

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы физики  
и исследований им. Ландау  
А.В. Рогачев**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Моделирование оболочек горячих юпитеров
<b>по направлению:</b>	Фотоника и оптоинформатика
<b>профиль подготовки:</b>	Фотоника, квантовые технологии и двумерные материалы Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра космической физики
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 30 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Программу составил: А.Г. Жилкин, д-р физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры космической физики 10.06.2024

## Аннотация

Курс лекций посвящен проблеме моделирования газовых оболочек горячих юпитеров. Горячие юпитеры представляют собой близкоорбитальные экзопланеты - газовые гиганты, масса которых сопоставима с массой Юпитера, а большая полуось орбиты меньше 0.1 а.е. С момента открытия первого горячего юпитера прошло уже почти четверть века, однако, до сих пор многие вопросы о их происхождении и свойствах остаются открытыми.

Научный интерес к горячим юпитерам имеет две основных причины. Первая причина связана с отсутствием подобных планет в нашей Солнечной системе, что бросает открытый вызов всем космогоническим теориям. Вторая причина обусловлена тем, что для горячих юпитеров могут быть получены характеристики их атмосфер путем исследования их спектров поглощения во время транзита. Планеты этого типа легко наблюдаемы по сравнению с другими, поскольку они имеют большой размер, а их транзиты могут наблюдаться при значительно больших углах наклона орбитальной плоскости. Сравнительно недавно были получены данные о наличии, по крайней мере, у некоторых горячих юпитеров протяженных газовых оболочек, простирающихся далеко за пределы их полостей Роша. В курсе лекций основное внимание уделено методам численного моделирования структуры и динамики оболочек горячих юпитеров.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

обучение студентов методам численного моделирования структуры и динамики оболочек горячих юпитеров

### Задачи дисциплины

получение базовых знаний, необходимых студенту для проведения научных исследований в рамках своей магистерской работы.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области фотоники и оптоинформатики
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в области фотоники и оптоинформатики
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений

ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований в области фотоники и оптоинформатики к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

основы физики космоса и вычислительной астрофизики

уметь:

выработать представление об актуальных проблемах науки и техники в области физики космоса, быть способным на научном языке формулировать профессиональные задачи

владеть:

системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук

### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

#### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Горячие юпитеры	2			2
2	Протяженные оболочки горячих юпитеров	2			2
3	Обзор методов моделирования оболочек	2			2
4	Газодинамическая модель оболочки	2			2
5	Основные типы оболочек (газодинамическое моделирование)	2			2
6	Влияние излучения звезды на течение в оболочке	2			2

7	Схема Роу-Эйнфельда для уравнений магнитной гидродинамики	2			2
8	Схема повышенного порядка аппроксимации	2			2
9	Магнитная гидродинамика с фоновым полем	2			2
10	Магнитное поле горячих юпитеров	2			2
11	Магнитное поле звездного ветра	2			2
12	Магнитосферы горячих юпитеров	2			2
13	Сверх-альфвеновский режим обтекания горячего юпитера	2			2
14	Суб-альфвеновский режим обтекания горячего юпитера	2			2
15	Воздействие КВМ на оболочку горячего юпитера	2			2
Итого часов		30			30
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

##### Семестр: 2 (Весенний)

##### 1. Горячие юпитеры

Основные наблюдательные и физические характеристики горячих юпитеров. Свойства верхних атмосфер горячих юпитеров. Аэрономические модели верхних атмосфер.

##### 2. Протяженные оболочки горячих юпитеров

Наблюдательные проявления протяженных оболочек у горячих юпитеров. Переполнение полости Роша горячего юпитера его атмосферой горячего. Стабилизация истекающих оболочек горячих юпитеров звездным ветром.

##### 3. Обзор методов моделирования оболочек

Одномерные гидростатические модели. Моделирование верхних атмосфер методом Монте-Карло. Гидродинамические модели.

##### 4. Газодинамическая модель оболочки

Уравнения газовой динамики для системы звезда-планета. Модель атмосферы и звездного ветра. Разностная схема и расчетная сетка.

##### 5. Основные типы оболочек (газодинамическое моделирование)

Замкнутые оболочки. Квази-замкнутые оболочки. Открытые оболочки. Темп потери массы горячего юпитера.

##### 6. Влияние излучения звезды на течение в оболочке

Ионизация верхней атмосферы горячего юпитера излучением родительской звезды. Влияние радиативного давления на динамику оболочки. Результаты трехмерного численного моделирования. Влияние других источников поглощения излучения.

## 7. Схема Роу-Эйнфельда для уравнений магнитной гидродинамики

Уравнения магнитной гидродинамики и их свойства. Схема Роу для численного решения уравнений МГД. Энтропийная поправка Эйнфельда. Примеры тестовых расчетов.

## 8. Схема повышенного порядка аппроксимации

Схема высокого порядка аппроксимации для уравнения адвекции. Случай гиперболической системы уравнений. Примеры тестовых расчетов для магнитной гидродинамики. Повышающая поправка для случая неоднородной сетки.

## 9. Магнитная гидродинамика с фоновым полем

Уравнения магнитной гидродинамики с фоновым полем. МГД схема Роу с учетом фонового поля. Двухэтапный метод численного решения уравнений МГД с фоновым полем. Примеры тестовых расчетов.

