

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:

**ФИЗИКА ФОРМИРОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ ПЛАНЕТ**

---

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 РАН, Попов Сергей Борисович, кафедра астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ
2. К.ф.-м.н., Журавлев Вячеслав Вячеславович, отдел релятивистской астрофизики ГАИШ МГУ

Заведующий кафедрой

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

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины «Физика формирования и эволюции планет"»**

Основная тематика курса связана с эволюцией экзопланет: от стадии формирования до финальных стадий жизни звезды. В первую очередь выбор продиктован актуальностью рассматриваемых проблем. Однако также существенно, что эволюционные аспекты, а также процессы на стадии формирования (протопланетные диски) близки тем областям исследований (поздние стадии эволюции звезд, эволюция двойных звезд, физика аккреции, популяционный синтез и т.д.), в которых у авторов курса есть достаточно большой опыт исследовательской работы.

### **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 «**Физика формирования и эволюции планет**» реализуется на 6-ом курсе в 1-ом семестре и является составной частью профессионального блока вариативной части.

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

Курсы общей астрономии и общей астрофизики.

## 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	<b>З-1 Знать:</b> ключевые наблюдательные факты, связанные с экзопланетными системами <b>З-2 Знать:</b> основные физические процессы, определяющие формирование и эволюцию планет <b>У-1 Уметь:</b> оценивать наблюдаемость планет заданного типа <b>У-2 Уметь:</b> рассчитывать параметры протопланетных дисков <b>В-1 Владеть:</b> методами теоретического описания формирования и эволюции экзопланет <b>В-2 Владеть:</b> методами интерпретации данных наблюдений экзопланетных систем на разных стадиях эволюции
ОПК-1.Б	<b>З-1 Знать:</b> основные теоретические подходы, используемые при описании свойств экзопланет и протопланетных дисков <b>У-1 Уметь:</b> интерпретировать в рамках современных физических моделей данные наблюдений экзопланет <b>У-2 Уметь:</b> оценивать параметры экзопланетных систем <b>В-1 Владеть:</b> навыками построения физических моделей протопланетных дисков

3. **Форма обучения:** очная.

4. **Язык обучения:** русский.

## 5. Содержание дисциплины

*Тема 1. Методы наблюдения и открытия планет. Данные. Статистика*

Метод лучевых скоростей. Метод транзитов. Гравитационное микролинзирование. Тайминг транзитов и двойных систем. Получение прямых изображений и спектров. Данные спутниковых и наземных наблюдений. Основные закономерности в распределении параметров экзопланет.

*Тема 2. Данные наблюдений по дискам и молодым системам.*

Результаты наблюдений протопланетных дисков в разных диапазонах спектра. Наблюдаемые

структуры в дисках (спирали, щели и т.д.). Данные с установки ALMA. Исследования молодых планет по прямым изображениям. Наблюдения остаточных (debris) дисков.

*Тема 3. Типы планет. Внутреннее строение и атмосферы.*

Основные типы планет. Физика внутреннего строения планет земного типа, сверхземель и газовых гигантов. Атмосферы экзопланет разных типов: структура и основные параметры.

*Тема 4. Стандартные диски в астрофизике.*

Предположения, лежащие в основе модели стандартных дисков, перенос углового момента. Уравнения, описывающие стационарную и нестационарную аккрецию, их решение. Энергетический баланс в модели стандартного диска. Альфа-параметризация вязкости и структура тонкого диска (диски Шакуры-Сюняева). Турбулентность в дисках.

*Тема 5. Структура протопланетных дисков.*

Применение модели стандартного диска к описанию протопланетного диска. Вертикальная и радиальная структура протопланетных дисков. Характерные плотности и температуры газовой и пылевой компонент в диске. Снеговая линия. Перенос излучения в дисках. Непрозрачность протопланетного диска при разных температурах. Ионизация вещества в протопланетных дисках. Дополнительный прогрев слабоаккрецирующего потока центральной звездой. Модель Чанга-Голдрайха. Наблюдаемый спектр протопланетного диска.

