яркостную температуру. Поглощением в земной атмосфере пренебречь.

**с)** Этот телескоп оснащен болометром с  $NEP = 10^{-15}$  Вт Гц $^{-1/2}$  и полосой пропускания 20 ГГц; как долго нужно накапливать сигнал, чтобы обнаружить этот объект с отношением сигнал/шум 5, если эффективность главного лепестка 0.5, и поглощением в атмосфере можно пренебречь?

Примеры заданий для контрольной работы:

1. Молекулярный источник в Орионе обладает средней температурой 160 К, угловым размером 10" и расположен в 500 пк от Солнца. Средняя концентрация  $H_2$  составляет  $10^7 \text{ см}^{-3}$ .

a) Оцените размер области

b) Пусть распределение газа однородно. Найдите колоночную плотность  $N_{H_2}$ ,

c) Оцените плотность потока на длине 1,3 мм используя  $T_{\text{dust}} = 160 \text{ К}$ ,  $b = 3$ ,  $\beta=2$ . Металличность принять равной солнечной.

$$N_H = 1.55 \cdot 10^{24} S_\nu / \theta^2 \lambda^{2+\beta} / Z / Z_{\text{sol}} b T_{\text{dust}}$$

где  $S_\nu$  - плотность потока в мЯн, размер луча FWHM,  $\theta$  - в секундах дуги, длина волны  $\lambda$  в мм.

d) Используйте отношение Рэлея-Джинса, чтобы получить фактическую яркостную температуру соответствующую этой плотности потока, для источника 10". Сравните с  $T_{\text{dust}}$ .

e) На мм волнах оптическая глубина для такого излучения мала. Тогда наблюдаемая температура равна  $T = T_{\text{dust}} \tau_{\text{dust}}$ . Определите  $\tau_{\text{dust}}$ .

f) На какой длине волны  $\tau_{\text{dust}}=1$ , если  $\tau_{\text{dust}} \sim \lambda^{-4}$ ?

2. Рассмотрим спокойное Солнце.

a) Распределение концентрации электронов даётся следующим выражением

$$n_e = [1.55(r/r_0)^{-6} + 2.99(r/r_0)^{-16}] \text{ см}^{-3},$$

$r_0 = 7 \cdot 10^{10} \text{ см}$ . Определите меру эмиссии  $\int n_e^2 dl$ .

b) определите оптическую толщину в направлении на центр Солнца на частоте 100 МГц при  $T_e = 10^6 \text{ К}$ . Чему равна яркостная температура Солнца?

c) Пусть ближайший аналог Юпитера находится в 10 пк от нас и всплески от него идентичны всплескам Юпитера. Для Юпитера пиковая плотность потока  $10^5 \text{ Ян}$  (среднее расстояние до Юпитера ~800 миллионов км). Какова будет плотность потока от аналога?

3. Предположим, что галактика NGC 253 похожа на Млечный Путь. Радиус

синхротронно излучающего гало составляет 10 кпк, расстояние до NGC 253 3.4 Мпк. На  $\nu = 8.7 \text{ ГГц}$ ,  $S_\nu = 2.1 \text{ Ян}$ , а спектральный индекс  $\alpha = 0.75$  ( $S_\nu = S_0(\nu/\nu_0)^{-0.75}$ ). Для расчета поля  $B$  возьмите  $\nu_{\text{max}} = 50 \text{ ГГц}$  и  $\nu_{\text{min}} = 10 \text{ МГц}$  и оцените энергию релятивистских частиц в предположении, что выполняется условие минимальной энергии.

4. Расстояние до Суг А составляет 170 Мпк. Этот источник имеет плотность потока

$10^4 \text{ Ю}$  на 100 МГц. Предположим, что электроны излучают в диапазоне частот от 10 МГц до 50 ГГц со спектральным индексом  $\alpha = 0.75$ . Найдите мощность  $P$ , излучаемую электронами в синхротронном процесс.

Сравните с общей энергией радиополостей,  $2 \cdot 10^{57} \text{ эрг}$ , вычисленной по методу предположение о равномерном распределении энергии. Чему равно время жизни этих релятивистских электронов, если синхротронное излучение - единственный механизм потерь? Сравните это с ожидаемым временем жизни источника, если радиополости находятся на расстоянии  $7 \cdot 10^4 \text{ пк}$  друг от друга и считается, что двигаются со скоростью  $< 0.2c$ . Какой вывод можно сделать об источнике энергии электронов?

## 6.2. Шкала и критерии оценивания

*(шкала и критерии оценивания могут быть типовыми для всех дисциплин (модулей), входящих в ОПОП ВО)*

## 7. Ресурсное обеспечение

### • Перечень основной и дополнительной учебной литературы

Г.М. Рудницкий “Радиоастрономия”,

<http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Rudnickij/index.htm>

Конникова В.К., Лехт Е.Е., Силантьев Н.А, “Практическая радиоастрономия”

Р. Томпсон, Дж. Моран, Дж.Свенсон "Интерферометрия и синтез в радиоастрономии"

J. Condon & S.Ransom “Essential Radioastronomy”

U. Klein “Radio astronomy: tools, applications and impacts”

T. Wilson, K. Rohlf, S. Huttemeister “Tools of Radio Astronomy”

D. R. Lorimer, M. Kramer, “Handbook of Pulsar Astronomy”

### • Перечень лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения \_\_\_\_\_ *(приводится при необходимости)*

### • Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем \_\_\_\_\_ *(приводится при необходимости)*

### • NASA ADS: <https://ui.adsabs.harvard.edu/classic-form/>

### • Legacy Archive for Microwave Background Data Analysis: <https://lambda.gsfc.nasa.gov/>

### • Каталог NVSS: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/w3browse/all/nvss.html>

### • Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» \_\_\_\_\_

### • Описание материально-технической базы \_\_\_\_\_ *(приводится при необходимости)*

## 8. Язык преподавания: русский *(отдельно укажите, если дисциплина может быть реализована на иностранном языке).*