



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

**«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ФГБОУ ВО «ИГУ»

Кафедра общей и космической физики



**УТВЕРЖДАЮ**

Декан физического факультета

/ Н.М. Буднев

17 апреля 2024 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Наименование дисциплины (модуля): Б1.В.06 Проблемы тёмной материи и экзотических частиц

Направление подготовки: 03.04.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки: Астрофизика высоких энергий

Квалификация выпускника: магистр

Форма обучения: очная

Согласовано с УМК:

физического факультета

Протокол № 42 от «15» апреля 2024 г.

Председатель: д.ф.-м.н., профессор

 Н.М. Буднев

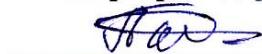
Рекомендовано кафедрой:

общей и космической физики

Протокол № 8

от «22» марта 2024 г.

Зав.кафедрой д.ф.-м.н., профессор

 Паперный В.Л.

Иркутск 2024 г.

## Содержание

<b>I. Цели и задачи дисциплины (модуля)</b> .....	3
<b>II. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО</b> .....	3
<b>III. Требования к результатам освоения дисциплины</b> .....	3
<b>IV. Содержание и структура дисциплины (модуля)</b> .....	4
4.1. Содержание дисциплины, структурированное по темам, с указанием видов учебных занятий и отведенного на них количества академических часов.....	5
4.2. План внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся по дисциплине .....	6
4.3. Содержание учебного материала .....	7
4.3.1. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ .....	7
4.3.2. Перечень тем (вопросов), выносимых на самостоятельное изучение студентами в рамках самостоятельной работы (СРС).....	7
4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов .....	7
4.5. Примерная тематика курсовых работ (проектов) (при наличии) .....	<b>Ошибка!</b>
<b>Закладка не определена.</b>	
<b>V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)</b> .....	8
а) <i>перечень литературы</i> .....	8
б) <i>периодические издания</i> .....	8
в) <i>список авторских методических разработок</i> .....	8
г) <i>базы данных, информационно-справочные и поисковые системы</i> .....	8
<b>VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)</b> .....	9
6.1. Учебно-лабораторное оборудование: .....	9
6.2. Программное обеспечение: .....	9
6.3. Технические и электронные средства: .....	9
<b>VII. Образовательные технологии</b> .....	9
<b>VIII. Оценочные материалы для текущего контроля и промежуточной аттестации</b> .....	9
 <b>ПРИЛОЖЕНИЕ: Фонд оценочных средств</b> .....	 13

## I. Цели и задачи дисциплины (модуля)

Одной из самых интригующих загадок современной космологии и физики элементарных частиц является природа темной материи, средняя плотность которой во Вселенной в пять раз превышает плотность обычной барионной материи. Её решение станет следующим важнейшим этапом в развитии представлений о фундаментальных свойствах материи на пути обнаружения новых элементарных частиц, объясняющих явления, лежащие за рамками существующей Стандартной модели физики частиц. Именно этот круг вопросов находит детальное отражение в данной программе.

**Цель программы** – убедить студентов в том, что обнаружение существования темной материи (т.е. материи, не излучающей свет и не наблюдаемой теле скопами) имеет фундаментальное значение для космологии, астрофизики и физики элементарных частиц.

**Задача курса:** обсудить многочисленные проводимые и планируемые экспериментов по поиску частиц темной материи, рассмотреть различные экспериментальные методы, включающие в себя как регистрацию прямых взаимодействий частиц темной материи с веществом детектора, так и детектирование продуктов их аннигиляции или распадов.

## II. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Проблемы тёмной материи и экзотических частиц» входит в часть, формируемую участниками образовательных соотношений, блока Б1 ОПОП по направлению 03.04.02 Физика. Она является основой таких научных дисциплин как «Нейтринная астрофизика», «Экспериментальные методы в астрофизике высоких энергий» и т.п.

Изучение данной дисциплины опирается на знания, полученные при изучении дисциплин бакалавриата: «Общая физика», «Атомная и ядерная физика», «Теоретическая физика».

Программа курса ориентирована на тематику научных исследований, развиваемых кафедрами физического факультета и НИИПФ ИГУ.

