

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

УТВЕРЖДАЮ

Директор

С.В. Иванов

04 2022 г.



Рабочая программа дисциплины

### СОВРЕМЕННАЯ КОСМОЛОГИЯ

программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре  
по научной специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия

Принята решением Ученого совета  
от 04.03.2022 № 03/22

Санкт-Петербург

2022 г.

Рабочая программа дисциплины «Современная космология» составлена на основании программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия (далее – программа аспирантуры)

## **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Целями изучения дисциплины является:**

- Изучение современных представлений о строении и эволюции Вселенной, протекании различных физических процессов на различных этапах ее эволюции (первичный нуклеосинтез, первичная рекомбинация водородно-гелиевой плазмы, формирование крупномасштабной структуры, первых галактик и звезд);

- изучение наблюдательных методов современной космологии (элементы оптической, радио, гамма, нейтринной астрономии);

### **Задачи дисциплины заключаются в изучении:**

- фундаментальных понятий, законов и теорий, относящихся к современной космологии: основы теории гравитации, физика частиц и фундаментальных взаимодействий в нестационарной, искривлённой геометрии четырехмерного пространства времени;

- современных аналитических и численных методов, необходимых для расчета химического состава вещества, крупномасштабной структуры.

Для достижения задач, поставленных при изучении дисциплины, используется набор методических средств: учебная, учебно-методическая литература, информационные ресурсы библиотеки, электронные курсы и др.

## **2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП**

2.1. Дисциплина «Современная космология» входит в обязательную часть образовательного компонента программы подготовки по научной специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия.

2.2. Данная программа строится на преемственности программ в системе высшего образования и предназначена для аспирантов ФТИ, прошедших обучение по программе подготовки магистров, прослушавших соответствующие курсы и имеющих по ним положительные оценки. Она основывается на положениях, отраженных в учебных программах указанных уровней.

2.3. Дисциплина «Современная космология» изучается в рамках подготовки к сдаче кандидатского экзамена.

### **3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Процесс изучения дисциплины «Современная космология» направлен на формирование следующих компетенций в соответствии с Программой Аспирантуры:

#### ***3.1. Универсальные компетенции:***

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);

- способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки (УК-2);

- готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач (УК-3);

- готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках (УК-4);

- способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-5).

#### ***3.2. Общепрофессиональные компетенции:***

- способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1);

- готовность к преподавательской деятельности по основным образовательным программам высшего образования (ОПК-2).

#### ***3.3. Профессиональные компетенции:***

- способность планировать, организовывать работу по проектам, требующим знания астрофизики и звездной астрономии (ПК-1);

- способность к теоретическому расчету необходимых астрофизических и астрономических величин (ПК-2);

- способность к разработке математических моделей, определяющих изучаемые процессы в астрофизике и звездной астрономии (ПК-3);

- способность получать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по теме исследования, выбирать и обосновывать методики и средства решения поставленных задач (ПК-4).

По окончании изучения дисциплины аспиранты должны будут:

**знать:**



- основные законы, определяющие динамику эволюции Вселенной;
- основные процессы, протекавшие на разных стадиях развития Вселенной;

**уметь:**

- применять методы математического моделирования при решении проблем современной космологии;
- самостоятельно изучать и понимать специальную научную и методическую литературу, связанную с проблемами современной космологии;

**владеть:**

- фундаментальными разделами физики, необходимыми для изучения и описания процессов, протекавших на разных стадиях развития Вселенной;
- научными терминами, основными понятиями и концепциями, необходимыми для понимания специальной научной и методической литературы, связанной с проблемами современной космологии;
- опытом самостоятельного изучения и анализа специальной научной и методической литературы, связанной с проблемами современной космологии.

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

##### 4.1. Разделы дисциплины и виды занятий

Приводимая ниже таблица показывает распределение бюджета учебного времени, отводимого на освоение основных разделов курса согласно учебному плану «Современная космология»

Наименование разделов и тем	Трудоёмкость (в ЗЕТ)	Объём работы (в часах)	Всего учебных занятий (в часах)			
			Лекции	Лаб. / практ.	Самостоятельная работа	Контроль
<b>Раздел 1. Основы теории гравитации</b>						
Тема 1.1. Основные положения ОТО			1			
Тема 1.2. Однородные изотропные пространства. FRW-метрика.			1			
Тема 1.3. Движение частиц в искривленном нестационарном пространстве времени. Красное смещение.			2			

