

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА АСТРОФИЗИКИ И ЗВЕЗДНОЙ АСТРОНОМИИ

УТВЕРЖДАЮ  
Декан физического факультета  
МГУ  
\_\_\_\_\_ / Н.Н. Сысоев /  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

**Наименование дисциплины:**

Гравитационные Измерения

---

**Уровень высшего образования:**

Специалитет

---

**Направление подготовки:**

03.05.01 Астрономия

---

**Направленность (профиль) ОПОП:**

Общая специальность

---

Квалификация «Специалист»

**Форма обучения:** Очная форма обучения

---

Рабочая программа рассмотрена и одобрена  
Ученым советом физического факультета МГУ

(протокол № \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_)

Москва 20\_\_

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.

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

**Авторы–составители:**

1. Д.ф.-м.н., профессор Руденко Валентин Николаевич, кафедра астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ; заведующий отделом Гравитационных измерений ГАИШ МГУ

Заведующий кафедрой

Д.ф.-м.н. профессор Постнов Константин Александрович

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины**

### **Гравитационные Измерения**

Курс посвящен анализу теории и методики прецизионных гравитационных измерений, включая их квантовые аспекты. Он содержит как описание принципиальных идей и технических деталей, относящихся к инструментальной базе современного физического эксперимента, так и примеры лабораторных и космических исследований, в которых соответствующие инструменты были успешно использованы. В широком спектре измерительных приложений акцент делается на релятивистские гравитационные эксперименты, связанные с прецизионными измерениями пространственных и временных отрезков, кинематических и динамических параметров пробных тел, находящихся в электромагнитном и гравитационном полях. Проблеме измерения самих полей также уделяется внимание. Новейшие развития экспериментальной техники такие как измерения на холодных атомах, атомная интерферометрия, оптические длинно-базовые интерферометры на земле и в космосе, радио интерферометрия для прецизионной астрометрии, космическая доплеровская локация и др. находят отражение в курсе с разной степенью детализации. Обсуждаются технические и принципиальные пределы достижимой чувствительности. Приводятся проекты будущих высокоточных экспериментов, направленных на расширение границ современного фундаментального знания.

#### **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 «ОТО и Астрофизические Наблюдения» преподается на 5-ом курсе в осеннем семестре и представляет профессиональный блок вариативной части Астрономического Отделения

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

Знания в рамках программ общих математических и физических курсов за 9 семестров обучения на Физическом факультете МГУ

## 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)
УК-1.Б	<p><b>З-1 Знать:</b> фундаментальные законы гравитации и их взаимосвязь</p> <p><b>З-2 Знать:</b> основные понятия статистического анализа данных релятивистских гравитационных экспериментов</p> <p><b>У-1 Уметь:</b> строить теоретические модели релятивистских гравитационных экспериментов, с прогнозированием возможных результатов</p> <p><b>У-2 Уметь:</b> планировать и проводить экспериментальные исследования в области релятивистской гравитации</p> <p><b>В-1 Владеть:</b> математическим аппаратом, применяемым в прецизионных гравитационных измерениях</p> <p><b>В-2 Владеть:</b> методами теоретического исследования явлений и процессов в релятивистской гравитации</p>
ОПК-1.Б	<p><b>З-1 Знать:</b> основные математические методы, используемые при решении задач релятивистской гравитации</p> <p><b>У-1 Уметь:</b> решать типовые задачи СТО и ОТО</p> <p><b>У-2 Уметь:</b> строить математические модели явлений и процессов для планирования гравитационных экспериментов.</p> <p><b>В-1 Владеть:</b> навыками проведения прецизионных физических экспериментов и обработки их результатов</p>

2. **Форма обучения:** очная.

3. **Язык обучения:** русский.

4. **Содержание дисциплины**

*Тема 1. . Атомные стандарты частоты.*

Измерение частотной стабильности. Измерение физических характеристик с помощью стабильного э/м генератора. Три типа погрешностей в физических измерениях. Принцип действия Н-мазера. Условия хранения стабильного эталона. Дисперсия Алана. Диаграмма “стабильность как функция времени”.