## III. Требования к результатам освоения дисциплины

Процесс изучения дисциплины (модуля) направлен на формирование следующих компетенций:

- Способен использовать астрофизические методы в научных исследованиях (ПК-1);

### Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Компетенция	Индикаторы компетенций	Результаты обучения
ПК-1	ИДК ПК.1.1 Способен использовать астрофизические методы для описания процессов в астрофизических исследованиях	<b>Знать:</b> физические принципы основных методов исследования в астрофизике частиц высоких энергий <b>Уметь:</b> применять физические теории к описанию соответствующих методов исследования в астрофизике частиц высоких энергий. <b>Владеть:</b> методиками построения моделей, описывающих процессы и явления в астрофизике частиц высоких энергий

#### **IV. Содержание и структура дисциплины (модуля)**

Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 часов, в том числе 45 часов контактной работы.

Занятия проводятся только в очной форме обучения с применением дистанционного контроля самостоятельной работы студентов. Электронной и дистанционной форм обучения не предусматривается.

На практическую подготовку отводится 8 аудиторных часов (во время аудиторных занятий).

Форма промежуточной аттестации: зачёт.

**4.1. Содержание дисциплины, структурированное по темам, с указанием видов учебных занятий и отведенного на них количества академических часов**

№ п/п	Раздел дисциплины/тема	Семестр	Всего часов	Из них практическая подготовка обучающихся	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу обучающихся, практическую подготовку и трудоемкость (в часах)				Формы текущего контроля успеваемости; Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
					Контактная работа преподавателя с обучающимися			Самостоятельная работа	
					Лекции	Семинарские/практические/лабораторные занятия	Консультации		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Раздел 1. Темная материя и темная энергия.	1	16,1	1	6		0,1	10	Опрос, коллоквиум, доклады по рефератам
2	Раздел 2. Свидетельства существования темной материи	1	18,2	1	6		0,2	12	
3	Раздел 3. Предполагаемые частицы темной материи	1	18,2	1	6		0,2	12	
4	Раздел 4. Поиск темной материи и экзотических частиц (магнитные монополи, Q-шары, странглеты) с помощью нейтринных телескопов.	1	18,2	2	6		0,2	12	
5	Раздел 5. Поиск частиц тёмной материи в экспериментах на коллайдерах	1	17,2	2	6		0,2	11	
6	Раздел 6. Методы регистрации частиц темной материи по следам аннигиляции вимпов	1	16,1	1	4		0,1	12	
	Зачёт		<b>30</b>						
	КСР								
	КОНтроль		<b>10</b>						
	<b><u>Итого часов</u></b>		<b>144</b>		34		1	69	

#### 4.2. План внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

Семестр	Название раздела, темы	Самостоятельная работа обучающихся			Оценочное средство	Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы
		Вид самостоятельной работы	Сроки выполнения	Трудоемкость (час.)		
1	Все разделы	Решение задач	В течение семестра	62	Готовое решение задачи в письменном виде	[1-2]
1	Подготовка к дискуссии на практических занятиях	Работа с учебной литературой	В течение семестра	7	Дискуссия	[1-2]
Общий объем самостоятельной работы по дисциплине (час)				<b>69</b>		

### 4.3. Содержание учебного материала

Раздел 1. Темная материя и темная энергия.

Раздел 2. Свидетельства существования темной материи

- Галактические ротационные кривые
- Галактические скопления
- Количественный вклад темной материи

Раздел 3. Предполагаемые частицы темной материи

- Нейтрино Стандартной модели
- Нейтрино Стандартной модели
- Сверхмассивные нейтрино
- Стерильное нейтрино
- Аксионы
- Слабовзаимодействующие массивные частицы
- Суперсимметричные частицы
- Барионные кандидаты

Раздел 4. Поиск темной материи и экзотических частиц (магнитные монополи, Q-шары, странглеты) с помощью нейтринных телескопов.

