

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

Магистерская программа «Физика гравитационных явлений в космосе»  
Междисциплинарная программа реализуется кафедрой астрофизики и звездной астрономии и кафедрой теоретической физики совместно с ГАИШ МГУ имени М.В. Ломоносова

**УТВЕРЖДАЮ**  
Заместитель декана физического  
факультета МГУ  
\_\_\_\_\_ / А.А. Федянин /  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

**Наименование дисциплины:**

ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ В АСТРОФИЗИКЕ

---

**Уровень высшего образования:**

Магистратура

---

**Направление подготовки:**

03.04.02 Физика

**Направленность (профиль) ОПОП:**

Гравитация и астрофизика

---

Квалификация «Магистр»

**Форма обучения:** Очная форма обучения

---

Москва 2021

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика.

Год (годы) приема на обучение – 2021 год

**Авторы–составители рабочей программы дисциплины:**

д.ф.-м.н. Пширков Максим Сергеевич, отдел релятивистской астрофизики ГАИШ МГУ



**Руководители магистерской программы «Физика гравитационных явлений в космосе»:**

академик РАН профессор Черепашук Анатолий Михайлович,



д.ф.-м.н. профессор Постнов Константин Александрович,



д.ф.-м.н. профессор Гальцов Дмитрий Владимирович



## **Аннотация к рабочей программе дисциплины «Темная материя в астрофизике»**

Курс “Тёмная материя в астрофизике” посвящен одной из самых важных нерешённых проблем современной фундаментальной физики – проблеме тёмной материи. Целью является начальное знакомство магистрантов с современным положением дел в области исследования тёмной материи и связанных областях астрофизики частиц. В первой части курса рассматривается всё многообразие наблюдательных свидетельств в пользу существования тёмной материи, от динамики галактик до космологических. Затем даётся обзор свойств различных кандидатов на роль тёмной материи. Большая часть курса посвящена современным методам поиска тёмной материи, как прямым, так и косвенным, по её астрофизическим проявлениям. Последняя часть курса затрагивает вопрос моделей, альтернативных модели тёмной материи, их свойств и проблем.

### **Разделы рабочей программы**

1. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
4. Форма обучения.
5. Язык обучения.
6. Содержание дисциплины.
7. Объем дисциплины
8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.
10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
11. Шкала оценивания.
12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Темная материя в астрофизике» реализуется на 2-м курсе во 2-ом семестре и является составной частью профессионального блока вариативной части.

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

Отсутствуют.

## 3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

Формируемые компетенции (код компетенции)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
М-СПК-1	<i>З-1 Знать:</i> основные наблюдательные свидетельства в пользу существования темной материи <i>З-2 Знать:</i> основных кандидатов на роль тёмной материи <i>У-1 Уметь:</i> рассчитывать параметры движения объектов в различных распределениях тёмной материи <i>В-1 Владеть:</i> методами теоретического исследования астрофизических явлений и процессов, связанных с тёмной материей
М-СПК-2	<i>З-2 Знать:</i> основные методы критического анализа и оценки актуальных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских задач, в том числе и в междисциплинарных областях. <i>У-2 Уметь:</i> интерпретировать в рамках современных физических моделей данные наблюдений <i>В-2 Владеть:</i> навыками самостоятельной работы
М-СПК-3	<i>З-1 Знать:</i> возможные наблюдательные проявления тёмной материи в мультиканальной парадигме для различных моделей тёмной материи. <i>У-1 Уметь:</i> количественно анализировать астрофизические потенциально наблюдаемые эффекты для основных кандидатов на роль тёмной материи <i>В-1 Владеть:</i> Современными подходами к изучению тёмной материи и её поиску на разных пространственных масштабах

4. Форма обучения: очная.

5. Язык обучения: русский.

6. Содержание дисциплины

*Тема 1. Историческое введение. Наблюдательные указания на необходимость введения тёмной материи.*

Особенности движения пробных тел – новая неизвестная материя или изменение законов гравитации? Примеры из Солнечной системы – Нептун/Вулкан. Избыток массы в скоплениях галактик (Цвикки, 1933). Теорема вириала. Кривые вращения спиральных галактик. Избыток массы в Млечном пути и М31. Теоретические указания: неустойчивость дисков и их стабилизация тёмным гало.

*Тема 2: Тёмная материя на масштабах галактик.*

Спиральные галактики – кривые вращения. Разложение на компоненты (диск, балдж, гало). Модель максимального диска. Карликовые сфероидальные галактики, оценка масса по кинематике движений. Галактики с низкой поверхностной яркостью (Low Surface Brightness, LSB). Дисперсии движения звёзд и оценка локальной плотности тёмной материи. ТМ в эллиптических галактиках.