<b>Раздел 2. Динамика расширения Вселенной</b>						
Тема 2.1. Уравнения Фридмана			2			
Тема 2.2. Примеры космологических решений. Возраст Вселенной.			2			
Тема 2.3. Космологические модели с темной энергией. Горизонты			2			
<b>Раздел 3. Ключевые физические процессы в расширяющейся Вселенной</b>						
Тема 3.1. Термодинамика в расширяющейся Вселенной.			2			
Тема 3.2. Фазовые переходы в ранней Вселенной.			2			
Тема 3.3. Теория первичного нуклеосинтеза.			2			
Тема 3.4. Первичная рекомбинация.			2			
<b>Раздел 4. Наблюдательная космология</b>						
Тема 4.1. Распространенность химических элементов и методы их наблюдения			2			
Тема 4.2. Реликтовое излучение, его основные с-ва и методы его наблюдения.			2			
Тема 4.3. Крупномасштабная структура Вселенной			2			
Тема 4.4. Наблюдательные проявления темной материи и темной энергии			2			
<b>Всего по дисциплине</b>	<b>2</b>	<b>72</b>	<b>26</b>		<b>46</b>	за- чет

#### *4.2. Содержание разделов и тем*

##### **Раздел 1. Основы теории гравитации**

Тема 1.1. Основные положения ОТО.

Ключевые представления об искривленном пространстве-времени, способы его координатного описание, понятие метрики. Символы Кристоффеля. Основные свойства тензора Римана и его свертки. Уравнения Гильберта-Эйнштейна.

Тема 1.2. Однородные изотропные пространства. FRW-метрика.

Космологический принцип. Однородные изотропные пространства. Метрика Фридмана-Робертсона-Уокера, ее свойства.

Тема 1.3. Движение частиц в искривленном нестационарном пространстве времени. Красное смещение.

Уравнение движения массивных и безмассовых частиц в искривленном нестационарном пространстве-времени. Импульс частицы. Космологическое красное смещение.

##### **Раздел 2. Динамика расширения Вселенной**

### Тема 2.1. Уравнения Фридмана.

Решение уравнений Гильберта-Эйнштейна для случая однородного и изотропного пространства, описываемого метрикой Фридмана-Робертсона-Уокера. Система уравнений, определяющая динамику масштабного фактора Вселенной.

### Тема 2.2. Примеры космологических решений. Возраст Вселенной.

Решения уравнений Фридмана для радиационно-доминированной, пылевидной стадий эволюции Вселенной. Лямбда-доминированная стадия эволюции Вселенной, вселенная де-Ситтера. Решения  $u$ -й Фридмана для уравнения состояния вещества с произвольным параметром линейной связи давления и плотности энергии. Определения возраста Вселенной.

### Тема 2.3. Космологические модели с темной энергией. Горизонты.

Формы материи, имитирующие вакуумно-подобное уравнение состояния вещества: Лямбда-член, Квинтесценция, фантомная энергия. Горизонт событий. Горизонт частиц. Радиус де-Ситтера.

## **Раздел 3. Ключевые физические процессы в расширяющейся Вселенной**

### Тема 3.1. Термодинамика в расширяющейся Вселенной.

Функции распределения бозонов и фермионов, энтропия в расширяющейся Вселенной. Основные термодинамические характеристики газов свободных частиц и их эволюция в расширяющейся Вселенной. Барион-фотонное отношение. Неравновесные процессы.

### Тема 3.2. Фазовые переходы в ранней Вселенной.

Типы фазовых переходов. Электрон-позитронная аннигиляция. Конфаймент. Электрослабый переход. Великое объединение.

### Тема 3.3. Теория первичного нуклеосинтеза.

Начало первичного нуклеосинтеза, отщепление нейтрино, начальный состав первичной релятивистской плазмы. Закалка нейтронов, нейтрон-протонное отношение. Начало термоядерных реакций. Кинетика первичного нуклеосинтеза: горение нейтронов, образование дейтерия, горение дейтерия, образование изотопов первичного гелия, образование и горение наиболее тяжелых изотопов первичной плазмы. Предсказываемая распространенность первичных элементов.

### Тема 3.4. Первичная рекомбинация.

Состав и эволюция температуры первичной гелиево-водородной плазмы. Температура рекомбинации, ключевые физические процессы, определяющие скорость ее протека-



ния. Поверхность последнего рассеяния фотонов. Горизонт на момент рекомбинации и его современные угловые размеры. Пространственная плоскостность Вселенной.