## *Тема 2. Эксперименты с атомными стандартами на борту.*

Наземная служба времени. Эксперименты с бортовыми стандартами. “Парадокс близнецов”, гравитационное смещение частоты. Принципиальная схема передачи частотных данных “земля-спутник”. Организация наземной службы времени. Вторичные талоны частоты, кварцевый генератор. Понятие ширины линии генератора

## *Тема 3. Атомная шкала времени и вторичные эталоны.*

Международная шкала времени. Стабилизация вторичных эталонов внешним высокочастотным резонатором. Улучшение стабильности вторичных эталонов при охлаждении. Квантовая граница ширины линии. Предельная оценка ширины линии генератора с упругим резонатором. Измерение гравитационного смещения частоты во втором порядке параметра “слабости” поля. Метрика Робертсона-Эдингтона и ПН-параметры. Измерение средней плотности материи. Эталон частоты на вращающемся роторе в магнитном подвесе. Пульсары в модели “вращающийся маяк”. Физическая природа стабильности пульсарных сигналов.

## *Тема 4 Тайминг пульсаров.*

Пульсарная шкала времени. “Пульсарный тайминг”. Блок-схема установки для тайминга пульсаров. Процедура фильтрации пульсарных импульсов. Классификация поправок тайминга. Учёт ошибки наземных часов. Предельная точность тайминга. Пульсарная шкала времени в сравнении с атомной шкалой. Измерение релятивистских эффектов в двойной с пульсаром. Косвенное доказательство ГВ-излучения по динамике орбитального периода. Экспериментальная оценка уровня стохастического ГВ-фона по остаточным отклонениям тайминга. Оценка временных вариаций ньютоновской

константы по измерению орбитального периода

## *Тема 5. Измерения гравитационного поля.*

Характеристики гравитационного поля. Пробный осциллятор как сейсмограф и акселерометр. Гравитационный градиентометр. Измерение силы тяжести. Баллистический принцип измерения ускорения силы тяжести. Прогноз достижимой точности. Приливные и неприливные вариации  $g$ . Примеры неприливных возмущений: резонанс жидкого ядра, осцилляции внутреннего ядра Земли. Порядок эффекта

## *Тема 6. Физика баллистического гравиметра.*

Понятие гравиметрической сети, история создания. Физика баллистического метода. Формула пути с учётом градиента. Методы бросания и погрешность начальной скорости. Гравиметры ГАБЛ и FG5: принципы устройства, основные характеристики. Примеры измерения наземных вариаций  $g$ . Применение баллистического гравиметра для измерения гравитационной постоянной.

## *Тема 7. Измерения на холодных атомах.*

Увеличение точности измерения временных и пространственных интервалов на “холодных” атомах. Лазерное охлаждение сгустка атомов. Необходимость автоподстройки. Оптическая и магнитно-оптическая ловушки. Понятие об атомном интерферометре. Гравиметр на холодных атомах. Физика  $\pi$ -импульсов. Структура гравиметра “атомный фонтан”. Достижимая точность.

### Тема 8. Инерциальные измерения.

Интерферометр Саньяка. Кольцевой лазерный резонатор как грави-инерциальный датчик вращательных ускорений. Предельная чувствительность акселерометра Саньяка  
Инерциальная навигация. Примеры и параметры бортовых инерциальных датчиков.  
Крупномасштабный гироскоп Саньяка как прецизионный астрометрический прибор.  
Измерение малых вариаций угловой скорости земного вращения. Релятивистские гравитационные эксперименты с гироскопом Саньяка.

### Тема 9. . Гравитационные интерферометры на подвесных зеркалах.

Задача детектирования гравитационных волн. Принципы работы лазерных гравитационных детекторов. Предельная чувствительность. Амплитудно-частотные характеристики установок ЛИГО и ВИРГО. Детектирование сигналов слияния релятивистских двойных.  
Геофизические приложения большебазовых интерферометров на подвесных зеркалах.

### Тема 10. Доплеровская локация космических аппаратов.

Слежение за динамикой космических аппаратов по прецизионным измерениям скорости. Эксперименты по измерению гравитационного смещения частоты радиосигналов слежения. Алгоритмы измерения частоты бортового стандарта по сигналу принятому наземной станцией слежения. Детектирование коротких всплесков гравитационного излучения по доплеровской локации далеких спутников