*Тема 3: Тёмная материя на масштабах скоплений галактик*

Скопления галактик: свойства, морфология, классификация, номенклатура. Теорема вириала, оценка масс скоплений. Уравнения Джинса. УД в сферических и цилиндрических координатах. Профиль плотности из наблюдений, проблемы – вырождение между анизотропией и распределением массы. Рентгеновские наблюдения. Теория. Изотермическое приближение и его обоснованность. Пример: профили плотности нескольких скоплений – Coma, Perseus

*Тема 4: Тёмная материя на самых крупных масштабах: формирование структуры, наблюдаемые проявления спектра флуктуаций*

Формирование структуры из первичных возмущений. Спектр возмущений. Линейная эволюция возмущений, ньютоновский случай. Эволюция в расширяющейся Вселенной. RD и MD стадии, передаточная функция. Наблюдения спектра – каталоги галактик, Ly-альфа лес, анизотропия реликтового излучения.

*Тема 5: Нелинейные теории коллапса. Структура и форма гало ТМ.*

Эволюция неоднородностей – нелинейный режим. Сферически симметричный коллапс, формализм Пресса-Шехтера. Профили плотности гало. «Универсальный» (NFW) профиль. Cusp/core проблема. Субструктуры. Распределение скоростей частиц. Численное моделирование. Космология на примере симуляции Millenium. Симуляции на уровне галактик. Гравитационное линзирование. Линзирование точечной массой и произвольным распределением масс.

*Тема 6: Различные модели тёмной материи.*

Две модели ТМ – рождение из тепловой бани/нетепловое рождение. Hot/Cold/Warm DM. Процесс закалки. Каноническое сечение. Нейтралитет из суперсимметрии. Аксионы. Стерильные нейтрино – модели генерации, ограничения из космологии и астрофизики. Первичные черные дыры – как их образовать? Ограничения в различных диапазонах масс.

*Тема 7: Непрямые методы детектирования тёмной материи.*

Гамма-лучи-- основной метод непрямого детектирование. Ограничение на массу частиц аннигилирующей ТМ, ограничение на время жизни для распадающейся ТМ. Ограничения из наблюдений космических лучей и нейтрино. Нейтрино от Солнца

*Тема 8: Прямые методы детектирования ТМ. Поиски на ускорителях.*

Поиск следов и признаков эластичного рассеяния. Низкофоновые детекторы – различные технологии, фононы/сцинтилляторы/полупроводники. Зависимость сигнала от астрофизических параметров. Обзор результатов текущих экспериментов. Поиски на ускорителях. Поиски аксионов в лабораториях.

*Тема 9: Ограничение свойств ТМ из различных астрофизических явлений и объектов.*

Возможное влияние тёмной материи на эволюцию звёзд: остывание из-за аксионов, аннигиляция ТМ как источник энергии, влияние на астросейсмологию и т.д.. Влияние на рекомбинацию и СМВ.

*Тема 10: Проблемы  $\Lambda$ CDM на различных масштабах. MOND-альтернатива  $\Lambda$ CDM.*

Первичный нуклеосинтез и  ${}^7\text{Li}$ . Проблемы с СМВ. Разница между космологическими параметрами на больших и малых красных смещениях ( $\sigma_8$ ,  $f\sigma_8$ ,  $H_0$ ). Пропавшие барионы. Пропавшая тёмная материя. Возможные трения на масштабе скоплений – Bullet cluster, «El Gordo», A520. Проблемы на уровне галактик – пропавшие спутники, too big to fail, core/cusp, плоскость спутников. Возможные решения – «тёплая» тёмная материя, вавовзаимодействующая ТМ. Объяснение плоских кривых без введения ТМ. Модификация уравнений движения. RAR (radial acceleration relation), BTFR (Barionic Tully-Fisher relation), Faber-Jackson relation -- объяснения в MOND. Фундаментальный масштаб ускорения. Релятивистская теория, например, TeVeS. Космология MOND. Проблемы альтернативной теории.

## **7. Объем дисциплины**

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах				
		Общая трудоемкость	в том числе			Самостоятельная работа студентов
			ауд.	занятий		
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров	
Темная материя в астрофизике	3	108	36	12	24	72

**8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий**

Изучение курса «Темная материя в астрофизике» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса и знакомство с современными данными о наблюдательных данных, указывающих на возможное существование тёмной материи и методы её поиска; семинарские занятия, предусматривающие углубленное изучение и обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным и семинарским занятиям. Темы, рассматриваемые на лекциях и изучаемые самостоятельно, закрепляются на семинарских занятиях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы					Форма текущего контроля успеваемости и промежуточно й аттестации
		Всего часов	Лекции	Научно-практические занятия	Семинары	Самостоятельная работа	