#### **Раздел 4. Наблюдательная космология**

Тема 4.1. Распространенность химических элементов и методы их наблюдения.

Распространенность химических элементов и их эволюция с момента первичного нуклеосинтеза до настоящих дней. Наблюдения относительной распространенности гелия-4 в малометаллических туманностях. Наблюдения дейтерия в суб-ДЛА системах, находящихся на больших красных смещениях. Наблюдения Li-7 в маломассивных звездах, «литиевая» проблема.

Тема 4.2. Реликтовое излучение, его основные свойства и методы его наблюдения.

История открытия и наблюдения реликтового излучения. Основные свойства РИ. Современное значение температуры РИ. Анизотропия РИ. Ключевые космологические параметры, определяемые по результатам анализа анизотропии реликтового излучения.

Тема 4.3. Крупномасштабная структура Вселенной.

Наблюдения и моделирование крупномасштабной структуры Вселенной. Спектр первичных флуктуаций плотности. Спектр Гаррисона-Зельдовича. Особенности спектра первичных флуктуаций плотности, предсказываемых инфляционной теорией.

Тема 4.4. Наблюдательные проявления темной материи и темной энергии.

Наблюдательные проявления темной материи: дисперсия скоростей галактик в скоплениях, кривые вращения вещества в спиральных галактиках, гравитационное линзирование. Наблюдательные проявления темной энергии: ускоренное расширение Вселенной, взрывы сверхновых типа Ia.

### **5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Технология процесса обучения по дисциплине «Современная Космология» включает в себя следующие образовательные мероприятия:

- а) аудиторные занятия (лекционно-семинарская форма обучения);
- б) самостоятельная работа студентов;
- в) контрольные мероприятия в процессе обучения и по его окончании;
- г) зачет по окончании изучения дисциплины.

В учебном процессе используются как активные, так и интерактивные формы проведения занятий: дискуссия, метод поиска быстрых решений в группе, мозговой штурм.

Аудиторные занятия проводятся в интерактивной форме с использованием мультимедийного обеспечения (ноутбук, проектор) и технологии проблемного обучения.

Презентации позволяют качественно иллюстрировать практические занятия схемами, формулами, чертежами, рисунками. Кроме того, презентации позволяют чётко структурировать материал занятия.

Электронная презентация позволяет отобразить процессы в динамике, что улучшает восприятие материала.

Самостоятельная работа организована в соответствии с технологией проблемного обучения и предполагает следующие формы активности:

- самостоятельная проработка учебно-проблемных задач, выполняемая с привлечением основной и дополнительной литературы;
- поиск научно-технической информации в открытых источниках с целью анализа и выявления ключевых особенностей.

Основные аспекты применяемой технологии проблемного обучения:

- постановка проблемных задач отвечает целям освоения дисциплины «Физическая кинетика» и формирует необходимые компетенции;
- решаемые проблемные задачи стимулируют познавательную деятельность и научно-исследовательскую активность аспирантов.

## **6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ**

Цель контроля – получение информации о результатах обучения и степени их соответствия результатам обучения.

### **6.1. Текущий контроль**

Текущий контроль успеваемости, т.е. проверка усвоения учебного материала, регулярно осуществляемая на протяжении семестра. Текущий контроль знаний аспирантов организован как выступления на семинарах.

Текущая самостоятельная работа аспиранта направлена на углубление и закрепление знаний и развитие практических умений.

### **6.2. Промежуточная аттестация**

Промежуточная аттестация завершает изучение дисциплины «Физическая кинетика». Форма аттестации – зачет в письменной или устной форме.

**Контрольные вопросы для промежуточной аттестации:**

1. Основные положения ОТО.
2. Космологический принцип, однородные и изотропные пространства, метрика Фридмана-Робертсона-Уокера.
3. Динамика расширения Вселенной. Уравнения Фридмана и их решения.



4. Фазовые переходы в ранней Вселенной.
5. Теория первичного нуклеосинтеза. Распространенность химических элементов.
6. Первичная рекомбинация водородно-гелиевой плазмы.
7. История открытия и наблюдений реликтового излучения, его основные свойства. Эволюция РИ.
8. Наблюдательные методы современной космологии.

## **7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

### ***7.1. Основная литература***

1. Д.С. Горбунов, В.А. Рубаков. Введение в теорию ранней Вселенной. I том. Москва, УРСС, 2008.
2. С. Вайнберг. Космология. Москва, УРСС, 2012.
3. Л.Д. Ландау. Теория поля. Москва, Наука, 1988.

