

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:**

**ДИНАМИКА ЗВЁЗДНЫХ СИСТЕМ**

---

**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 Расторгуев Алексей Сергеевич, кафедра экспериментальной астрономии физического факультета МГУ

Заведующий кафедрой

Д.ф.-м.н. профессор Расторгуев Алексей Сергеевич

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины «Динамика звёздных систем"»**

В данном лекционном курсе излагаются классические методы и результаты исследований строения, динамики и эволюции звёздных систем различных типов (звёздных скоплений, галактик), в которых доминируют силы взаимного притяжения звёзд. Даются базовые представления о способах описания звёздных систем, об их квазиравновесных состояниях, о регулярных и иррегулярных силах, возникающих при звёздных сближениях, и их роли в динамической эволюции. Строятся простейшие модели сферически-симметричных и осесимметричных звёздных систем, опирающиеся на известные интегралы и квазиинтегралы движения. В курсе широко используются методы статистической механики: студенты знакомятся с бесстолкновительным и столкновительным уравнением Больцмана, описывающим состояние звёздной системы, и с разными формами интеграла столкновений (Фоккера-Планка и Колмогорова-Феллера). Выводятся величины коэффициентов диффузии в пространстве скоростей и проводятся оценки времени столкновительной релаксации и темпа распада звёздных скоплений. Рассматривается влияние внешних приливных сил на звёздные системы и нестационарные стадии их эволюции, сопровождающиеся “бурной” релаксацией. Слушатели знакомятся с принципами прямого численного интегрирования гравитационной задачи  $N$  тел ( $N$ body).

### **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 «Динамика звёздных систем» реализуется на 4-ом курсе в 7-ом семестре и является составной частью профессионального блока вариативной части.

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

Освоение курсов: Общая астрономия, Галактическая астрономия, Общая астрофизика, Теоретическая механика, Небесная механика.

## 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> классификацию звёздных систем, действующие в них силы и основные физические характеристики звёздных систем <b>З-2 Знать:</b> основные физические процессы, управляющие динамикой и эволюцией гравитирующих звёздных систем <b>У-1 Уметь:</b> выполнять оценки характерных времён и сил, действующих в звёздных системах <b>У-2 Уметь:</b> описывать влияние регулярных и иррегулярных сил в звёздных системах <b>В-1 Владеть:</b> методами фазового описания гравитирующих звёздных систем <b>В-2 Владеть:</b> методами учёта иррегулярных сил и описания динамической эволюции звёздных систем
ОПК-1.Б	<b>З-1 Знать:</b> основные подходы, используемые при описании динамических процессов в звёздных системах <b>У-1 Уметь:</b> интерпретировать в рамках современных физических моделей данные наблюдений звёздных систем разных классов <b>У-2 Уметь:</b> строить равновесные модели сферических звёздных систем <b>В-1 Владеть:</b> навыками выполнения простейших оценок физических характеристик звёздных систем

2. **Форма обучения:** очная.

3. **Язык обучения:** русский.

4. **Содержание дисциплины**

*Тема 1. Введение в звёздную динамику.*

Классификация звездных систем. Физические характеристики звездных систем. Методы изучения строения звездных скоплений. Интегральное уравнение Абеля для пространственной плотности. Результаты кинематических исследований звездных систем на основе лучевых скоростей и собственных движений звезд.

## *Тема 2. Аппарат звёздной динамики.*

Изолированные и неизолированные звездные системы. Влияние приливных сил. Расчет приливных радиусов звездных скоплений, движущихся по круговым орбитам. Тожество Лагранжа-Якоби. Теорема вириала. Применение теоремы вириала. Необходимые условия устойчивости звездной системы. Простейшая оценка темпа диссипации столкновительных звездных систем (по В.Амбарцумяну).

## *Тема 3. Звёзды в потенциальном поле.*

Орбиты звезд в стационарных потенциальных полях. Понятие о константах движения и интегралах движения. Сферически-симметричные звездные системы. Орбиты звезд в поле осесимметричного потенциала. Модельные потенциалы. Орбитные "ящики". Типичные орбиты шаровых и рассеянных скоплений в Галактике. Почти круговые орбиты в осесимметричных галактиках. Эпициклическое описание орбит. Эпициклы и форма эллипсоида скоростей. Формула Линдблада. Структура орбит в фазовом пространстве. Поверхности сечения Пуанкаре. Понятие о регулярных и стохастических орбитах. Эргодические свойства орбит.