Раздел 5. Поиск частиц темной материи в экспериментах на коллайдерах

Раздел 6. Методы регистрации частиц темной материи по следам аннигиляции вимпов

#### 4.3.1. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ

Лабораторные занятия не предусмотрены

#### 4.3.2. Перечень тем (вопросов), выносимых на самостоятельное изучение студентами в рамках самостоятельной работы (СРС)

№ нед.	Тема	Вид самостоятельной работы	Задание	Рекомендуемая литература	Количество часов
1.	Все темы	- изучение специальной литературы - конспектирование - сбор материала для реферата	- углубить свои знания по текущей теме - написать реферат - подготовиться к дискуссии на аудиторном занятии	Вся рекомендуемая литература	62
2.	Все темы	Подготовка к зачёту		Вся рекомендуемая литература	5
3.	Текущие консультации				2

#### 4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов

Самостоятельная работа реализуется:

- 1) Непосредственно в процессе аудиторных занятий, при подготовке к ответу на контрольный вопрос.
- 2) В контакте с преподавателем вне рамок расписания - на консультациях по учебным вопросам, в ходе творческих контактов, при ликвидации задолженностей, при выполнении индивидуальных заданий и т.д.
- 3) В библиотеке, дома, в общежитии, на кафедре при выполнении студентом учебных и творческих задач.

## V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

### а) перечень литературы

#### основная литература

- 1) Мурзин, В. С. Астрофизика космических лучей [Электронный ресурс] : учеб. пособие для вузов / В. С. Мурзин. - Электрон. текстовые дан. - Москва : Логос, 2007. - 487 с. ; нет. - (Классический университетский учебник). - ЭБС "Рукопт". - неогранич. доступ. - ISBN 978-5-98704-171-6

#### дополнительная литература

- 1) Галактики [Текст] : научное издание / ред., сост. В. Г. Сурдин. - М. : Физматлит, 2013. - 431 с. ; 22 см. - (Астрономия и астрофизика). - ISBN 978-5-9221-1445-5. - (2 экз.)
- 2) Верин, О.Г. Природа элементарных частиц, квантовая теория и великое объединение [Текст] : научное издание / О. Г. Верин. - М. : Контур-М, 2005. - 133 с. ; 21 см. - Библиогр.: с. 132-133. - ISBN 5-98642-016-0. - (2 экз.)
- 3) Горбунов, Д.С. Введение в теорию ранней Вселенной : Теория горячего Большого взрыва / Д. С. Горбунов ; Рос. акад. наук, Ин-т ядерных исслед. - М. : Изд-во ЛКИ, 2008. - 543 с. : ил. ; 24 см. - Библиогр.: с. 537-539. - Предм. указ.: с. 540-543. - ISBN 978-5-382-00657-4. - (2 экз.)
- 4) Астрофизика космических лучей [Текст] : научное издание / В. С. Березинский [и др.]. ; Под ред. В.Л.Гинзбурга. - 2-е изд., испр. и доп. - М. : Наука, 1990. - 523 с. : ил. ; 22 см. - ISBN 5-02-014206-9. - (2 экз.)

### б) периодические издания

- 1) Журнал «Успехи физических наук» <http://ufn.ru/>
- 2) Журнал «Astroparticle Physics» <http://www.journals.elsevier.com/astroparticle-physics/>
- 3) Журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра» [http://www1.jinr.ru/Pepan/Pepan\\_rus.html](http://www1.jinr.ru/Pepan/Pepan_rus.html)

### в) список авторских методических разработок

1. В системе образовательного портала ИГУ (<http://educa.isu.ru/>) размещены методические материалы и задания по данному курсу.

### г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

- 4) Обсерватория Оже : <https://www.auger.org/>
- 5) Телескоп HESS (High Energy Stereoscopic System) <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>
- 6) Телескоп MAGIC : <https://magic.mpp.mpg.de/>
- 7) Телескоп VERITAS : <http://veritas.sao.arizona.edu/>
- 8) СТА : <https://portal.cta-observatory.org/Pages/Home.aspx>
- 9) Fermi gamma-ray Space Telescope: <http://fermi.gsfc.nasa.gov/>
- 10) MILAGRO : <http://scipp.ucsc.edu/milagro/papers/>
- 11) HAWC: <http://umdgrb.umd.edu/hawc/index.php>
- 12) IceCube: <https://icecube.wisc.edu/science>
- 13) <http://library.isu.ru/ru>
- 14) ЭЧЗ «Библиотех» <https://isu.bibliotech.ru/>
- 15) ЭБС «Лань» <http://e.lanbook.com/>
- 16) ЭБС «Рукопт» <http://rucont.ru>

## VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

### 6.1. Учебно-лабораторное оборудование:

Учебная аудитория для проведения занятий. Использование глобальной компьютерной сети позволяет обеспечить доступность Интернет-ресурсов и реализовать самостоятельную работу студентов. На лекциях могут использоваться мультимедийные средства: проектор, переносной экран, ноутбук.

