

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

**УТВЕРЖДЕНО**

**и.о. директора физтех-школы  
физики и исследований им.  
Ландау**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Турбулентность в космической плазме
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика 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: Д.Р. Шкляр, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры космической физики 04.06.2020

## Аннотация

Курс лекций «Турбулентность в космической плазме» содержит основные сведения о нелинейных волновых процессах в плазме, в частности, в неоднородной магнитосферной плазме. В его основе лежат базовые представления электродинамики сплошных сред и кинетической теории.

Курс посвящен волновым процессам в космической плазме. Рассматриваются волновые моды, которые существуют в магнитоактивной плазме, в частности, в магнитосфере Земли. Изучается динамика энергичных заряженных частиц в магнитосфере и их резонансное взаимодействие с различными волновыми модами. В конце курса излагаются современные задачи и нерешенные проблемы в теории волновых процессов в космической плазме.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

Знакомство студентов с основными идеями, методами и результатами в теории турбулентности плазмы.

#### Задачи дисциплины

Приобретение студентами способности параметрического анализа процессов турбулентности плазмы и выбора подхода для решения конкретных задач в космической плазме.

### 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-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	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-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
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-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

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

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

основы теории линейных и нелинейных волновых процессов в магнитоактивной плазме.

уметь:

анализировать спутниковые данные по измерениям волн и потоков заряженных частиц, формулировать и решать соответствующие волновые задачи.

владеть:

основными методами и подходами к решению линейных и нелинейных волновых задач физики космической плазмы.

#### 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	Волны в холодной магнитоактивной плазме	10			10
2	Нелинейные волновые процессы в однородной плазме	10			10
3	Резонансное взаимодействие волн и частиц в неоднородной плазме	10			10
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. Волны в холодной магнитоактивной плазме

1. Тензор проводимости и тензор диэлектрической проницаемости холодной магнитоактивной плазмы. Общая система уравнений для электромагнитного поля в холодной магнитоактивной плазме в линейном приближении.
2. Общее дисперсионное соотношение и поляризационные коэффициенты. Дисперсионное соотношение и поляризация волн в случае продольного распространения. Резонансные частоты и частоты отсечки для различных соотношений между плазменной ( $\omega_p$ ) и циклотронной ( $\omega_c$ ) частотами.
3. Волновые моды в холодной магнитоактивной плазме: альвеновские волны, магнитозвуковые волны, свистовые волны, Z-мода, обыкновенная и необыкновенная волны. Свистовые волны в приближении  $\omega_p^2 \gg \omega_c^2$ . Угол Жандрэна. Теорема Стори.
4. Квазиэлектростатические (продольные) волны в холодной магнитоактивной плазме. Дисперсионные соотношения для квазиэлектростатических ниже-гибридных и выше-гибридных волн.

###### 2. Нелинейные волновые процессы в однородной плазме

1. Основные предположения и уравнения квазилинейной теории. Система уравнений квазилинейной теории для ленгмюровских волн.
2. Нелинейная теория затухания Ландау для ленгмюровской волны: приближение заданного поля, теория О'Нила. Теория резонансного взаимодействия волн и частиц в магнитоактивной плазме в случае продольного распространения: уравнение для энергии волны, кинетическое уравнение для резонансных частиц и его решение, вычисление инкремента.
3. Резонансное взаимодействие волн и частиц в случае распространения волны под углом к внешнему магнитному полю. Приближение изолированных резонансов. Перекрывание резонансов, критерий Чирикова возникновения стохастичности.

###### 3. Резонансное взаимодействие волн и частиц в неоднородной плазме

1. Движение частиц во внешнем слабо неоднородном магнитном поле. Поперечный адиабатический инвариант (магнитный момент). Дипольное магнитное поле. Дипольные координаты и коэффициенты Ламэ. Движение частиц в дипольном магнитном поле. Питч-угол и питч-угол конуса потерь.
2. Основные уравнения теории резонансного взаимодействия волн и частиц в неоднородной плазме: уравнение для амплитуды волнового пакета, уравнения движения и функция распределения резонансных частиц, уравнение для инкремента волны.
3. Аналогия в теории резонансного взаимодействия частиц с ленгмюровскими волнами и свистовыми волнами, распространяющимися вдоль внешнего магнитного поля. Случай сильной и слабой неоднородности. Решение уравнений движения резонансных электронов в случае сильной неоднородности. Качественный анализ движения резонансных электронов в случае слабой неоднородности. Ускорение электронов свистовыми волнами в магнитосфере.

## **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. Линейные и нелинейные волны [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Дж. Уизем ; пер. с англ. В. В. Жаринова ; под ред. А. Б. Шабата .— М. : Мир, 1977 .— 622 с.
2. Колебания, волны, структуры / Н. В. Карлов, Н. А. Кириченко. — Москва, Физматлит, 2008.— URL: <https://e.lanbook.com/book/2192> (дата обращения: 21.01.2021). - Полный текст (Режим доступа : из сети МФТИ / Удаленный доступ)

### **Дополнительная литература**

1. Электродинамика плазмы [Текст]/под ред. А. И. Ахиезера, -М., Наука, 1974
2. Волны в магнитоактивной плазме [Текст]/В. Л. Гинзбург, А. А. Рухадзе , [монография], -М., Наука, 1975
3. Физическая кинетика [Текст] : учеб. пособие для вузов / Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский .— М. : Наука, 1979 .— 528 с.