*Тема 6. Эволюция дисков. Остаточные (debris) диски.*

Особенности формирования протопланетных дисков. Столкновение крупных тел и последующий каскад разрушения. Формирование пыли и ее свойства. Проблема переноса момента импульса и/или существования турбулентности в холодных дисках. Вязкий масштаб времени. Роль магнитного поля звезды. Обсуждение роли магниторотационной неустойчивости в генерации турбулентности в потоке слабоионизованного вещества. Истощение газовой компоненты протопланетного диска за счет аккреции, ветра и фотоиспарения. Эволюция остаточных пылевых дисков. Торможение излучением (Poynting-Robertson drag).

*Тема 7. Образование планетезималей I. Динамика пыли в протопланетных дисках.*

Аэродинамика пыли. Рост пылинок за счет процессов оседания и радиального дрейфа в ламинарном газовом потоке и в присутствии турбулентности. Проблема "метрового рубежа" (рост тел от десятков сантиметров до десятков метров). Концентрация пыли в долгоживущих вихрях. Пучковая неустойчивость газо-пылевой среды.

*Тема 8. Образование планетезималей II. Рост планетезималей.*

Проблема роста планетезималей за счет процесса коагуляции пыли. Разница между ростом каменных и ледяных тел. Гравитационная неустойчивость пылевого субдиска: механизм Сафронова-Голдрайха-Варда и критерий Тоомре. Проблема турбулентного размывания пылевого субдиска. Пучковая неустойчивость газо-пылевой среды как возможное решение проблемы роста планетезималей.

*Тема 9. Образование земледобных планет и планет-гигантов.*

Образование земледобных планет: дисперсионный и сдвиговый режимы взаимодействия планетезималей. Зависимость величины фактора гравитационной фокусировки от дисперсии скоростей в диске планетезималей. Статистические модели эволюции диска планетезималей. Процесс коагуляции планетезималей. Стадии безудержного (runaway) и олигархического (oligarchic) роста зародышей земледобных планет. Понятие уединяющей массы (isolation mass). Рост планет-гигантов благодаря аккреции газа на твердое ядро: квази-

гидростатический режим и режим безудержного роста. «Аккреция щебенки» (pebble accretion). Альтернатива: рост планет-гигантов за счет гравитационной неустойчивости протопланетного диска.

*Тема 10. Гравитационное взаимодействие планет с протопланетным диском I.*  
Анализ взаимодействия планеты с диском в импульсном приближении. Резонансное возбуждение волн плотности в диске. Формирование подковообразной области (horseshoe region). Направление миграции. Миграция I типа: зависимость от массы планеты и параметров диска. Критерий открытия щели в диске массивной планетой. Миграция II типа.

*Тема 11. Гравитационное взаимодействие планет с протопланетным диском II.*  
Решение проблемы «горячих» Юпитеров. Проблема роста мигрирующих планет-гигантов. Миграция в турбулентном диске. Миграция в неизотермичных дисках. Быстрая миграция III типа. Миграция в самогравитирующем диске. Переходы между разными типами миграции по мере эволюции планеты и диска. Дальнейшее развитие моделей гравитационного взаимодействия планет с диском.

*Тема 12. Взаимодействие планет на ранней стадии эволюции системы.*  
Миграция в диске из планетезималей. Орбитальная релаксация планетной системы. Гравитационное рассеяние планет на планетах, «прыгающие» Юпитеры. Убегание планет. Появление орбит с высоким эксцентриситетом и наклоном. Ретроградные орбиты. Эффекты от взаимодействия некомпланарных планет с протопланетным диском. Орбитальные резонансы. Эффект Лидова-Козаи. Вопрос гравитационной устойчивости планетной системы. Роль близких пролетов звезд и молекулярных облаков. Столкновения крупных тел.

*Тема 13. Популяционный синтез.*  
Основы моделирования методом популяционного синтеза. Специфика задачи о формировании планетных систем. Примеры расчетов. Разбор особенностей моделей и основных неопределенностей.

*Тема 14. Солнечная система.*  
Формирование солнечной системы. Миграция в Солнечной системе. Nice model и ее развитие. Поздняя тяжелая бомбардировка и формирование пояса Койпера. Формирование облака Оорта. Эффект Ярковского и эволюция орбит астероидов.

*Тема 15. Планеты и диски в двойных.*  
Формирование дисков в двойных системах. Околос звездные диски и диск вокруг двойной. Влияние эффекта Лидова-Козаи. Эволюция орбит планет в двойных системах. Роль звездной эволюции.