Материалы: научные статьи и монографии из рецензируемых журналов, рассматривающие современные подходы и исследования в астрофизике высоких энергий.

### 6.2. Программное обеспечение:

Стандартные сервисы глобальной сети Интернет, стандартные программы для показа презентаций и документов в формате pdf.

### 6.3. Технические и электронные средства:

Во время лекционных занятий студентам демонстрируются на экране материалы курса в виде презентаций.

## VII. Образовательные технологии

Задачи изложения и изучения дисциплины реализуются в следующих формах деятельности:

- **лекции**, нацеленные на получение необходимой информации, и ее использование при решении практических задач;
- **консультации** – еженедельно для всех желающих студентов;
- **самостоятельная внеаудиторная работа** направлена на приобретение навыков самостоятельного решения задач по дисциплине;
- **текущий контроль** за деятельностью студентов осуществляется на лекционных и практических занятиях в виде самостоятельных работ

## VIII. Оценочные материалы для текущего контроля и промежуточной аттестации

Фонд оценочных средств (ФОС) представлен в приложении.

### 8.1.1. Оценочные средства для входного контроля

Для изучения данного курса студент должен знать основы физики и информатики, уметь пользоваться стандартными поисковыми сервисами сети Интернет. Входной контроль знаний не проводится.

### 8.1.2. Оценочные средства текущего контроля

#### Пример вопросов текущего контроля

1. Найти угол к плоскости орбиты электрона в пределах которого будет заключено 90% интенсивности синхротронного излучения для  $\gamma_L=2, 10, 100$ .
2. Построить зависимость частоты максимума спектра синхротронного излучения электрона от его энергии в магнитных полях  $10^{-5}, 10^{-3}, 0.1, 10, 100, 10^6, 10^8, 10^{12}$  Гс.
3. Вычислить энергии гамма-квантов в реакциях  $n + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{D} + \gamma$ ,  $d + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ ,  ${}^7\text{Be} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$ ,  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ ,  ${}^{13}\text{C} + p \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma$ ,  ${}^{14}\text{N} + p \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$ ,  ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be} + \gamma$ .
4.  $\pi^0$ -мезон, энергия которого равна а)  $m_{\pi^0}c^2$  б)  $(1000 \cdot m_{\pi^0}c^2)$  распадается на два гамма-кванта. Определите угол между направлениями гамма-квантов.

5. *Ядерный состав космического излучения. Источники космических лучей высоких энергий.*
6. *Ускорение на фронте ударной волны. Ударные волны в молодых остатках сверхновых.*
7. *Природа степенного спектра космических частиц. Прохождение космического излучения через межзвездное пространство. Обрезание спектра Грейзена-Зацепина-Кузьмина.*
8. *Широкий атмосферный ливень (ШАЛ). Электромагнитная и ядерная компоненты. Измеряемые параметры ливня. Пространственное распределение частиц в ливнях.*
9. *Черенковское излучение ШАЛ.*
10. *Ионизационное свечение.*
11. *Радиоизлучение ШАЛ.*
12. *Комплексные установки для изучения космического излучения при высоких энергиях.*
13. *Наземные, подземные, глубоководные и космические лаборатории. Примеры.*
14. *Основные результаты по массовому составу и энергетическому спектру космических лучей.*
15. *Гамма-астрономия высоких энергий. Механизмы рождения гамма-квантов высоких энергий.*
16. *Поглощение гамма-квантов во Вселенной. Гамма-гамма взаимодействие.*
17. *Эффекты в электрических и магнитных полях, близких к критическому значению. Пробеги гамма-квантов относительно процессов гамма-фотонного взаимодействия.*
18. *Потоки гамма-квантов от оболочек сверхновых. Гамма-пульсары. Модель полярной шапки и модель внешней бреши.*
19. *Потоки гамма-квантов от Крабовидной туманности. Пульсар и остаток сверхновых.*
20. *Атмосферные черенковские телескопы с анализом изображения (IACT). Параметры Хилласа. Современные черенковские гамма-телескопы.*
21. *Широкоугольные гамма-телескопы - MILAGRO, HAWC, LHAASO, Tibet. Проект TAIGA.*
22. *Гамма-телескопы на спутниках: от CGRO до Fermi.*
23. *Методы регистрации природных потоков нейтрино высоких энергий на примерах крупных современных установок.*
24. *Результаты телескопа ICECUBE по регистрации нейтрино сверхвысоких энергий космического происхождения и их возможная интерпретация.*
25. *Темная материя и темная энергия. Поиск темной материи и экзотических частиц с помощью нейтринных телескопов.*