## *Тема 4. Фазовая плотность.*

Фазовое описание звездных систем. Вывод уравнения Больцмана для функции фазовой плотности. Вывод характерных времен для динамических процессов в звездных системах из теории размерностей. Понятие о времени релаксации в звездных системах. Короткая и длинная шкала характерных времен. Бесстолкновительные звездные системы.

## *Тема 5. Основное уравнение звёздной динамики.*

Уравнение Больцмана в криволинейных координатах. Понятие о равновесии звездных систем. Общее решение бесстолкновительного уравнения Больцмана. Связь классов симметрии звездных систем с числом интегралов движения. Наиболее общие решения для функции фазовой плотности бесстолкновительных звездных систем. Проблема "третьего интеграла". Квазиинтегралы движения.

## *Тема 6. Звёздная гидродинамика.*

Связь N-частичной функции распределения с фазовой плотностью. Вывод системы гидродинамических уравнений для звездных систем (уравнения Джинса). Сферические и осесимметричные системы. Макроскопические характеристики звездных систем. Уравнения Джинса для низких порядков. Отставание центроидов осесимметричных систем от LSR. Применение теории к наблюдательным данным в локальной Галактике.

## *Тема 7. Система уравнений звёздной динамики.*

Цепочка уравнений для моментов функции распределения. Уравнение Пуассона и замыкание системы уравнений звездной гидродинамики. "Уравнения состояния": связь между макроскопическими параметрами. Распределение звезд по z-координате для несамосогласованного случая. Изотермические звездные системы. Соотношение между компонентами тензора дисперсий для осесимметричных галактик.

## *Тема 8. Теоретическое моделирование звёздных систем.*

Моделирование звездных систем, совместимых с гипотезой Шварцшильдовского распределением скоростей. Модель Паренаго для осесимметричной галактики. Модель сферически-симметричного скопления с анизотропией в распределении скоростей. Модели изотропных сферических звездных систем. Баротропность. Политропные модели звездных систем. Решение Шустера. Общие свойства политропных сфер. Подобие изотермических сфер и понятие радиуса ядра.

## *Тема 9. Модели Мичи-Кинга.*

Модели сферических звездных систем с аналитической зависимостью фазовой плотности от интегралов движения. Фазовая плотность изотропных моделей, зависящая от интеграла энергии.

Модель Мичи-Кинга. Эмпирическое приближение и его применение к звездным скоплениям. Структурные параметры скоплений. Модели сферических систем с зависимостью фазовой плотности от интегралов энергии и момента. Модели Мичи и Осипкова-Меррита. Понятие об анализе устойчивости моделей звездных систем.

*Тема 10. Иррегулярные силы.*

Столкновительные звездные системы. Распределение Хольцмарка для случайной силы. Распределение сил от ближайшего соседа. Обоснование учета парных сближений звезд. Вычисление кумулятивного эффекта. Расчет коэффициентов диффузии в пространстве скоростей. Верхняя граница прицельного параметра сближений. Понятие о динамическом трении. Обоснование бесстолкновительной звездной динамики.

*Тема 11. Интеграл столкновений.*

Столкновительное уравнение Больцмана. Общий вид интеграла столкновений. Учет малых изменений скорости в результате сближений. Уравнение Фоккера-Планка. Коэффициенты диффузии. Оценка темпа диссипации из уравнения Фоккера-Планка для Максвелловского распределения скоростей.

*Тема 12. Вероятность звёздных сближений.*

Вероятностное описание звездных сближений. Роль тесных сближений. Вывод формулы Агеяна для вероятности сближения с заданным изменением скорости. Асимптотика вероятности для далеких сближений и устранение расходимости. Учет кратности звездных сближений.

*Тема 13. Параметры диссипации в звёздной системе.*

Уравнение Колмогорова-Феллера для звездной системы. Расчет локального темпа диссипации из столкновительной звездной системы. Диссипация полной энергии. Равновесная функция фазовой плотности для столкновительной системы. Особенности динамики звездных систем с неоднородным звездным составом.

*Тема 14. Модель динамической эволюции.*

Динамическая эволюция простейшей модели звездного скопления с однородным звездным составом. Полная система уравнений, описывающих динамическую эволюцию, и ее решение. Время жизни модельного скопления. Возможные конечные стадии эволюции скоплений.

