

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: магнитогидродинамическое 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: магнитогидродинамическое описание» реализуется на 4-ом курсе в 8-ом семестре и является составной частью профессионального блока вариативной части.

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

Теоретическая механика, электродинамика, общая астрофизика, плазменная астрофизика: кинетическое описание

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

3. **Форма обучения:** очная.

4. **Язык обучения:** русский.

5. **Содержание дисциплины**

*Тема 1. Одножидкостные модели астрофизической плазмы.*

Уравнение неразрывности. Закон сохранения импульса. Закон сохранения энергии.

*Тема 2. Магнитогидродинамика космической плазмы.*

Основные предположения. Полная система уравнений нерелятивистской МГД. Релятивистская МГД.

*Тема 3. Идеальная МГД.*

Интегральная и дифференциальная форма записи уравнений. Сохранение магнитного потока.

*Тема 4. Основные приближения в идеальной МГД.*

Безразмерная система уравнений. Слабые и сильные поля в плазме. Стационарные течения плазмы в сильных магнитных полях.

*Тема 5. МГД волны в космической плазме.*

Дисперсионное уравнение в идеальной МГД. Волны малой амплитуды: энтропийные, альфвеновские и магнитозвуковые. Диаграммы фазовых скоростей.

*Тема 6. Диссипативные процессы в МГД волнах.*

Неустойчивость энтропийных волн. Затухание альфвеновских волн. Учет теплового баланса в МГД волнах.

*Тема 7. Разрывные течения в МГД средах.*

Граничные условия на поверхностях разрывов. Классификация МГД разрывов по Сыроватскому. Ударные волны. Волны включения и выключения. Альфвеновский разрыв.

*Тема 8. Преобразования и эволюционность МГД разрывов.*

Непрерывные переходы между разрывными решениями МГД. Эволюционность разрывных МГД течений. Диссипативные эффекты в эволюционности. Структура разрывов и эволюционность.

*Тема 9. Магнитное пересоединение.*

Пересоединение в вакууме. Пересоединение в плазме. Токовые слои. Три стадии процесса пересоединения. Аналитические модели пересоединения.

*Тема 10. Ускорение частиц на ударных волнах.*

Диффузионный механизм ускорения. Дрейфовый механизм ускорения. Ускорение частиц в нейтральном токовом слое.

## 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: магнитогидродинамическое описание	2	72	34	34	0	38

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

Изучение курса «Плазменная астрофизика: магнитогиродинамическое 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	Одножидкостные модели астрофизической плазмы.	4	2	-	-	2	Собеседование, опрос
2	Магнитогиродинамика космической плазмы.	4	2	-	-	2	
3	Идеальная МГД.	6	2	-	-	4	
4	Основные приближения в идеальной МГД.	8	4	-	-	4	
5	МГД волны в космической плазме.	8	4	-	-	4	
6	Диссипативные процессы в МГД волнах.	8	4	-	-	4	
7	Разрывные течения в МГД средах.	8	4	-	-	4	
8	Преобразования и эволюционность МГД разрывов.	8	4	-	-	4	
9	Магнитное пересоединение.	8	4	-	-	4	
10	Ускорение частиц на ударных волнах.	8	4	-	-	4	
	Промежуточная аттестация	2				2	Зачет в форме письменной работы с последующим собеседованием
<b>ИТОГО:</b>		<b>72</b>	<b>34</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>38</b>	

## 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Плазменная астрофизика: магнитогидродинамическое описание» осуществляется на лекциях и заключается в оценке активности и качества участия в опросах и беседах по проблемам, изучаемых в рамках тем лекционных занятий, аргументированности позиции; оценивается широта используемых теоретических знаний.

Промежуточная аттестация по дисциплине «Плазменная астрофизика: магнитогидродинамическое 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 магнитогидродинамическо й теории поведения плазмы УК-1.Б 3-1	Отсутствие знаний основы магнитогидродинамической теории поведения плазмы	Успешные знания основы магнитогидродинамической 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 магнитогидродинамическог о описания плазмы ОПК-1.Б 3-1	Отсутствие знаний или фрагментарное применение основных математических методов, используемых при решении задач магнитогидродинамического описания плазмы	Успешное знание основных математических методов, используемых при решении задач магнитогидродинамического 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 магнитогидродинамическог о описания УК-1.Б У-2	Отсутствие умения анализировать наблюдательные данные астрофизической плазмы в рамках магнитогидродинамического описания	Успешное умение анализировать наблюдательные данные астрофизической плазмы в рамках магнитогидродинамического описания
УМЕТЬ: оценивать типовые магнитогидродинамически е параметры астрофизической плазмы ОПК-1.Б У-1	Отсутствие умения оценивать типовые магнитогидродинамические параметры астрофизической плазмы	Успешное умение оценивать типовые магнитогидродинамические параметры астрофизической плазмы
УМЕТЬ: строить математические модели магнитогидродинамически х явлений и процессов в астрофизической плазме	Отсутствие умения строить математические модели магнитогидродинамических явлений и процессов в астрофизической плазме	Успешное умение строить математические модели магнитогидродинамических явлений и процессов в астрофизической плазме

