

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
Российской академии наук**



УТВЕРЖДАЮ

Зам директора Института по научной работе

С. В. Лебедев

«        »        2015 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ  
ФИЗИКА ПЛАЗМЫ**

основной образовательной программы подготовки  
научно-педагогических кадров в аспирантуре  
по направлению 03.06.01 Физика и астрономия

Профиль: 01.04.08 Физика плазмы

Квалификация: Исследователь. Преподаватель-исследователь.

Принято Ученым советом  
Протокол № 1 от 20 февраля 2015 г.

Санкт-Петербург  
2015 г.

Рабочая программа составлена на основании федеральных государственных образовательных стандартов основных образовательных программ высшего образования подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению 03.06.01 Физика и астрономия, специальность 01.04.08 Физика плазмы.

## **1. ЦЕЛЬ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Рассматриваемая дисциплина является вариативной в плане подготовке аспирантов, обучающихся по профилю 01.04.08 Физика плазмы.

Целями освоения дисциплины «Физика плазмы» являются формирование у аспирантов, обучающихся по научной специальности 01.04.08 Физика плазмы, научного кругозора и знаний в физике высокотемпературной плазмы, умение применять эти знания для разработки и исследования новых плазменных установок, перспективных для практического применения в качестве источников термоядерной энергии.

## **2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП**

Дисциплина «Физика плазмы» входит в вариативную часть учебного плана подготовки аспирантов по специальности 01.04.08 и необходима при подготовке выпускной квалификационной работы аспиранта и подготовке к сдаче кандидатского экзамена. Курс читается для аспирантов на 3-м году их пребывания в аспирантуре. Обучение ведется в форме аудиторных занятий и самостоятельной подготовки.

В результате прохождения курса обучения по данной программе, аспирант должен освоить физические принципы управляемого термоядерного синтеза и основы физики термоядерных реакторов, уделяя специальное внимание проблематике лаборатории (группы), где работает его научный руководитель, и где будет проходить самостоятельная научная работа аспиранта. Изучение данной дисциплины и специфика подачи отдельных вопросов может варьироваться в зависимости от индивидуального плана работы аспиранта, согласованного с его научным руководителем в целях оптимального соответствия решаемым задачам.

В дисциплине рассматриваются: классификация видов плазмы, движение частиц в электромагнитных полях, колебания и волны в плазме, равновесные состояния в магнитном поле, кинетическая теория волн в плазме, численные методы решения задач физики плазмы.

Для успешного освоения дисциплины аспирант должен:  
знать: общую физику, классическую электродинамику, физику пучков заряженных частиц,  
уметь: применять методы математической физики.

## **3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Процесс изучения дисциплины «Физика плазмы» направлен на формирование следующих компетенций в соответствии с ООП:

### **3.1. Универсальные компетенции:**

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1).

### **3.2. Общепрофессиональные компетенции:**

- способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов



исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1).

### 3.3. Профессиональные компетенции:

- способность проводить исследования физики переноса энергии и вещества в плазме ловушек с магнитным удержанием, на основе методик, освоенных в процессе прохождения курса, и интерпретировать результаты экспериментальных исследований с применением полученных теоретических знаний (ПК-1);
- способность проводить исследования физики ВЧ и инжекционного нагрева высокотемпературной плазмы на установках с магнитным удержанием, а также оценивать перспективность применения этих методов нагрева в термоядерных реакторах (ПК-2);
- планировать, организовывать работу по проектам, направленным на исследование физики высокотемпературной плазмы в современных установках с магнитным удержанием и на создание установок реакторного масштаба, основанных на современных представлениях о физике термоядерных реакторов (ПК-3);
- способность получать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по теме исследования, выбирать и обосновывать методы и средства решения поставленных задач (ПК-4).

В результате освоения дисциплины «Физика плазмы» аспирант должен демонстрировать и применять углубленные знания в профессиональной деятельности в области физики высокотемпературной плазмы:

## 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

общая трудоемкость дисциплины составляет 2 ЗЕ (72 часа).

