

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**и.о. директора физтех-школы  
физики и исследований им.  
Ландау**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Физические основы космологии
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра проблем физики и астрофизики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: Е.В. Михеева, канд. физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры проблем физики и астрофизики 15.06.2020

## Аннотация

Курс посвящен современному состоянию космологии - науки о Вселенной. В курсе изложены физические основы теоретической и наблюдательной космологии. В курсе даны основы современной космологии, которые уже не изменятся в будущем, включая основы теории гравитации и самогравитирующих систем.

Также курс включает изложение механизма генерации возмущений метрики, теории космологической инфляции и имеющихся наблюдательных тестов.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

сформировать представление о современном уровне космологических исследований и взаимосвязях различных областей космологии, как между собой, так и с наблюдательными данными.

#### Задачи дисциплины

предоставить инструментарий, необходимый для ведения исследований в космологии и релятивистской астрофизике на современном уровне.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
УК-5 Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия	УК-5.1 Способен выявлять специфику философских и научных традиций основных мировых культур
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту

ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

геометрические понятия и наблюдаемые, которыми оперирует космология; набор параметров стандартной космологической модели и наблюдения, на которых она базируется.

уметь:

вычислить наблюдаемые величины при заданном наборе космологических параметров; вычислить параметры спектров возмущений в заданной модели инфляции.

владеть:

методами оценки космологических параметров.

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

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Экспериментальные основания космологии	2	2		3
2	Крупномасштабная структура Вселенной	2	2		3
3	Основы ОТО	2	2		3
4	Фридмановская модель Вселенной	3	3		4
5	Черные дыры	2	2		3
6	Коллапс пылевого шара	2	2		3
7	Тензор Римана	3	3		4
8	Гравитационное линзирование	3	3		4
9	Проблемы стандартной космологической модели	2	2		4
10	Космологическая инфляция	2	2		4

11	Генерация возмущений метрики	2	2		4
12	Анизотропия реликтового излучения. Черные дыры	5	5		6
Итого часов		30	30		45
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

##### Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Экспериментальные основания космологии

Обзор наблюдательных данных. Экспериментальные основания космологии. Стандартная космологическая модель. Закон Хаббла. Основные стадии расширения Вселенной. Распределение барионов и темной материи. Кривые вращения. Поиски частицы темной материи. Первичный нуклеосинтез.

##### 2. Крупномасштабная структура Вселенной

Крупномасштабная структура Вселенной. Элементы крупномасштабной структуры вселенной. Нейтрино в космологии.

##### 3. Основы ОТО

Событие, метрический тензор Минковского, хронометрическая гипотеза, уравнение геодезической, символ Кристоффеля, метрический тензор. Гравитационное красное смещение. Вывод уравнения Эйнштейна из уравнения Пуассона. Тензор Риччи. Ньютоновский предел для нерелятивистских и релятивистских частиц.

##### 4. Фридмановская модель Вселенной

Модель Фридмана, ее связь с уравнением Пуассона. Модифицированное ур. Пуассона.

##### 5. Черные дыры

Отклонение луча света массивным телом. Метрика Шварцшильда.

##### 6. Коллапс пылевого шара

Коллапс пылевого шара. Свободное падение в метрике Шварцшильда. Полузамкнутый мир.

##### 7. Тензор Римана

Координаты Крускала. Диаграмма Пенроуза. Приливной Тензор Римана. Относительное ускорение двух геодезических. Тензор Вейля. Гравитационные волны. Гармоническая калибровка. Тензор поляризации. Эффективный тензор энергии-импульса.

##### 8. Гравитационное линзирование

Отклонение луча света в поле массы М. Уравнение гравитационной линзы. Свойства гравитационных линз. Угол Хвольсона-Эйнштейна. Линзирование на различных объектах. Сильное и слабое линзирование. Модели линз: точечная, изотермическая сфера, однородный диск. Временная задержка.

## 9. Проблемы стандартной космологической модели

Проблемы стандартной космологической модели.

## 10. Космологическая инфляция

Первая инфляционная стадия расширения. Парадигма и имеющиеся модели, длительность инфляции, приближение медленного скатывания.

## 11. Генерация возмущений метрики

q-скаляр.

## 12. Анизотропия реликтового излучения. Черные дыры

Анизотропия реликтового излучения. Наблюдательные ограничения на модели инфляции. Первичные черные дыры.

## 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, оснащенная компьютером и мультимедийным оборудованием (проектор, звуковая система).

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. В.Н. Лукаш, Е.В. Михеева. Физическая космология, - М.: Физматлит, 2010.
2. S. Dodelson. Modern Cosmology, Academic Press, 2003.