*Тема 15. Численные алгоритмы.*

Методы Монте-Карло расчета динамической эволюции звездных систем. Алгоритм Аарсета (Nbody) и другие программы моделирования динамической эволюции. Влияние тесных двойных звезд на динамическую эволюцию звездных скоплений. Механизмы образования тесных пар: тройные сближения и приливной диссипативный захват. Динамическая эволюция плотных ядер шаровых скоплений.

*Тема 16. Нестационарные стадии динамической эволюции.*

Нестационарные стадии динамической эволюции звездных систем. Механизмы стохастизации и характерные времена. Понятие о бурной релаксации. Аналогия с затуханием Ландау. Простейшие оценки совместного влияния бурной и столкновительной релаксации.

## 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	
<b>Динамика звёздных систем</b>	3	108	68	34	34	40

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

Изучение курса «**Динамика звёздных систем**» 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	Введение в звёздную динамику.	6	2	-	2	2	Собеседование, опрос
2	Аппарат звёздной динамики	10	4	-	4	2	
3	Звёзды в потенциальном поле	6	2	-	2	2	
4	Фазовая плотность	6	2	-	2	2	
5	Основное уравнение звёздной динамики	6	2	-	2	2	
6	Звёздная гидродинамика	6	2	-	2	2	
7	Система уравнений звёздной	6	2	-	2	2	

	динамики						
8	Теоретическое моделирование звёздных систем	6	2	-	2	2	
9	Модели Мичи-Кинга	8	2		2	4	
10	Иррегулярные силы	6	2		2	2	
11	Интеграл столкновений	6	2		2	2	
12	Вероятность звёздных сближений	6	2		2	2	
13	Параметры диссипации в звёздной системе	6	2	-	2	2	
14	Модель динамической эволюции	6	2	-	2	2	
15	Численные алгоритмы	6	2	-	2	2	
16	Нестационарные стадии динамической эволюции	8	2	-	2	4	
	Промежуточная аттестация	4				4	Самостоятельная работа
<b>ИТОГО:</b>		<b>108</b>	<b>34</b>	<b>-</b>	<b>34</b>	<b>40</b>	

## 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Динамика звёздных систем» 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 «Динамика звёздных систем» 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 вопросы)	Средство контроля, организованное как специальная беседа по тематике предыдущей лекции и рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины



	по определенному разделу, теме, проблеме.	
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: классификацию звёздных систем, действующие в них силы и основные физические характеристики и звёздных систем УК-1.Б 3-1	Отсутствие знаний о классификации звёздных систем, действующих в них силах и основных физических характеристиках звёздных систем	В целом успешные, но не систематические знания о классификации звёздных систем, действующих в них силах и основных физических характеристиках звёздных систем	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знания о классификации звёздных систем, действующих в них силах и основных физических характеристиках звёздных систем	Успешные и систематические знания о классификации звёздных систем, действующих в них силах и основных физических характеристиках звёздных систем
ЗНАТЬ: основные физические процессы, управляющие динамикой и эволюцией гравитирующих	Отсутствие знаний или фрагментарное знание основных физических процессов, управляющих	В целом успешное, но не систематическое знание основных физических процессов,	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знание основных	Успешное и систематическое знание основных физических процессов, управляющих динамикой и

их звёздных систем УК-1.Б 3-2	динамикой и эволюцией гравитирующих звёздных систем	управляющих динамикой и эволюцией гравитирующих звёздных систем	физических процессов, управляющих динамикой и эволюцией гравитирующих звёздных систем	эволюцией гравитирующих звёздных систем
ЗНАТЬ: основные подходы, используемые при описании динамических процессов в звёздных системах ОПК-1.Б 3-1	Отсутствие знаний или фрагментарное применение основных подходов, используемых при описании динамических процессов в звёздных системах	В целом успешное, но не систематическое применение основных подходов, используемых при описании динамических процессов в звёздных системах	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знание основных подходов, используемых при описании динамических процессов в звёздных системах	Успешное и систематическое знание основных подходов, используемых при описании динамических процессов в звёздных системах
УМЕТЬ: выполнять оценки характерных времён и сил, действующих в звёздных системах УК-1.Б У-1	Отсутствие умения выполнять оценки характерных времён и сил, действующих в звёздных системах	В целом успешное, но не систематическое умение выполнять оценки характерных времён и сил, действующих в звёздных системах	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы выполнения оценки характерных времён и сил, действующих в звёздных системах	Успешное и систематическое умение выполнять оценки характерных времён и сил, действующих в звёздных системах
УМЕТЬ: описывать влияние регулярных и иррегулярных сил в звёздных системах УК-1.Б У-2	Отсутствие умения описывать влияние регулярных и иррегулярных сил в звёздных системах	В целом успешное, но не систематическое умение описывать влияние регулярных и иррегулярных сил в звёздных системах	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы умения описывать влияние регулярных и иррегулярных сил в звёздных системах	Успешное и систематическое умение описывать влияние регулярных и иррегулярных сил в звёздных системах
УМЕТЬ:	Отсутствие	В целом	В	Успешное и