### 4.1. Объем дисциплины и количество учебных часов:

Вид учебной работы	Трудоемкость (в часах)
<b>Аудиторные занятия</b>	<b>26</b>
Лекции	26
Семинары	-
Лабораторные занятия	-
Другие виды учебной работы	
<b>Внеаудиторные занятия</b>	<b>46</b>
Самостоятельная работа аспиранта	46
<b>ИТОГО</b>	<b>72</b>
	Канд. экзамен

### 4.2. Структура дисциплины

№ п/п	Тема	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу, и трудоемкость (в часах)			
		Лек	Сем	Лаб	СР
1	Введение. Основные понятия и определения.	2			3
2	Столкновения заряженных частиц в плазме.	3			4
3	Кинетическое описание плазмы.	2			3
4	Магнитогидродинамика плазмы. Уравнения моментов.	2			4

5	Плазма при отсутствии магнитного поля	3			6
6	Движение заряженных частиц в магнитном поле	3			6
7	Процессы переноса в магнитном поле	3			6
8	Одножидкостная магнитогидродинамика плазмы	3			5
9	Неустойчивости плазмы	2			4
10	Колебания и волны в плазме	3			5
	ИТОГО	26			46

## 5. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ (ТЕМ) ДИСЦИПЛИНЫ

### 5.1. Содержание аудиторных занятий

*Тема 1 – Введение. Основные понятия и определения.*

*(лекции - 2 часа)*

Ионизированные газы и плазма. Временные и пространственные масштабы установления квазинейтральности плазмы. Экранирование электрических полей в плазме. Плазменное приближение. Неидеальная плазма. Параметры плазмы в различных лабораторных и природных условиях. *(СР - часа)*

*Тема 2 – Столкновения заряженных частиц в плазме.*

*(лекции - 3 часа)*

Классический и квантовый подходы к описанию столкновений. Применение законов сохранения к столкновениям частиц. Статистика столкновений. Упругие столкновения между заряженными частицами. Роль “далеких” столкновений. Кулоновский логарифм. Упругие и неупругие столкновения заряженных частиц с атомами. Принцип Мессе. Явления ионизации и рекомбинации при столкновениях. Роль различных столкновений в балансе частиц, в изменении импульса и энергии заряженных частиц. *(СР - часа)*

*Тема 3 – Кинетическое описание плазмы.*

*(лекции - 2 часа)*

Функции распределения заряженных частиц. Кинетическое уравнение в форме Власова и Больцмана. Столкновительный интеграл. Равновесная плазма. Ионизационное равновесие. Формула Саха. Причины отклонения от равновесия в реальных условиях. Столкновительный интеграл в т-приближении. Оценка проводимости плазмы в т-приближении. *(СР - часов)*

*Тема 4 – Магнитогидродинамика плазмы. Уравнения моментов.*

*(лекции - 2 часа)*

Гидродинамическое приближение. Подход Чепмена-Экскога. Уравнения моментов. Уравнения баланса заряженных частиц. Усредненные уравнения движения для электронной и ионной компоненты. Уравнения переноса энергии. *(СР - часов)*

*Тема 5 – Плазма при отсутствии магнитного поля. (лекции - 3 часа)*

Уравнение баланса сил в слабоионизованной плазме. Сила трения и термосила. Перенос заряженных частиц. Коэффициенты подвижности, диффузии, термодиффузии. Времена установления квазинейтральности в слабоионизованной плазме при учете столкновений. Амбиполярная диффузия. Уравнения теплового баланса. Электронная и ионная теплопроводность плазмы. Граничные условия в уравнениях баланса частиц и тепловой энергии. Баланс частиц и энергии в стационарной плазме газового разряда. Направленное движение и баланс энергий в полностью ионизованной плазме. Переход электронов в режим ускорения («убегания») в полностью ионизованной плазме. Ограничение процесса «убегания» электронов. *(СР - часов)*



*Тема 6 – Движение заряженных частиц в магнитном поле*

*(лекции - 3 часа)*

Омический нагрев плазмы в токамаке и невозможность достижения термоядерных параметров в отсутствие дополнительного нагрева. Нагрев плазмы с помощью высокоэнергичных нейтральных атомов. Ионизация нейтральных атомов в плазме, роль перезарядки. Торможение энергичных ионов в плазме и формирование ионной функции распределения. Распределение мощности нагрева между ионной и электронной компонентами, критическая энергия. Устройство инжекторов высокоэнергичных атомов. Необходимость использования источников отрицательных ионов в системах инжекционного нагрева для установок реакторного масштаба. Физика нагрева ВЧ-волнами. *(СР - часов)*

*Тема 7 – Процессы переноса в магнитном поле*

*(лекции - 3 часа)*

Поперечное направленное движение в слабоионизованной плазме. Поперечный перенос энергии. Механизмы поперечной диффузии, подвижности и теплопроводности в сильном магнитном поле. Условия режима амбиполярной диффузии. Эффект «короткого замыкания». Уравнение диффузии в магнитном поле и граничные условия. Поперечное направленное движение и перенос тепла в сильноионизованной плазме. Поперечный перенос в тороидальных магнитных ловушках. Оценки ионной теплопроводности в гидродинамическом режиме и «банановом» режиме. Режим «плато». *(СР - часа)*