### 11.3. Оценочные средства для промежуточной аттестации

#### Примерный список вопросов и заданий к зачёту:

1. *Ядерные реакции в звездах Главной последовательности.*
2. *Красные гиганты. Горение гелия.*
3. *Конечные стадии эволюции звезд. Нуклеосинтез в сверхновых.*
4. *Нейтронные звезды, сценарии образования и эволюции. Наблюдательные проявления в радио-, рентгеновском и гамма-диапазонах.*
5. *В чем заключалась теория ускорения космических лучей Е. Ферми? Вывести значение показателя наклона энергетического спектра.*
6. *Что такое диаграмма Хилласа?*

7. Какую энергию приобретет частица при двукратном пересечении фронта ударной волны. Как связан показатель наклона спектра ускоренных частиц с характеристиками ударной волны.
8. Какую максимальную энергию может приобрести частица при ускорении на фронте ударной волны, образующийся при взрыве сверхновой звезды.
9. При каких энергиях происходит обрезание спектра протонов при взаимодействии в реликтовом излучении. Вывести значение этой энергии. Как зависит значение этой энергии от красного смещения  $z$ .
10. При какой энергии гамма-кванты наиболее сильно поглощаются на реликтовом излучении. Вывести значение этой энергии.
11. Какую в среднем энергию приобретает фотон реликтового излучения при столкновении с электроном высокой энергии.
12. Почему энергетический спектр гамма-квантов от распада пи-ноль мезонов повторяет энергетический спектр ускоренных протонов.
13. Как зависит от энергии сечение взаимодействия нейтрино с нуклоном. При какой энергии нейтрино начинают сильно поглощаться при пересечении Земли.
14. Какие основные механизмы вносят вклад в энергетические потери мюона. Вывести зависимость длины пробега мюона от энергии.  
Описать основные методы регистрации ШАЛ.
15. Какие типы установок для регистрации ШАЛ существуют. Перечислите наиболее известные и опишите их устройство.
16. Описать конструкцию водного бака обсерватории Auger. Как оценить величину сигнала (в фотоэлектронах) при пересечении мюоном водного бака.
17. Показать, что полный поток черенковского излучения ШАЛ пропорционален энергии.
18. Как оценить энергетический порог черенковской установки для регистрации ШАЛ.
19. Как измеряется энергия ШАЛ в черенковских установках.
20. Почему число фотонов флуоресцентного излучения от заряженной частицы слабо зависит от плотности атмосферы.
21. Качественно описать как формируется изображение ШАЛ в камере атмосферного черенковского телескопа.
22. Какие параметры изображения наиболее эффективно используются при выделения событий от гамма-квантов.
23. Как оценить эффективную площадь регистрации нейтрино нейтринным телескопом.

### Разработчики:

Д.ф.-м.н., заведующий лабораторией наземной гамма-астрономии  
научно-исследовательского институт  
ядерной физики имени Д.В. Скобельцына в  
МГУ имени М.В. Ломоносова, профессор

Л.А. Кузьмичев

Программа рассмотрена на заседании кафедры общей и космической физики ИГУ  
« 22 » марта 2024 г.

Протокол № 8, зав. кафедрой  В.Л. Паперный

**Настоящая программа не может быть воспроизведена ни в какой форме без предварительного письменного разрешения кафедры-разработчика программы.**