1	Историческое введение. Наблюдательные указания на необходимость введения тёмной материи (ТМ).	9	1	-	2	6	Собеседование, опрос
2	ТМ на масштабах галактик	9	1	-	2	6	
3	ТМ на масштабах скоплений галактик	9	1	-	2	6	
4	ТМ на самых крупных масштабах: формирование структуры, наблюдаемые проявления спектра флуктуаций	9	1	-	2	6	
5	Нелинейные теории коллапса. Структура и форма гало ТМ.	16	2	-	4	10	
6	Различные модели тёмной материи.	15	2	-	3	12	
7	Непрямые методы детектирования ТМ.	9	1	-	2	6	
8	Прямые методы детектирования ТМ. Поиски на ускорителях.	9	1	-	2	6	
9	Ограничение свойств ТМ из различных астрофизических явлений и объектов.	6	1		2	3	
10	Проблемы $\Lambda$ CDM на различных масштабах. MOND- альтернатива $\Lambda$ CDM.	15	1	-	3	9	
	Промежуточная аттестация	2				2	Экзамен в форме письменной работы с последующим собеседованием
<b>ИТОГО:</b>		<b>108</b>	<b>12</b>	<b>-</b>	<b>24</b>	<b>72</b>	

## 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.



Текущий контроль по дисциплине «Темная материя в астрофизике» осуществляется на семинарских занятиях и заключается в оценке ответов на вопросы и активности при обсуждении проблем, изучаемых в рамках тем лекционных занятий,

Промежуточная аттестация по дисциплине «Темная материя в астрофизике» проводится в втором семестре в форме письменной проверочной работы с последующим собеседованием.

Результаты сдачи зачета оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

#### **10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).**

##### **Требования к структуре и содержанию фонда оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
<b>Оценочные средства текущего контроля</b>		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как специальная беседа по тематике предыдущей лекции и рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Тестирование	Средство контроля, позволяющее получить оценку уровня фактических знаний студента по изученной теме.	Образцы тестов
<b>Оценочные средства промежуточной аттестации</b>		
Письменная работа	Средство, позволяющее оценить умение решать несложные задачи и проводить оценки физических величин, иллюстрирующие материал пройденных тем.,	Перечень вопросов к экзамену
Собеседование	Средство, позволяющее получить экспертную оценку знаний, умений и навыков по для оценивания и анализа различных фактов и явлений в своей профессиональной области.	Требования к порядку проведения собеседования

## 11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
ЗНАТЬ: основные наблюдательные свидетельства в пользу существования темной материи М-СПК-1 3-1	Отсутствие знаний основных наблюдательных свидетельств в пользу существования темной материи	В целом успешные, но не систематические знания основных наблюдательных свидетельств в пользу существования темной материи	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знание основных наблюдательных свидетельств в пользу существования темной материи	Успешные и систематические знания основных наблюдательных свидетельств в пользу существования темной материи
ЗНАТЬ: основных кандидатов на роль тёмной материи М-СПК-1 3-2	Отсутствие знаний об основных кандидатах на роль тёмной материи	В целом успешные, но не систематические знания об основных кандидатах на роль тёмной материи	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знание об основных кандидатах на роль тёмной материи	Успешные и систематические знания об основных кандидатах на роль тёмной материи
ЗНАТЬ: возможные наблюдательные проявления тёмной материи в мультиканальной парадигме для различных моделей тёмной материи. М-СПК-2 3-1	Отсутствие знаний или фрагментарное знание возможных наблюдательных проявлений тёмной материи в мультиканальной парадигме для различных моделей тёмной материи.	знание возможных наблюдательных проявлений тёмной материи в мультиканальной парадигме для различных моделей тёмной материи.	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знание возможных наблюдательных проявлений тёмной материи в мультиканальной парадигме для различных моделей тёмной	Успешное и систематическое знание возможных наблюдательных проявлений тёмной материи в мультиканальной парадигме для различных моделей тёмной материи.