*Тема 8 – Одножидкостная магнитогидродинамика плазмы*

*(лекции - 3 часа)*

Магнитогидродинамическое описание плазмы, как проводящей жидкости. Уравнения магнитной гидродинамики. Обобщенный закон Ома. Диффузия магнитного поля и скин-эффект в плазме. «Вмороженность» магнитного поля в идеальной плазме. Возможности адиабатического нагрева плазмы. Удержание плазмы в магнитном поле. Плоская граница плазмы. Равновесие цилиндрического шнура с током в магнитном поле. *(СР - часа)*

*Тема 9 - Неустойчивости плазмы*

*(лекции - 2 часа)*

Проблема устойчивости плазмы. Конфигурационные неустойчивости в магнитном поле. Энергетический принцип. Желобковая неустойчивость границы слабо диамагнитной плазмы. Неустойчивости цилиндрической плазмы с током типа перетяжки и перегиба. Влияние шира магнитного поля на неустойчивость границы плазмы. *СР - часа)*

*Тема 10 - Колебания и волны в плазме*

*(лекция – 3 часа)*

Движение заряженных частиц в высокочастотном поле. Высокочастотная проводимость плазмы. Эффективная электрическая проницаемость. Распространение электромагнитных волн в плазме при отсутствии магнитного поля. Распространение поперечных волн. Продольные волны. Распространение волн в неоднородной плазме. Влияние магнитного поля на распространение волн в плазме. Продольное распространение волн. Электронный и ионный циклотронный резонансы. Поперечное распространение волн. Резонансы на гибридных частотах.

**5.2. Самостоятельная работа аспиранта**

Самостоятельная работа аспиранта включает повторение лекционного материала по темам, чтение рекомендованной литературы и научной периодики, а также изучение методических рекомендаций по работе в лаборатории.

## 6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

Цель контроля - получение информации о результатах обучения и степени их соответствия результатам обучения.

### 6.1. Текущий контроль

Текущий контроль проводится еженедельно. Критерии формирования оценки – посещаемость занятий, активность студентов на лекциях, уровень подготовки.

Текущая самостоятельная работа аспиранта направлена на углубление и закрепление знаний, и развитие практических умений.

### 6.2. Аттестация

Аттестация проводится в форме кандидатского экзамена с оценкой. Критерии формирования оценки – уровень знаний пройденного курса.

#### Вопросы к экзамену:

Билет № 1

1. Столкновения заряженных частиц друг с другом.
2. МГД и дрейфовые неустойчивости плазмы

Билет № 2

1. Столкновения электронов с атомами (упругие и неупругие)
2. Заряженные частицы в высокочастотном поле.

Билет № 3

1. Столкновения тяжелых частиц. Перезарядка.
2. Неустойчивость плазмы в сильном электромагнитном поле.

Билет № 4

1. Уравнения Больцмана и Власова.
2. Электронные ленгмюровские волны.

Билет № 5

1. Электропроводность плазмы.
2. Ионно-звуковые волны.

Билет № 6

1. Диффузия частиц при отсутствии магнитного поля.
2. Магнитозвуковые и альфвеновские волны.

Билет № 7

1. Диффузия частиц в магнитном поле.
2. Затухание Ландау.

Билет № 8

1. Движение частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях.
2. Возбуждение и затухание волн в плазме. Черенковское излучение. Раскачка плазменных колебаний пучками.

## Билет № 9

1. Разновидности дрейфового движения частиц. Дрейфовое приближение.
2. Скорость ионообразования и рекомбинации электронов и ионов, образование и разрушение возбужденных атомов.

## Билет № 10

1. Уравнения движения плазмы в магнитном поле.
2. Распространение электромагнитных волн в неоднородной плазме.

## Билет № 11

1. Явления переноса в плазме.
2. Основные нелинейные процессы взаимодействия волн в плазме.

## Билет № 12

1. Проникновение магнитного поля в плазму. Вмороженность магнитного поля в плазму.
2. Рассеяние волн в плазме.

## Билет № 13

1. Двухжидкостное приближение в магнитной гидродинамике.
2. Элементарные радиационные процессы.

## Билет № 14

1. Равновесные конфигурации плазмы в магнитном поле.
2. Основные виды электрического разряда в газах.