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

При переходе на дистанционное обучение лекции в электронном виде будут доступны на Яндекс-диске преподавателя.

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

При переходе на дистанционное обучение, лекции будут читаться на платформе Zoom и/или FreeConferenceCall.

## **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 преподавателю.

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

Литература для самостоятельного изучения:

1. В. И. Карпман. Нелинейные волны в диспергирующих средах. Издательство "Наука", Москва, 1973.
2. А. А. Галеев, Р.З. Сагдеев, «Нелинейная теория плазмы». Вопросы теории плазмы, том 7, стр. 3-145, Атомиздат, 1973.
3. Б.Б. Кадомцев. Коллективные явления в плазме. Москва, "Наука", 1988.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

**по направлению:** Прикладные математика и физика  
**профиль подготовки:** Общая и прикладная физика  
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау  
кафедра космической физики  
**курс:** 1  
**квалификация:** магистр

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

**Разработчик:** Д.Р. Шкляр, д-р физ.-мат. наук

## 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-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	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-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
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-1.3 Способен применять теоретические и (или) экспериментальные методы исследований к конкретной научной задаче и интерпретировать полученные результаты

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Турбулентность в космической плазме» обучающийся должен:

### знать:

основы теории линейных и нелинейных волновых процессов в магнитоактивной плазме.

### уметь:

анализировать спутниковые данные по измерениям волн и потоков заряженных частиц, формулировать и решать соответствующие волновые задачи.

### владеть:

основными методами и подходами к решению линейных и нелинейных волновых задач физики космической плазмы.

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

Задача 1. Получить выражение для угла Жандрэна ( $\theta_G \neq 0$ ), для которого групповая скорость свистовой волны направлена вдоль внешнего магнитного поля.

Задача 2. Показать, что при больших значениях волнового вектора ( $k \rightarrow \infty$ ), волны в холодной магнитоактивной плазме являются квазипродольными, то есть для них  $E \parallel k$ .

Задача 3. Как меняется кинетическая энергия захваченной по фазе резонансной частицы, взаимодействующей со свистовой волной, распространяющейся вдоль внешнего магнитного поля, при движении частицы от экватора к полюсу. Указание: считать, что резонансная скорость, как и циклотронная частота, возрастают по абсолютной величине от экватора к полюсу, и воспользоваться интегралом движения для резонансных частиц.

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

Перечень контрольных вопросов

1. Уравнения Максвелла в среде.
2. Функция распределения. Моменты функции распределения.

3. Фазовая и групповая скорость.
4. Волновые моды холодной магнитоактивной плазмы.
5. Резонансная скорость электрона при взаимодействии со свистовой волной в случае продольного и наклонного распространения.
6. Основные допущения квазилинейной теории.

#### Примеры контрольных заданий

1. Получить общее решение задачи Коши для линеаризованного уравнения КдВ и проанализировать его асимптотическое поведение при больших временах для начального возмущения, локализованного вблизи  $X = 0$ .
2. Получить и проанализировать решение уравнения теплопроводности для начального условия в виде ступеньки.
3. Доказать теорему Стори, устанавливающую максимальный угол отклонения низкочастотной свистовой волны от направления внешнего магнитного поля.
4. Вывести резонансные условия при движении частицы во внешнем однородном магнитном поле  $B = (0, 0, B_0)$  и переменном во времени электрическом поле  $E = (E_x \sin \omega t, 0, 0)$ .
5. Показать, что групповая скорость волны направлена по нормали к поверхности показателя преломления.

#### Примеры экзаменационных билетов

##### Билет 1.

1. Общее дисперсионное соотношение и поляризационные коэффициенты для волн в холодной магнитоактивной плазме.
2. Основные предположения и уравнения квазилинейной теории.

##### Задача

Показать, что для квазирезонансных свистовых волн групповая скорость перпендикулярна волновому вектору.

##### Билет 2.

1. Тензор диэлектрической проницаемости холодной магнитоактивной плазмы.
2. Резонансное взаимодействие свистовых волн и электронов в неоднородной плазме в случае продольного распространения.

##### Задача.

Получить выражения для компонент групповой скорости свистовой волны в плотной ( $\omega_p^2 \gg \omega^2$ ) плазме. Указание: при выполнении условия  $\omega_p^2 \gg \omega^2$ , квадрат показателя преломления свистовой волны имеет вид  $N^2 = \omega_p^2 / \omega (\omega \cos \theta - \omega)$ .

##### Билет 3.

1. Волновые моды в холодной магнитоактивной плазме: альвеновские волны, магнитозвуковые волны, свистовые волны
2. Основные уравнения теории резонансного взаимодействия волн и частиц в неоднородной плазме

##### Задача

Как меняется кинетическая энергия захваченной по фазе резонансной частицы, взаимодействующей со свистовой волной, распространяющейся вдоль внешнего магнитного поля, при движении частицы от экватора к полюсу. Указание: считать, что резонансная скорость, как и циклотронная частота, возрастают по абсолютной величине от экватора к полюсу, и воспользоваться интегралом движения для резонансных частиц.

#### 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 письменной (устной) форме по билетам. В каждом билете представлено два теоретических вопроса и задача. При проведении экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.