### ***7.2. Дополнительная литература***

1. Д.С. Горбунов, В.А. Рубаков. Введение в теорию ранней Вселенной. II том. Москва, УРСС, 2009.
2. С. Вайнберг. Гравитация и космология. «ПЛАТОН», 2000.

### ***7.3. Интернет-ресурсы***

Отечественные журналы:

1. Астрономический вестник ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=7665](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7665);
2. Астрономический журнал ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=7666](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7666);
3. Письма в астрономический журнал ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=79414](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=79414) ;
4. Геомагнетизм и аэрномия ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=7765](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7765);
5. Исследование Земли из космоса ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=7842](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7842);
6. Космические исследования ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=7859](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7859);
7. Вестник МГУ. Часть 3. Физика, астрономия (<http://vmu.phys.msu.ru/toc/list>;
8. Проблемы передачи информации  
([http://www.mathnet.ru/php/journal.phtml?jrnid=ppi&wshow=details&option\\_lang=rus](http://www.mathnet.ru/php/journal.phtml?jrnid=ppi&wshow=details&option_lang=rus);
9. Земля и Вселенная ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=7808](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7808);

Отечественные журналы в переводе:

1. Astronomy Reports (<http://link.springer.com/journal/11444>;
2. Astronomy Letters (<http://www.springerlink.com/content/119837/>;
3. Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory  
(<http://link.springer.com/journal/11989>;
4. Cosmic Research (<http://link.springer.com/journal/10604>;
5. Earth and Space Science  
(<http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/agu/journal/10.1002/%28ISSN%292333-5084/> ;
6. Geomagnetism and Aeronomy (<http://link.springer.com/journal/11478>;
7. Problems of Information Transmission (<http://link.springer.com/journal/11122>;
8. Solar System Research (<http://link.springer.com/journal/11208> ;
9. Radiophysics and Quantum Electronics  
(<http://www.springer.com/astronomy/journal/11141> ;

Международные журналы:

Gravitation and Cosmology (<http://link.springer.com/journal/12267>;

Иностранные журналы:

1. Astronomy and Astrophysics (<http://www.aanda.org/> ;
2. Astronomy and Astrophysics Review (<http://link.springer.com/journal/159>;
3. Astronomy & Geophysics (<http://astrogeo.oxfordjournals.org/> ;
4. Astroparticle Physics (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09276505/23/1>;
5. Astrophysics (<http://link.springer.com/journal/10511> ;
6. Astrophysics and Space Science (<http://link.springer.com/journal/10509> ;
7. Classical and Quantum Gravity (<http://iopscience.iop.org/0264-9381/>;
8. Computational Astrophysics and Cosmology (<http://link.springer.com/journal/40668>;
9. Experimental Astronomy (<http://link.springer.com/journal/10686>;
10. Journal of Astrophysics and Astronomy (<http://link.springer.com/journal/12036>;
11. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics (<http://iopscience.iop.org/1475-7516>
12. Microgravity Science and Technology (<http://link.springer.com/journal/12217>;
13. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society  
(<http://mnras.oxfordjournals.org/> ; доступ с 1827 по текущий год);  
(<http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1111/%28ISSN%291365-2966> ;
14. Monthly Notices Letters of the Royal Astronomical Society  
(<http://mnrasl.oxfordjournals.org/> ;
15. Nature (<http://www.nature.com/nature/index.html> ;
16. Planetary Science (<http://link.springer.com/journal/13535>;

17. Research in Astronomy and Astrophysics (<http://iopscience.iop.org/1674-4527/>;
18. Space Science Reviews (<http://link.springer.com/journal/11214>;
19. Space Weather  
(<http://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/agu/journal/10.1002/%28ISSN%291542-7390/> ;
20. Solar Physics (<http://link.springer.com/journal/11207>; ( доступ с 1967 по текущий год).
21. The Astronomical Journal (<http://iopscience.iop.org/1538-3881>;
22. The Astrophysical Journal (<http://iopscience.iop.org/0004-637X/>;
23. The Astrophysical Journal Letters (<http://iopscience.iop.org/2041-8205/> ;
24. The Astrophysical Journal. Supplement series (<http://iopscience.iop.org/0067-0049/> .

## **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕУЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

1. Лекционная аудитория
2. Мультимедийный проектор
3. Персональный компьютер

Программу разработал:

г.н.с.- заведующий лабораторией  
астрофизики высоких энергий,  
д-р физ.-мат. наук, Быков А.Н.