

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:**

ПЛАЗМЕННАЯ АСТРОФИЗИКА: КИНЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

---

**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, Сомов Борис Всеволодович, отдел физики Солнца ГАИШ МГУ
2. К.ф.-м.н., Леденцов Леонид Сергеевич, отдел физики Солнца ГАИШ МГУ

Заведующий кафедрой

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

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины «Плазменная астрофизика: кинетическое описание»**

Плазменная астрофизика объединяет в себе все направления астрофизики с точки зрения плазменных и гидродинамических явлений в астрономических объектах: одиночных и двойных звездах, аккреционных дисках и их коронах, релятивистских джетах, галактиках и внегалактических объектах. Идея курса состоит в последовательном применении физических принципов, начиная с наиболее общих, и упрощающих предположений, которые позволяют получать все более простые описания плазмы в космических условиях. На основе такого подхода студенты находят ответы на два ключевых вопроса современной астрофизики: 1) какое приближение является наилучшим (простейшим, но достаточным) для описания изучаемого астрофизического явления в космической плазме, 2) как построить адекватную модель явления, например, вспышки в короне релятивистского компактного объекта.

### **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 «Плазменная астрофизика: кинетическое описание» 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

Теоретическая механика, электродинамика, общая астрофизика.

## 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> основы кинетической теории поведения плазмы <b>З-2 Знать:</b> основные понятия математической обработки наблюдательных данных астрофизической плазмы <b>У-1 Уметь:</b> строить теоретические модели астрофизической плазмы, используя простейшее, но достаточное описание явления <b>У-2 Уметь:</b> анализировать наблюдательные данные астрофизической плазмы в рамках кинетического описания <b>В-1 Владеть:</b> математическим аппаратом, применяемым в кинетической теории плазмы <b>В-2 Владеть:</b> методами кинетического подхода к исследованию явлений и процессов в астрофизической плазме
ОПК-1.Б	<b>З-1 Знать:</b> основные математические методы, используемые при решении задач кинетического описания плазмы <b>У-1 Уметь:</b> оценивать типовые кинетические параметры астрофизической плазмы <b>У-2 Уметь:</b> строить математические модели кинетических явлений и процессов в астрофизической плазме <b>В-1 Владеть:</b> навыками анализа астрономических данных о кинетических параметрах плазмы в тех или иных астрофизических явлениях и объектах

3. **Форма обучения:** очная.

4. **Язык обучения:** русский.

5. **Содержание дисциплины**

*Тема 1. Частицы и поля: точное самосогласованное описание.*

Общая постановка задачи для частиц в электромагнитном и гравитационном поле. Начальные и граничные условия. Теорема Лиувилля для точной функции распределения. Космическая плазма и гравитационные системы.

*Тема 2. Движение частицы в заданных полях.*

Электрический и гравитационный дрейфы. Слабо неоднородные медленно меняющиеся поля. Градиентный и инерционный дрейфы.

*Тема 3. Адиабатические инварианты в космической плазме.*

Три главных инварианта. Частицы в магнитных ловушках. Ускорение Ферми.

*Тема 4. Кулоновские столкновения в плазме.*

Ближние и далекие столкновения. Дебаевское экранирование и плазменные колебания. Динамическое трение в плазме. Эффект электрического убегания.

*Тема 5. Статистическое описание космической плазмы.*

Усреднение уравнения Лиувилля. Интеграл столкновений и корреляционные функции. Парные столкновения.

*Тема 6. Слабосвязанные системы с парными столкновениями.*

Малые параметры кинетической теории. Уравнение Власова и интеграл столкновений Ландау. Гравитационные системы.

*Тема 7. Распространение ускоренных частиц в космической плазме.*

Общий вид кинетического уравнения для быстрых электронов и ионов. Кинетическое уравнение при больших скоростях. Модель толстой мишени. Эффект обратного тока.

*Тема 8. Взаимодействие частица-волна в космической плазме.*

Линеаризованное уравнение Власова. Резонанс Ландау и затухание Ландау. Гирорезонанс. Стохастическое ускорение частиц волнами.

*Тема 9. Макроскопическое описание космической плазмы.*

Моменты функции распределения. Уравнения для моментов. Общие свойства уравнений переноса. Уравнение состояния и коэффициенты переноса. Гравитационные системы.

*Тема 10. Многожидкостные модели плазмы.*

Ленгмюровские волны. Электромагнитные волны в плазме.

*Тема 11. Обобщенный закон Ома в плазме.*

Замагниченная плазма. Токи и заряды в плазме.

## 7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах				
		Общая трудоемкость	в том числе ауд. занятий			Самостоятельная работа студентов
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров	
Плазменная астрофизика: кинетическое описание	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**

Изучение курса «Плазменная астрофизика: кинетическое описание» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса и самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным занятиям.