*Тема 16. Эволюция после Главной последовательности.*  
Эволюция орбит из-за потери массы через звездный ветер. Приливная эволюция. Падение планет на звезды. Перетекание и приливное разрушение планет. Эволюция после сброса оболочки. Эволюция орбит тел вокруг белых карликов. Формирование планет вокруг нейтронных звезд.

## **7. Объем дисциплины**

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах				Самостоятельная работа студентов
		Общая трудоемкость	в том числе			
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров	
<b>Физика формирования и эволюции планет</b>	3	108	72	36	36	36

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

Изучение курса «Современная феноменология нейтронных звезд и черных дыр» включает в себя лекции, на которых рассматривается как теоретическое содержание курса, так и феноменология компактных объектов; семинарские занятия, предусматривающие углубленное изучение и обсуждение теоретических вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным и семинарским занятиям. По вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ 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	Методы наблюдения и открытия планет. Данные. Статистика.	10	4	-	4	2	Собеседование, опрос
2	Данные наблюдений по дискам и молодым системам	10	4	-	4	2	
3	Типы планет. Внутреннее строение и атмосферы	6	2	-	2	2	
4	Стандартные диски в астрофизике	6	2	-	2	2	
5	Структура протопланетных дисков	6	2	-	2	2	
6	Эволюция дисков. Остаточные (debris) диски	6	2	-	2	2	
7	Образование планетезималей I. Динамика пыли в протопланетных дисках	6	2	-	2	2	

8	Образование планетезималей II. Рост планетезималей	6	2	-	2	2	
9	Образование землеподобных планет и планет-гигантов	6	2		2	2	
10	Гравитационное взаимодействие планет с протопланетным диском I.	6	2		2	2	
11	Гравитационное взаимодействие планет с протопланетным диском II	6	2		2	2	
12	Взаимодействие планет на ранней стадии эволюции системы	6	2		2	2	
13	Популяционный синтез	6	2	-	2	2	
14	Солнечная система	6	2	-	2	2	
15	Планеты и диски в двойных	6	2	-	2	2	
16	Эволюция после Главной последовательности	6	2	-	2	2	
	Промежуточная аттестация	4				4	Самостоятельная работа
<b>ИТОГО:</b>		<b>108</b>	<b>36</b>	<b>-</b>	<b>36</b>	<b>36</b>	

## 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «**Физика формирования и эволюции планет**» осуществляется на лекциях и семинарских занятиях и заключается в оценке активности и качества участия в опросах и собеседованиях по проблемам, изучаемых в рамках тем лекционных занятий, аргументированности позиции; оценивается широта используемых теоретических знаний.

Промежуточная аттестация по дисциплине «**Физика формирования и эволюции планет**» проводится в середине семестра в форме самостоятельной работы (тест).

Результаты сдачи теста 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	Средство контроля, организованное как специальная беседа по тематике предыдущей	Перечень тем, изучаемых в



вопросы)	лекции и рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	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; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
<b>Оценочные средства промежуточной аттестации</b>		
Тестирование	Средство контроля, позволяющее получить оценку уровня фактических знаний студента по изученной теме.	Образцы тестов

## 11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
ЗНАТЬ: ключевые наблюдательные факты, связанные с экзопланетными системами УК-1.Б 3-1	Отсутствие знаний ключевых наблюдательных фактов, связанных с экзопланетными системами	В целом успешные, но не систематические знания ключевых наблюдательных фактов, связанных с экзопланетными системами	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знания ключевых наблюдательных фактов, связанных с экзопланетными системами	Успешные и систематические знания ключевых наблюдательных фактов, связанных с экзопланетными системами
ЗНАТЬ: основные физические процессы, определяющие формирование и эволюцию планет УК-1.Б 3-2	Отсутствие знаний или фрагментарное знание основных физических процессов, определяющих формирование и эволюцию планет	В целом успешное, но не систематическое знание основных физических процессов, определяющих формирование и эволюцию планет	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знание основных физических процессов, определяющих формирование и эволюцию планет	Успешное и систематическое знание основных физических процессов, определяющих формирование и эволюцию планет