### Дополнительная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 2 : Теория поля : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под. ред. Л. П. Питаевского .— 8-е изд., стереотип. — М. : Физматлит, 2001, 2003, 2006, 2012, 2014 .— 536 с.
2. Физика элементарных частиц и инфляционная космология [Текст]/А. Д. Линде, -М., Наука, 1990
3. Д.С.Горбунов, В.А.Рубаков. Введение в теорию ранней Вселенной. Издательство ЛКИ, 2008. URSS.
4. Наблюдательная и теоретическая космология. Летняя школа фонда Дмитрия Зимина «Династия», М.: URSS, 2011.
5. Observational and Physical cosmology. II Canary islands winter school of astrophysics, eds F. Sanchez, M. Collados, R. Rebolo, Cam. Uni. Press, 1992. p 3-69: V.N. Lukash, I.D. Novikov "Lectures on the very early Universe", лекции по первичному нуклеосинтезу: теория/эксперимент.
6. А.А. Гриб. Основные представления современной космологии. М.: Физматлит, 2008.
7. Е.М. Лифшиц. ЖЭТФ 16, 587, 1946.
8. В.Н. Лукаш. ЖЭТФ 79, 1601, 1980.
8. U. Seljak et al. arXiv: astro-ph/0407372.

## 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

1. <http://www.mpa-garching.mpg.de/Virgo/>
2. Aquarius Project - Galactic Halo Formation Simulation (<http://www.youtube.com/watch?v=zM3DwOuYK9g>)
3. <http://bicepkeck.org/>

**8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Microsoft PowerPoint.

**9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра проблем физики и астрофизики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Экзамен

**Разработчик:** Е.В. Михеева, канд. физ.-мат. наук

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
УК-5 Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия	УК-5.1 Способен выявлять специфику философских и научных традиций основных мировых культур
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.2 Владеет навыком руководства малым коллективом в сфере своей профессиональной деятельности
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

## 2. Показатели оценивания компетенций



В результате изучения дисциплины «Физические основы космологии» обучающийся должен:

**знать:**

геометрические понятия и наблюдаемые, которыми оперирует космология; набор параметров стандартной космологической модели и наблюдения, на которых она базируется.

**уметь:**

вычислить наблюдаемые величины при заданном наборе космологических параметров; вычислить параметры спектров возмущений в заданной модели инфляции.

**владеть:**

методами оценки космологических параметров.

**3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

Не предусмотрено.

**4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

Перечень контрольных вопросов:

1. Метрика Шварцшильда. Свет в поле Шварцшильда.
2. Отклонение луча света массивным телом.
3. Уравнение гравитационной линзы. Аксиально-симметричная линза. Угол Хвольсона-Эйнштейна.
4. Модели гравитационной линзы: точечная линза, изотермическая сфера, однородный диск.
5. Массивная частица в поле Шварцшильда. Коллапс пылевого шара.
6. Краткая история Вселенной. Стандартная космологическая модель.
7. Наблюдательные указания на наличие скрытой массы (темной материи) и темной энергии.
8. Элементы крупномасштабной структуры Вселенной.
10. Анизотропия реликтового излучения.
11. Модели инфляции.
12. Приближение медленного скатывания.
13. Длительность инфляционной стадии.
14. Модель де Ситтера.
15. Классификация возмущений метрики.
16. Генерация первичных возмущений плотности.
17. Генерация первичных гравитационных волн.
18. Наблюдательные ограничения на модели ранней Вселенной.

Примеры контрольных заданий:

1. Вывод метрики Шварцшильда.
2. Вывод уравнений Фридмана из уравнений Эйнштейна.
3. Вычислить количество е-фолдов для заданного степенного потенциала
4. Вычислить спектр скалярных возмущений для заданного степенного потенциала
5. Вычислить отношение  $T/S$  для заданного степенного потенциала.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Космологические параметры.
2. Инфлатон и его потенциал.

Билет 2.

1. Гравитационные линзы.
2. Длительность инфляционной стадии.

Билет 3.

1. Гравитационные волны астрофизической природы.

## 2. Модель де-Ситтера.

### Критерии оценивания

Оценка "отлично" (10 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка "отлично" (9 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка "отлично" (8 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочётами.

Оценка "хорошо" (7 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка "хорошо" (6 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка "хорошо" (5 баллов) выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка "удовлетворительно" (4 балла) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка "удовлетворительно" (3 балла) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка "неудовлетворительно" (2 балла) выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка "неудовлетворительно" (1 балл) выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## 5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 60 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать двух астрономических часов.