№ 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	Частицы и поля: точное самосогласованное описание.	4	2	-	-	2	Собеседование, опрос
2	Движение частицы в заданных полях.	4	2	-	-	2	
3	Адиабатические инварианты в космической плазме.	6	4	-	-	2	
4	Кулоновские столкновения в плазме.	8	4	-	-	4	
5	Статистическое описание космической плазмы.	8	4	-	-	4	
6	Слабосвязанные системы с парными столкновениями.	8	4	-	-	4	
7	Распространение ускоренных частиц в космической плазме.	8	4	-	-	4	
8	Взаимодействие частица-волна в космической плазме.	8	4	-	-	4	
9	Макроскопическое описание космической плазмы.	8	4	-	-	4	
10	Многожидкостные модели плазмы.	4	2	-	-	2	
11	Обобщенный закон Ома в плазме.	4	2	-	-	2	
	Промежуточная аттестация	2				2	Зачет в форме письменной работы 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 «Плазменная астрофизика: кинетическое описание» осуществляется на лекциях 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 «Плазменная астрофизика: кинетическое описание» проводится в седьмом семестре в форме зачета. Зачет в форме письменной работы с последующим собеседованием по программе.

## 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
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>		
Письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к экзамену
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

## 11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения	
	незачет	зачет
ЗНАТЬ: основы кинетической теории поведения плазмы УК-1.Б 3-1	Отсутствие знаний основы кинетической теории поведения плазмы	Успешные знания основы кинетической теории поведения плазмы
ЗНАТЬ: основные понятия математической обработки наблюдательных данных астрофизической плазмы УК-1.Б 3-2	Отсутствие знаний или фрагментарное знание основных понятий математической обработки наблюдательных данных астрофизической плазмы	Успешное знание основных понятий математической обработки наблюдательных данных астрофизической плазмы
ЗНАТЬ: основные математические методы, используемые при решении задач кинетического описания плазмы ОПК-1.Б 3-1	Отсутствие знаний или фрагментарное применение основных математических методов, используемых при решении задач кинетического описания плазмы	Успешное знание основных математических методов, используемых при решении задач кинетического описания плазмы
УМЕТЬ: строить теоретические модели астрофизической плазмы, используя простейшее, но достаточное описание явления УК-1.Б У-1	Отсутствие умения строить теоретические модели астрофизической плазмы, используя простейшее, но достаточное описание явления	Успешное умение строить теоретические модели астрофизической плазмы, используя простейшее, но достаточное описание явления
УМЕТЬ: анализировать наблюдательные данные астрофизической плазмы в рамках кинетического описания УК-1.Б У-2	Отсутствие умения анализировать наблюдательные данные астрофизической плазмы в рамках кинетического описания	Успешное умение анализировать наблюдательные данные астрофизической плазмы в рамках кинетического описания
УМЕТЬ: оценивать типовые кинетические параметры астрофизической плазмы ОПК-1.Б У-1	Отсутствие умения оценивать типовые кинетические параметры астрофизической плазмы	Успешное умение оценивать типовые кинетические параметры астрофизической плазмы
УМЕТЬ: строить математические модели кинетических явлений и процессов в астрофизической плазме ОПК-1.Б У-2	Отсутствие умения строить математические модели кинетических явлений и процессов в астрофизической плазме	Успешное умение строить математические модели кинетических явлений и процессов в астрофизической плазме
ВЛАДЕТЬ: математическим аппаратом, применяемым в кинетической теории плазмы УК-1.Б В-1	Отсутствие/фрагментарное владение математическим аппаратом, применяемым в кинетической теории плазмы	Успешное владение математическим аппаратом, применяемым в кинетической теории плазмы



ВЛАДЕТЬ: методами кинетического подхода к исследованию явлений и процессов в астрофизической плазме УК-1.Б В-2	Отсутствие/фрагментарное владение методами кинетического подхода к исследованию явлений и процессов в астрофизической плазме	Успешное владение методами кинетического подхода к исследованию явлений и процессов в астрофизической плазме
ВЛАДЕТЬ: навыками анализа астрономических данных о кинетических параметрах плазмы в тех или иных астрофизических явлениях и объектах ОПК-1.Б В-1	Отсутствие/фрагментарное владение навыками анализа астрономических данных о кинетических параметрах плазмы в тех или иных астрофизических явлениях и объектах	Успешное владение навыками анализа астрономических данных о кинетических параметрах плазмы в тех или иных астрофизических явлениях и объектах