			материи.	
<p>УМЕТЬ: рассчитывать параметры движения объектов в различных распределе- ниях тёмной материи</p> <p>М-СПК-2 У-1</p>	Отсутствие умения рассчитывать параметры движения объектов в различных распределе- ниях тёмной материи	В целом успешное, но не систематическо- е умение рассчитывать параметры движения объектов в различных распределе- ниях тёмной материи	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение рассчитывать параметры движения объектов в различных распределе- ниях тёмной материи	Успешное проявление умения рассчитывать параметры движения объектов в различных распределе- ниях тёмной материи
<p>УМЕТЬ: количественно анализировать астрофизическое потенциально наблюдаемые эффекты для основных кандидатов на роль тёмной материи</p> <p>М-СПК-3 У-1</p>	Отсутствие умения количественно анализировать астрофизическое потенциально наблюдаемые эффекты для основных кандидатов на роль тёмной материи	В целом успешное, но не систематическо- е умение количественно анализировать астрофизическое потенциально наблюдаемые эффекты для основных кандидатов на роль тёмной материи	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение количественно анализировать астрофизическое потенциально наблюдаемые эффекты для основных кандидатов на роль тёмной материи	Успешное проявление умения количественно анализировать астрофизические потенциально наблюдаемые эффекты для основных кандидатов на роль тёмной материи
<p>ВЛАДЕТЬ: методами теоретического исследования астрофизических явлений и процессов, связанных с тёмной</p>	Отсутствие/фрагментарное владение методами теоретического исследования астрофизических явлений и процессов, связанных с	В целом успешное, но не систематическо- е владение методами теоретического исследования астрофизических явлений и	В целом успешно е, но содержащее отдельные пробелы владение методами теоретического исследования	Успешная демонстрация владения методами теоретического исследования астрофизических явлений и процессов, связанных с

материей М-СПК-1 В-1	тёмной материей	процессов, связанных с тёмной материей	астрофизическ их явлений и процессов, связанных с тёмной материей	тёмной материей
ВЛАДЕТЬ: современными подходами к изучению тёмной материи и её поиску на разных пространствен ных масштабах М-СПК-3 В-1	Отсутствие/фра гментарное владение современными подходами к изучению тёмной материи и её поиску на разных пространственн ых масштабах	В целом успешное, но не систематическо е владение современными подходами к изучению тёмной материи и её поиску на разных пространственн ых масштабах	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение современными подходами к изучению тёмной материи и её поиску на разных пространственн ых масштабах	Успешная демонстрация владения современными подходами к изучению тёмной материи и её поиску на разных пространственн ых масштабах

## 12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

### *Примеры рассматриваемых заданий:*

**Пример 1:** Построить кривую вращения в модели Млечного пути (самостоятельно найти модель) без гало и с гало.

**Пример 2:** Найти время за которое чёрная дыра массой  $10^3, 10^4, 10^5, 10^6 M_{\odot}$  окажется в центре гало тёмной материи (типа МП) с начальной круговой орбиты радиусом 100 кпк.

## 13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.

### *Материалы промежуточной аттестации обучающихся*

Вопросы к экзамену и зачету можно найти по адресу:

[http://ppc.inr.ac.ru/dark\\_matter\\_2018.php](http://ppc.inr.ac.ru/dark_matter_2018.php)

**Пример 1:** Найти J-фактор для галактики M31, одной из карликовых сферических галактик dSph( по выбору), скопления галактик в Волосах Вероники – выбрать самый оптимальный для поисков аннигилирующей ТМ. Найти поток на Земле, если сечение каноническое, массы частиц 1, 10, 100 ГэВ, половина энергии уходит в фотоны.

**Пример 2.** Сечение взаимодействия частиц ТМ с протонами  $10^{-38} \text{ см}^2$ , а масса – 100 ГэВ. Оценить нейтринный поток из центра Солнца и Земли (Землю для простоты считать железной).

#### **. 14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы**

Основная литература.

А.В.Засов, К.А.Постнов. Общая астрофизика, глава 9. М., Век-2, 2-е издание, 2011.

Д.С. Горбунов, В.А. Рубаков, «Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего Большого взрыва», URSS, Москва, 2016

Д.С. Горбунов, В.А. Рубаков, «Введение в теорию ранней Вселенной. Космологические возмущения. Инфляционная теория», URSS, Москва, 2016

А.В.Засов и др. Темная материя в галактиках. УФН т.60, с.3, 2017.

G. Bertone (ed.), «Particle Dark Matter: Observations, Models and Searches», Cambridge University Press; 1 edition (November 21, 2013)

Дополнительная литература.

R.H. Sanders, «The Dark Matter Problem: A Historical Perspective», Cambridge University Press; Reprint edition (February 20, 2014)

H. Mo, F. van den Bosch, S. White, «Galaxy Formation and Evolution», Cambridge University Press, 2010 и более доступное изложение в курсе лекций F. van den Bosch (Yale U)

<http://www.astro.yale.edu/vdbosch/astro610.html>

E. Kolb, M. Turner, «The Early Universe», Front. Phys., Vol. 69, 1990

S. Dodelson, «Modern cosmology», The Academic Press, 2003

P. Schneider, «Extragalactic Astronomy and Cosmology: An Introduction», 2 ed., Springer, 2015

Интернет-ресурсы.

1. <http://dmtools.brown.edu/>

#### **Материально-техническое обеспечение**

В соответствии с требованиями п. 5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Курс может быть прочитан в поточной аудитории при наличии: работающих электрических розеток, компьютера, проектора, экрана, учебной доски.