## 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		
	2	72	36	36	0	36

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

В лекционном курсе «Гравитационные Измерения» рассматривается весьма представительный набор экспериментов, уже выполненных и планируемых с привлечением установок подземной физики а также бортовых инструментов на космических аппаратах. Главным образом, это измерения параметров PPN разложения обобщенной формы релятивистской теории гравитации, а также параметров, ассоциированных с нестандартными физическими гипотезами (поиск новых взаимодействий). Анализ таких экспериментов предшествует описанию инструментальной измерительной базы, как уже имеющейся, так и ожидаемой в ближайшие годы в мировых физических лабораториях. Заметное место уделяется методике прецизионных измерений, тесно связанной с современными приемами фильтрации слабых сигналов на флуктуационном фоне различной природы.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы					Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Всего часов	Лекции	Научно-практические занятия	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Атомные стандарты частоты.	8	4	-	-	3	Собеседование, опрос
2	Эксперименты с атомными стандартами на борту.	6	4	-	-	6	
3	Атомная шкала времени и вторичные эталоны.	6	2	-	-	3	
4	Тайминг пульсаров.	6	4	-	-	3	
5	Измерения гравитационного поля.	6	4	-	-	3	
6	Физика баллистического гравиметра.	6	4	-	-	3	
7	Измерения на холодных атомах.	6	2	-	-	3	
8	Инерциальные измерения.	6	4	-	-	3	
9	Гравитационные детекторы на подвесных зеркалах.	6	4	-	-	3	
10	Доплеровская локация космических аппаратов.	6	4	-	-	3	
				-	-		
	Промежуточная аттестация	10		-	-	3	Сдача практической работы и задач с последующим собеседованием
<b>ИТОГО:</b>		<b>72</b>	<b>36</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>36</b>	

## 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Гравитационные Измерения» осуществляется на лекциях и заключается в оценке выполнения заданий, активности участия в опросах и собеседованиях по темам лекционного курса. Оценивается аргументированность позиции, а также широта используемых теоретических знаний.

Промежуточная аттестация по данной дисциплине проводится в 10 семестре в форме контрольных работ и собеседования. Зачет по контрольной работе в письменной форме. Зачет в форме собеседования по программе курса с решением задач. Результаты сдачи зачета оцениваются по двухбалльной шкале «зачет», «незачет». Первое означает 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 см пункт 4
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; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины см пункт 4
Тестирование	Средство контроля, позволяющее получить оценку уровня фактических знаний аспиранта по изученной теме.	Образцы тестов см пункт 4
<b>Оценочные средства промежуточной аттестации</b>		
Письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к экзамену см пункт 4
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 как к зачету

## 11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	незачет	зачет		
ЗНАТЬ: фундаментальные законы Гравитационных эффектов и их взаимосвязь УК-1.Б 3-1	Отсутствие знания основных законов Гравитационных эффектов и их взаимосвязей	В целом успешные, но не систематические знания фундаментальных законов Гравитационных эффектов и их взаимосвязей	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знания фундаментальных законов Гравитационных эффектов и их взаимосвязей	Успешные и систематические знания фундаментальных законов Гравитационных эффектов и их взаимосвязей
ЗНАТЬ: основные понятия математической обработки гравитационных экспериментов в УК-1.Б 3-2	Отсутствие знаний или фрагментарное знание основных понятий математической обработки гравитационных экспериментов	В целом успешное, но не систематическое знание основных понятий математической обработки гравитационных экспериментов	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знание основных понятий математической обработки гравитационных экспериментов	Успешное и систематическое знание основных понятий математической обработки гравитационных экспериментов
ЗНАТЬ: основные математические методы, используемые при решении задач ОТО ОПК-1.Б 3-1	Отсутствие знаний или фрагментарное применение основных математических методов, при решении задач ОТО	В целом успешное, но не систематическое применение основных математических методов, при решении задач ОТО	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знание основных математических методов, при решении задач ОТО	Успешное и систематическое знание основных математических методов, при решении задач ОТО
УМЕТЬ: строить теоретические модели гравитационных эффектов, используя	Отсутствие умения строить теоретические модели гравитационных эффектов, используя критически	В целом успешное, но не систематическое умение строить теоретические модели	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы умение строить теоретические	Успешное и систематическое умение строить теоретические модели гравитационных эффектов, используя