## 10. Магнитное поле горячих юпитеров

Магнитогидродинамическая модель оболочки горячего юпитера. Оценки величины магнитного поля горячих юпитеров. Результаты трехмерного численного моделирования структуры протяженной оболочки горячего юпитера с учетом собственного магнитного поля планеты.

## 11. Магнитное поле звездного ветра

Наблюдаемая структура солнечного ветра. Модель изотермического сферически-симметричного солнечного ветра. Магнитогидродинамическая модель солнечного ветра. Анализ решения.

## 12. Магнитосферы горячих юпитеров

Структура магнитного поля в системе звезда-планета. Возможные режимы обтекания горячих юпитеров звездным ветром. Основные типы магнитосфер горячих юпитеров. Формирование магнитодиска в магнитосфере горячего юпитера.

## 13. Сверх-альфвеновский режим обтекания горячего юпитера

Описание модели. Анализ результатов расчетов. Темп потери массы.

## 14. Суб-альфвеновский режим обтекания горячего юпитера

Результаты численного моделирования. Новый тип протяженной оболочки. Возможные особенности наблюдательных проявлений.

## 15. Воздействие КВМ на оболочку горячего юпитера

Корональные выбросы массы. Численное моделирование воздействия широкого КВМ на оболочку горячего юпитера. Модель узко-направленного магнитогидродинамического КВМ. Влияние магнитного поля на механизм взаимодействия оболочки горячего юпитера с КВМ.

## 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, доска, медиапроектор, экран.

## 6.Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Космология, гидродинамика, турбулентность. А. А. Фридман и развитие его научного наследия [Текст]/А. С. Монин, П. Я. Полубаринова-Кочина, В. И. Хлебников, -М., Наука, 1989

#### Дополнительная литература

1. Бисикало Д.В., Жилкин А.Г., Боярчук А.А. Газодинамика тесных двойных звезд. Москва: Физматлит, 2013.

### **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

База данных экзопланет [www.exoplanet.eu](http://www.exoplanet.eu)

### **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Не предусмотрено.

### **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен, с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения и понятия, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий текущей и промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.

Возможен промежуточный контроль знаний студентов в виде решения задач в соответствии с тематикой занятий.

Литература для самостоятельного изучения:

1. Гидродинамическая теория космической плазмы [Текст], [монография]/В. Б. Баранов, К. В. Краснобаев, -М., Наука, 1977
2. Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений [Текст]/А. Г. Куликовский, Н. В. Погорелов, А. Ю. Семенов, -М., ФИЗМАТЛИТ, 2012

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Фотоника и оптоинформатика
<b>профиль подготовки:</b>	Фотоника, квантовые технологии и двумерные материалы Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра космической физики
<b>курс:</b>	<u>1</u>
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	А.Г. Жилкин, д-р физ.-мат. наук, доцент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области фотоники и оптоинформатики
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в области фотоники и оптоинформатики
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
	ОПК-3.2 Способен использовать исследовательские методы при решении новых задач, применяя знания в различных областях науки (техники)
	ОПК-3.3 Владеет аналитическими и вычислительными методами решения, понимает и учитывает на практике границы применимости получаемых решений
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
	ПК-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований в области фотоники и оптоинформатики к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Моделирование оболочек горячих юпитеров» обучающийся должен:



**знать:**

основы физики космоса и вычислительной астрофизики

**уметь:**

выработать представление об актуальных проблемах науки и техники в области физики космоса, быть способным на научном языке формулировать профессиональные задачи

**владеть:**

системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук

**3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

1. Что такое горячие юпитеры?
2. Чем отличается протяженная оболочка горячего юпитера от его атмосферы?
3. Основные типы протяженных оболочек горячих юпитеров.
4. Почему магнитное поле горячих юпитеров должно быть относительно слабым?
5. Типы магнитосфер горячих юпитеров.
6. Чем отличается сверх-альфвеновский режим обтекания горячего юпитера звездным ветром от суб-альфвеновского режима?
7. Как влияют корональные выбросы массы на эволюцию горячих юпитеров?

**4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

Примеры контрольных вопросов

1. Определить положение внутренней точки Лагранжа для горячего юпитера.
2. Оценить размер магнитопаузы для горячего юпитера.
3. Определить положение альфвеновской точки для изотермического солнечного ветра.
4. Консервативная форма уравнений МГД с фоновым полем.
5. Азимутальные компоненты скорости и магнитного поля в МГД модели солнечного ветра.
6. Переполнение полости Роша горячего юпитера его атмосферой горячего. Стабилизация истекающих оболочек горячих юпитеров звездным ветром.
7. Уравнения магнитной гидродинамики и их свойства.
8. Схема Рунге для численного решения уравнений МГД. Энтропийная поправка Эйнфельдта.
9. Оценки величины магнитного поля горячих юпитеров.
10. Сверх-альфвеновский режим обтекания горячего юпитера.

Примеры экзаменационных билетов

Билет 1.

1. Основные типы протяженных оболочек горячих юпитеров.
2. Определить положение внутренней точки Лагранжа для горячего юпитера.

Билет 2.

1. Типы магнитосфер горячих юпитеров.
2. Определить положение альфвеновской точки для изотермического солнечного ветра.

Билет 3.

1. Отличие сверх-альфвеновского режима обтекания горячего юпитера звездным ветром от суб-альфвеновского режима.
2. Консервативная форма уравнений МГД с фоновым полем.

**Критерии оценивания**

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Экзамен проводится в устной форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.