## Билет № 15

1. Понятие плазмы. Идеальная и неидеальная плазма.
2. Оптические методы диагностики плазмы.

## Билет № 16

1. Термодинамически равновесная плазма. Формула Саха.
2. Зондовые методы диагностики плазмы.

## Билет № 17

1. Возбуждение и диссоциация молекул электронным ударом. Кинетика возбужденных молекул в плазме.
2. Плазменный резонанс. Линейная трансформация волн в плазме.

## Билет № 18

1. Интенсивность спектральных линий.  
Сплошные спектры. Перенос излучения в среде, лучистая теплопроводность.
2. Ударные волны в плазме, скачок уплотнения, релаксационный слой.

**7. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

В процессе обучения применяются следующие образовательные технологии:

1. Сопровождение лекций показом визуального материала;
2. Использование компьютерных моделей физических процессов в высокотемпературной



плазме;

3. Выполнение учебно-научных практических работ с использованием современного научного оборудования.

## **8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Учебные, учебно-методические и иные библиотечно-информационные ресурсы обеспечивают учебный процесс и гарантируют возможность качественного освоения аспирантом образовательной программы. ФТИ им. А.Ф. Иоффе располагает доступом в Интернет, обширной библиотекой, включающей общенаучную и специальную литературу, имеет лицензии и подписки на пользование ведущими научными журналами по дисциплине.

## **9. ЛИТЕРАТУРА**

*Основная литература:*

1. В.Е. Голант, А.П. Жилинский, И.Е. Сахаров, «Основы физики плазмы», уч. пособие, 2-е изд., Изд-во «Лань», 2011г.
2. С.В. Мирнов, «Физические процессы в токамаках», М., Энергоатомиздат, 1985

*Дополнительная литература*

1. J. Л.А. Арцимович, Р.З. Сагдеев, «Физика плазмы для физиков», М., Атомиздат, 1979
2. В.А.Рожанский, Л.Д.Цендин «Неоклассический перенос в токамаках», Л. ЛПИ, 1986.
3. Электронные варианты конспектов лекций преподавателей.

## **10. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

Базы экспериментальных данных токамаков ТУМАН-3М, Глобус-М, ФТ-2, созданные и поддерживаемые лабораторией физики высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

## **11. ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ**

Отечественные журналы:

Физика плазмы ([http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=8251](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=8251); доступ с 2007 по текущий год)

Отечественные журналы в переводе:

Plasma Physics Reports (<http://link.springer.com/journal/11452>; доступ с 2000 по текущий год)

Radiophysics and Quantum Electronics (<http://www.springer.com/astronomy/journal/11141>; доступ с 1965 по текущий год)

Иностранные журналы:

Contributions to Plasma Physics

(<http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/%28ISSN%291521-3986>; доступ с 1960 по текущий год)

EPL (Europhysics Letters) (<http://iopscience.iop.org/0295-5075/>; доступ с 1986 по текущий год)

Nature (<http://www.nature.com/nature/index.html>; доступ с 1940 по текущий год)

Physics of Fluids B: Plasma Physics (<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pofb>; доступ за 1989-1993)

Physics of Plasmas (<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pop>; доступ с 1994 по текущий год)



Plasma Physics and Controlled Fusion (<http://iopscience.iop.org/0741-3335/>; доступ с 1967 по текущий год)

Plasma Chemistry and Plasma Processing (<http://link.springer.com/journal/11090>; доступ с 1981 по текущий год)

Plasma Science and Technology (<http://iopscience.iop.org/1009-0630/>; доступ с 1999 по текущий год)

Plasma Sources Science and Technology (<http://iopscience.iop.org/0963-0252/>; доступ с 1992 по текущий год)

## **12. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН располагает материально-технической базой, соответствующей санитарно-техническим нормам и обеспечивающей проведение всех видов теоретической и практической подготовки, предусмотренной учебным планом.

*Наименование оборудования для проведения занятий по дисциплине:*

1. Лекционная аудитория
2. Мультимедийный проектор
3. Персональный компьютер
4. Магнитно-маркерные доски
5. Компьютеры с доступом к базе экспериментальных данных, получаемых на токамаках лаборатории физики высокотемпературной плазмы
6. Лаборатория физики высокотемпературной плазмы, имеющая современные токамаки, оборудованные передовым оборудованием для исследования физики нагрева и удержания плазмы с магнитным удержанием.
7. Лаборатория физики атомных столкновений, имеющая современный комплекс ускорителей и анализаторов для измерения ионной функции распределения в горячей плазме.