ОПК-1.Б У-2		
ВЛАДЕТЬ: математическим аппаратом, применяемым в магнитогидродинамической теории плазмы УК-1.Б В-1	Отсутствие/фрагментарное владение математическим аппаратом, применяемым в магнитогидродинамической теории плазмы	Успешное владение математическим аппаратом, применяемым в магнитогидродинамической теории плазмы
ВЛАДЕТЬ: методами магнитогидродинамического подхода к исследованию явлений и процессов в астрофизической плазме УК-1.Б В-2	Отсутствие/фрагментарное владение методами магнитогидродинамического подхода к исследованию явлений и процессов в астрофизической плазме	Успешное владение методами магнитогидродинамического подхода к исследованию явлений и процессов в астрофизической плазме
ВЛАДЕТЬ: навыками анализа астрономических данных о магнитогидродинамических параметрах плазмы в тех или иных астрофизических явлениях и объектах ОПК-1.Б В-1	Отсутствие/фрагментарное владение навыками анализа астрономических данных о магнитогидродинамических параметрах плазмы в тех или иных астрофизических явлениях и объектах	Успешное владение навыками анализа астрономических данных о магнитогидродинамических 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) Покажите что теплопроводность перераспределяет тепловую энергию, сохраняя ее общее количество в плазме, но увеличивает общую энтропию.
- 2) Оцените магнитную диффузию и магнитное число Рейнольдса в типичных условиях солнечной короны.
- 3) Покажите что в солнечной короне обычная вязкость плазмы может быть более важным диссипативным механизмом, чем ее электрическое сопротивление.
- 4) Оцените характерное значение альвеновской скорости в солнечной короне над большим пятном.
- 5) Покажите, что сила магнитного натяжения направлена в локальный центр кривизны.
- 6) Показать, что солнечные вспышки происходят в плазменной среде, контролируемой магнитным полем.
- 7) Оцените скорость звука в солнечной короне.
- 8) Покажите различие между энтропийными волнами в МГД и обычной гидродинамике.
- 9) Свяжите переменные потока  $\rho$ ,  $v$ , и  $p$  на поверхности обычной ударной волны.
- 10) Выведите адиабату Ранкина-Гюгонио для идеального газа.
- 11) Определите величину предельного отношения плотностей в релятивистских ударных волнах.
- 12) Запишите отношение плотностей на ударной волне как функцию числа Маха.
- 13) Покажите, что скачок энтропии газа, сжатого ударной волной, растет с увеличением силы ударной волны, но полностью не зависит от диссипативного механизма.
- 14) Покажите, что обычная ударная волна эволюционна.
- 15) Покажите, что обычный тангенциальный разрыв является неэволюционным.

- 16) Покажите, что электрическое поле между двумя параллельными электрическими токами пропорционально скорости пересоединения линий магнитного поля.
- 17) Используя общую формулу для потока энергии в идеальной МГД, найти приток магнитной энергии в пересоединяющем токовом слое.
- 18) Оцените характерное значение числа Лундквиста для токового слоя с классической кулоновской проводимостью в солнечной короне перед импульсной вспышкой.

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

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

- 1) Общие одножидкостные модели астрофизической плазмы.
- 2) Основные предположения магнитной гидродинамики. Релятивистская и нерелятивистская МГД.
- 3) Идеальная МГД. Сохранение магнитного потока.
- 4) Приближения слабого и сильного магнитного поля в МГД.
- 5) МГД волны: быстрые, медленные, альвеновские и энтропийные. Фазовая диаграмма.
- 6) Диссипативные эффекты в МГД волнах. Неустойчивость и затухание.
- 7) Феноменология разрывных течений в МГД.
- 8) Непрерывные переходы между разрывными МГД течениями.
- 9) Эволюционность МГД разрывов и ее следствия. Внутренняя структура разрыва.
- 10) Магнитное пересоединение в вакууме и плазме. Токовый слой.
- 11) Малые возмущения вблизи нейтральной линии. Дрейфовые движения частиц.
- 12) Аналитические модели магнитного пересоединения. Пересоединение Свита-Паркера. Течение Петчека. Токовый слой Сыроватского.
- 13) Диффузионное ускорение частиц на ударных волнах.
- 14) Дрейфовое ускорение частиц на ударных волнах.
- 15) Ускорение частиц в нейтральном токовом слое.

### **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.