интерпретировать в рамках современных физических моделей данные наблюдений звёздных систем разных классов ОПК-1.Б У-1	интерпретировать в рамках современных физических моделей данные наблюдений звёздных систем разных классов	успешное, но не систематическое умение интерпретировать в рамках современных физических моделей данные наблюдений звёздных систем разных классов	целом успешно, но содержащее отдельные пробелы умение интерпретировать в рамках современных физических моделей данные наблюдений звёздных систем разных классов	систематическое умение интерпретировать в рамках современных физических моделей данные наблюдений звёздных систем разных классов
УМЕТЬ: строить равновесные модели сферических звёздных систем ОПК-1.Б У-2	Отсутствие умения строить равновесные модели сферических звёздных систем	В целом успешное, но не систематическое умение строить равновесные модели сферических звёздных систем	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы умение строить равновесные модели сферических звёздных систем	Успешное и систематическое умение строить равновесные модели сферических звёздных систем
ВЛАДЕТЬ: методами фазового описания гравитирующих звёздных систем УК-1.Б В-1	Отсутствие/фрагментарное владение методами фазового описания гравитирующих звёздных систем	В целом успешное, но не систематическое владение методами фазового описания гравитирующих звёздных систем	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владение методами фазового описания гравитирующих звёздных систем	Успешное и систематическое владение методами фазового описания гравитирующих звёздных систем
ВЛАДЕТЬ: методами учёта иррегулярных сил и описания динамической эволюции звёздных систем	Отсутствие/фрагментарное владение методами учёта иррегулярных сил и описания динамической эволюции звёздных систем	В целом успешное, но не систематическое владение методами учёта иррегулярных сил и описания динамической эволюции	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владение методами учёта иррегулярных сил и описания	Успешное и систематическое владение методами учёта иррегулярных сил и описания динамической эволюции звёздных систем

УК-1.Б В-2		звёздных систем	динамической эволюции звёздных систем	
ВЛАДЕТЬ: навыками выполнения простейших оценок физических характеристик звёздных систем ОПК-1.Б В-1	Отсутствие/фрагментарное владение навыками выполнения простейших оценок физических характеристик звёздных систем	В целом успешное, но не систематическое владение навыками выполнения простейших оценок физических характеристик звёздных систем	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владение навыками выполнения простейших оценок физических характеристик звёздных систем	Успешное и систематическое владение навыками выполнения простейших оценок физических характеристик звёздных систем

## 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 на страничке <http://lnfm1.sai.msu.ru/~milkyway>

**Пример:** При каких условиях звёздную систему можно считать бесстолкновительной?

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

Презентации курса размещаются на странице <http://lnfm1.sai.msu.ru/~milkyway>

Рекомендуемая литература

J. Binney, S. Tremaine. Galactic Dynamics. Princeton Univ. Press, 2007.

И. Кинг. Введение в классическую звездную динамику. М.: URSS, 2003.

Л. Спитцер. Динамическая эволюция шаровых скоплений. М.: Мир. 1990.

Л.С. Марочник, А.А. Сучков. Галактика. М., Наука, 1984.

У. Саслау. Гравитационная физика звездных и галактических систем. М.: Мир. 1989.

К.Ф. Огородников. Динамика звездных систем. М.: Физматгиз, 1958.

П.П. Паренаго. Курс звездной астрономии. М.-Л., 1954.

С. Чандрасекар. Принципы звездной динамики. 1948. М.: ГИИЛ, 1948.

С. Чандрасекар. Стохастические проблемы в физике и астрономии. М.: ГИИЛ, 1947.

Курс астрофизики и звездной астрономии. (Ред. А.А. Михайлов). Т.2. М., Физматгиз, 1962.

Интернет-ресурсы.

1. <http://lnfm1.sai.msu.ru/~milkyway>

### **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.