			эволюцию планет	
ЗНАТЬ: основные теоретические подходы, используемые при описании свойств экзопланет и протопланетных дисков ОПК-1.Б З-1	Отсутствие знаний или фрагментарное применение основных теоретических подходов, используемых при описании свойств экзопланет и протопланетных дисков	В целом успешное, но не систематическое применение основных теоретических подходов, используемых при описании свойств экзопланет и протопланетных дисков	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знание основных теоретических подходов, используемых при описании свойств экзопланет и протопланетных дисков	Успешное и систематическое знание основных теоретических подходов, используемых при описании свойств экзопланет и протопланетных дисков
УМЕТЬ: оценивать наблюдаемость планет заданного типа УК-1.Б У-1	Отсутствие умения оценивать наблюдаемость планет заданного типа	В целом успешное, но не систематическое умение оценивать наблюдаемость планет заданного типа	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение оценивать наблюдаемость планет заданного типа	Успешное и систематическое умение оценивать наблюдаемость планет заданного типа
УМЕТЬ: рассчитывать параметры протопланетных дисков УК-1.Б У-2	Отсутствие умения рассчитывать параметры протопланетных дисков	В целом успешное, но не систематическое умение рассчитывать параметры протопланетных дисков	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение рассчитывать параметры протопланетных дисков	Успешное и систематическое умение рассчитывать параметры протопланетных дисков
УМЕТЬ: интерпретировать в рамках современных физических моделей данные наблюдений экзопланет ОПК-1.Б У-1	Отсутствие умения интерпретировать в рамках современных физических моделей данные наблюдений экзопланет	В целом успешное, но не систематическое умение интерпретировать в рамках современных физических моделей данные наблюдений экзопланет	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение интерпретировать в рамках современных	Успешное и систематическое умение интерпретировать в рамках современных физических моделей данные наблюдений экзопланет

		наблюдений экзопланет	физических моделей данные наблюдений экзопланет	
УМЕТЬ: оценивать параметры экзопланетных систем ОПК-1.Б У-2	Отсутствие умения оценивать параметры экзопланетных систем	В целом успешное, но не систематическое умение оценивать параметры экзопланетных систем	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы умение оценивать параметры экзопланетных систем	Успешное и систематическое умение оценивать параметры экзопланетных систем
ВЛАДЕТЬ: методами теоретического описания формирования и эволюции экзопланет УК-1.Б В-1	Отсутствие/фрагментарное владение методами теоретического описания формирования и эволюции экзопланет	В целом успешное, но не систематическое владение методами теоретического описания формирования и эволюции экзопланет	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владение методами теоретического описания формирования и эволюции экзопланет	Успешное и систематическое владение методами теоретического описания формирования и эволюции экзопланет
ВЛАДЕТЬ: методами интерпретации данных наблюдений экзопланетных систем на разных стадиях эволюции УК-1.Б В-2	Отсутствие/фрагментарное владение методами интерпретации данных наблюдений экзопланетных систем на разных стадиях эволюции	В целом успешное, но не систематическое владение методами интерпретации данных наблюдений экзопланетных систем на разных стадиях эволюции	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владение методами интерпретации данных наблюдений экзопланетных систем на разных стадиях эволюции	Успешное и систематическое владение методами интерпретации данных наблюдений экзопланетных систем на разных стадиях эволюции
ВЛАДЕТЬ: навыками построения физических моделей	Отсутствие/фрагментарное владение навыками построения	В целом успешное, но не систематическое владение	В целом успешно, но содержащее отдельные	Успешное и систематическое владение навыками

протопланетных дисков ОПК-1.Б В-1	физических моделей протопланетных дисков	навыками навыками построения физических моделей протопланетных дисков	пробелы владение навыками навыками построения физических моделей протопланетных дисков	построения физических моделей протопланетных дисков
--------------------------------------	--	---	--	---

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

### *Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся*

Текущий контроль осуществляется в рамках опросов и обсуждений. Материалами служат детализированные темы лекций и семинаров.

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

### *Материалы промежуточной аттестации обучающихся*

Промежуточная аттестация проводится с помощью теста. Отдельные примеры вопросов доступны по адресу <http://xray.sai.msu.ru/~polar/html/presentations.html>

**Пример:** выберете наиболее подходящий метод для поиска горячего юпитера.

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

Презентации размещаются на странице  
<http://xray.sai.msu.ru/~polar/html/presentations.html>

Основной и дополнительной литературой являются обзоры по отдельным темам курса, доступные на сайте arXiv.org. К каждой лекции прилагается свой список литературы с выделением наиболее важных работ.

Интернет-ресурсы.

1. <http://xray.sai.msu.ru/~polar/html/presentations.html>

### **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.