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

### *Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся*

- 1) Показать, что любая функция распределения, которая является функцией интегралов движения, удовлетворяет уравнению Лиувилля.
- 2) Переписать теорему Лиувилля, используя вместо уравнений Ньютона уравнения Гамильтона.
- 3) Оцените гирочастоту для тепловых электронов и протонов в солнечной короне над пятном.
- 4) В условиях солнечной короны оценить тепловую скорость и ларморовский радиус тепловых электронов и протонов.
- 5) Покажите, что при ускорении Ферми нерелятивистская частица в среднем получает энергию при столкновениях с движущимися магнитными облаками.
- 6) Выведите формулу ускорения Ферми для релятивистской частицы.
- 7) Для электрона, движущегося в солнечной короне со средней тепловой скоростью, оценить характерное время близких и далеких столкновений с тепловыми протонами.
- 8) Оцените дебаевский радиус и плазменную частоту в солнечной короне.
- 9) Оценить и сравнить драйсеровские электрические поля в солнечной короне и хромосфере.
- 10) Показать, как в уравнении для парных корреляций появляется функция тройных корреляций
- 11) Оценить, сколько частиц находится внутри дебаевской сферы в плазме солнечной короны.
- 12) Оценить, как глубоко в хромосферу могут проникнуть электроны с начальной энергией  $E \approx 10 \text{ кэВ}$ .
- 13) Оценить величину электрического поля обратного тока в хромосфере во время солнечной вспышки.
- 14) Покажите, что для частицы, движущейся со скоростью  $v$  в плазме без магнитного поля, условию резонанса соответствует условие Черенкова.
- 15) Показать, что затухание Ландау предотвращает выход плазменных волн из региона, где  $\omega = \omega_{pl}$  в разреженную плазму, например, из солнечной короны в межпланетное пространство.
- 16) Покажите, что из колмогоровского закона подобия следует формула спектра Колмогорова-Обухова.

- 17) Напишите уравнение неразрывности с учетом ионизации и рекомбинации.
- 18) Найти условие, при котором средняя столкновительная сила определяется только случайными движениями частиц сорта  $k$ .
- 19) Покажите, что в солнечной короне коэффициент динамической вязкости  $\eta \sim T^{5/2}$ , где  $T$  – температура протонов.
- 20) Покажите, что кулоновские столкновения приводят к затуханию ленгмюровских плазменных волн.

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

#### ***Материалы промежуточной аттестации обучающихся***

- 1) Фазовое пространство. Функция распределения. Точная функция распределения.
- 2) Частицы в электромагнитном поле. Общая постановка задачи. Начальные условия.
- 3) Частица в постоянных однородных полях. Гравитационный и электрический дрейфы.
- 4) Частица в слабонеоднородных медленно меняющихся полях. Уравнение движения ведущего центра.
- 5) Гравитационный и инертный дрейфы частиц. Дрейфы, зависящие от кривизны магнитного поля.
- 6) Адиабатические инварианты. Поперечный, продольный и потоковый инварианты
- 7) Ускорение Ферми. Стохастический механизм первого порядка. Регулярный механизм второго порядка.
- 8) Кулоновские столкновения. Формула Резерфорда. Близкие и далекие столкновения.
- 9) Дебаевское экранирование. Зарядовая нейтральность и колебания в плазме.
- 10) Динамическое трение в плазме. Электрическое убежание. Тепловое убежание.
- 11) Теорема Лиувилля. Статистический механизм перемешивания в фазовом пространстве.
- 12) Интеграл столкновений. Функция парных корреляций.
- 13) Уравнение Власова. Интеграл столкновений Ландау. Уравнение Фоккера-Планка.
- 14) Распространение быстрых частиц. Толстая и тонкая мишени. Эффект обратного тока.
- 15) Взаимодействие частица-волна. Резонанс Ландау и гирорезонанс.
- 16) Стохастическое ускорение частиц волнами. Теория турбулентности Колмогорова-Обухова.
- 17) Моменты функции распределения. Законы сохранения в плазме.
- 18) Общие свойства уравнений переноса. Уравнение состояния и коэффициенты переноса.
- 19) Ленгмюровские и электромагнитные волны в плазме.
- 20) Обобщенный закон Ома в плазме. Продольная, поперечная и холловская проводимость.

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

#### **Основная литература.**

1. Somov B.V., *Plasma Astrophysics, Part I, Fundamentals and Practice*, Second Edition, Springer, New York, 2013.
2. Somov B.V., *Plasma Astrophysics, Part II, Reconnection and Flares*, Second Edition, Springer, New York, 2013.

#### **Дополнительная литература.**

1. Сомов Б.В., *Космическая электродинамика и физика Солнца*, МГУ, Москва, 1993.

### **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.