критически анализ данных УК-1.Б У-1	анализ данных	гравитационных эффектов, используя критически анализ данных	модели гравитационных эффектов, используя критически анализ данных	критически анализ данных
УМЕТЬ: планировать и проводить экспериментальные исследования в области релятивистской гравитации, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе эксперимента УК-1.Б У-2	Отсутствие умения планировать и проводить экспериментальные исследования в области релятивистской гравитации, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе эксперимента	В целом успешное, но не систематическое умение планировать и проводить экспериментальные исследования в области релятивистской гравитации, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе эксперимента	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы умение планировать и проводить экспериментальные исследования в области релятивистской гравитации, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе эксперимента	Успешное и систематическое планировать и проводить экспериментальные исследования в области релятивистской гравитации, объяснять и оценивать в рамках основных физических законов результаты, полученные в процессе эксперимента
УМЕТЬ: решать типовые задачи релятивистской гравитации ОПК-1.Б У-1	Отсутствие умения решать типовые задачи релятивистской гравитации	В целом успешное, но не систематическое умение решать типовые задачи релятивистской гравитации	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы умение решать типовые задачи релятивистской гравитации	Успешное и систематическое умение решать типовые задачи релятивистской гравитации
УМЕТЬ: строить математические модели явлений и процессов в рамках ОТО ОПК-1.Б У-2	Отсутствие умения строить математические модели физических явлений и процессов в рамках ОТО	В целом успешное, но не систематическое умение строить математические модели физических явлений и процессов	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы умение строить математические модели физических явлений и процессов	Успешное и систематическое умение строить математические модели физических явлений и процессов в рамках ОТО

		в рамках ОТО	процессов в рамках ОТО	
ВЛАДЕТЬ: математическим аппаратом, применяемым в ОТО УК-1.Б В-1	Отсутствие/фрагментарное владение математическим аппаратом, применяемым в ОТО	В целом успешное, но не систематическое владение математическим аппаратом, применяемым в ОТО	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владения математическим аппаратом, применяемым в ОТО	Успешное и систематическое владение математическим аппаратом, применяемым в ОТО
ВЛАДЕТЬ: методами теоретического исследования явлений и процессов в релятивистской гравитации УК-1.Б В-2	Отсутствие/фрагментарное владение методами теоретического исследования явлений и процессов в релятивистской гравитации	В целом успешное, но не систематическое владение методами теоретического исследования явлений и процессов в релятивистской гравитации	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владения методами теоретического исследования явлений и процессов в релятивистской гравитации	Успешное и систематическое владение методами теоретического исследования явлений и процессов в релятивистской гравитации
ВЛАДЕТЬ: навыками проведения гравитационного эксперимента и обработки его результатов ОПК-1.Б В-1	Отсутствие/фрагментарное владение навыками проведения гравитационного эксперимента и обработки его результатов	В целом успешное, но не систематическое владение навыками проведения гравитационного эксперимента и обработки его результатов	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владения навыками проведения гравитационного эксперимента и обработки его результатов	Успешное и систематическое владение навыками проведения гравитационного эксперимента и обработки его результатов

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

*Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся*

*Задачи можно найти по адресу: <http://virgo.sai.msu.ru/grav/tasks.gmd>*

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

#### *Материалы промежуточной аттестации обучающихся*

*Вопросы к зачету можно найти по адресу: <http://virgo.sai.msu.ru/grav/test.gmd>*

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

Основная литература.

1. К.Уилл. Теория и эксперимент в гравитационной физике. Энергоатом издат, 1985г. 296 стр
2. H.Dittus, C.Lammerzahl, S.Turyshev. Laser, Clocks and Drag-Free Control/ ed/Springer. -Verlag Berlin Heidelberg 2008 . ISSN 0067- 0057. 640 pages
3. В.Н.Руденко Релятивистские эксперименты в гравитационном поле. УФН т.126, с361-401,1978.

Дополнительная литература.

1. C. Freier,<sup>1</sup> M. Hauth,<sup>1</sup> V. Schkolnik et al. Mobile quantum gravity sensor with unprecedented stability arXiv:1512.05660v1 [physics.atom-ph] 17 Dec 2015
2. Savas Dimopoulos,<sup>1</sup> Peter W. Graham,<sup>2</sup> 1 Jason M. Hogan,<sup>1</sup> et al Gravitational Wave Detection with Atom Interferometry . arXiv:0712.1250v2 [gr-qc] 22 Jun 2009
3. L. Cooper <sup>1</sup>, G.E. Stedman <sup>2</sup> Axion detection by ring lasers. Physics Letters B 357 (1995) 464-468
4. G E Stedmany Ring-laser tests of fundamental physics and geophysics. Rep. Prog. Phys. **60** (1997) 615–688. Printed in the UK

#### **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.