

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

УТВЕРЖДАЮ

Директор

С.В. Иванов

« 13 » 04 2022 г.



Рабочая программа дисциплины

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре
по научной специальности 1.3.9 Физика плазмы

Принята решением Ученого совета
от 04.03.2022 № 03/22

Санкт-Петербург

2022 г.

Рабочая программа дисциплины «Физика плазмы» составлена на основании программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности 1.3.9 Физика плазмы (далее – программа аспирантуры)

1. ЦЕЛЬ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями освоения дисциплины «Физика плазмы» являются формирование у аспирантов 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 ПРОГРАММЫ

Дисциплина «Физика плазмы» входит в обязательную часть образовательного компонента программы подготовки по научной специальности 1.3.9 Физика плазмы и изучается для подготовки к сдаче кандидатского экзамена.

Курс читается для аспирантов на 3-м году обучения 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.

4. КОМПЕТЕНЦИИ АСПИРАНТА, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Процесс изучения дисциплины «Физика плазмы» направлен на формирование

следующих компетенций в соответствии с программой аспирантуры:

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:

В результате изучения дисциплины аспирант должен:

знать:

- виды плазмы и ее характеристики;
- физические процессы в плазме, определяющие ее свойства (перенос, колебания, движение в электромагнитных полях);

уметь:

- рассчитывать основные параметры плазмы: дебаевский радиус, плазменную

частоту,

сечения взаимодействия, частоты столкновений, скорости дрейфа в электромагнитных полях;

- получать дисперсионные соотношения для различных типов колебаний в плазме, инкременты неустойчивостей;

- оценивать параметры плазмы в различных электрофизических устройствах;

- профессионально излагать результаты своих исследований и представлять их в виде научных публикаций, информационно-аналитических материалов и презентаций;

- работать со специальными базами экспериментальных данных и применять численное моделирование для интерпретации результатов эксперимента

владеть:

- знаниями по фундаментальным разделам физики высокотемпературной плазмы, необходимыми для решения научно-исследовательских задач;

- методами планирования, проведения и интерпретации экспериментов по физике установок с магнитным удержанием;

- научной терминологией, основными понятиями физики плазмы в пределах, необходимых для понимания специальной научной литературы, связанной с проблемами физики удержания и нагрева в установках с магнитным удержанием.

5. 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)
Аудиторные занятия	26
Лекции	26
Внеаудиторные занятия	46
Самостоятельная работа аспиранта	46
ИТОГО	72

4.2. Структура дисциплины

№ п/п	Тема	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу, и трудоемкость (в ак. 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

6. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ (ТЕМ) ДИСЦИПЛИНЫ

6.1. Содержание аудиторных занятий

Тема 1 – Введение. Основные понятия и определения.

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.

Тема 2 – Столкновения заряженных частиц в плазме.

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.

Тема 3 – Кинетическое описание плазмы.

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.

Тема 4 – Магнитогидродинамика плазмы. Уравнения моментов.

Гидродинамическое приближение. Подход Чепмена-Экскаго. Уравнения моментов. Уравнения баланса заряженных частиц. Усредненные уравнения движения для электронной и ионной компоненты. Уравнения переноса энергии.

Тема 5 – Плазма при отсутствии магнитного поля.

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.

Тема 6 – Движение заряженных частиц в магнитном поле

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.

Тема 7 – Процессы переноса в магнитном поле

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».

Тема 8 – Одножидкостная магнитогидродинамика плазмы

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.

Тема 9 - Неустойчивости плазмы

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.

Тема 10 - Колебания и волны в плазме

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.

6.2. 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.

7. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

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

7.1. 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.

7.2. Аттестация

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

Контрольные вопросы:

1. Столкновения заряженных частиц друг с другом.
2. МГД и дрейфовые неустойчивости плазмы
3. Столкновения электронов с атомами (упругие и неупругие)
4. Заряженные частицы в высокочастотном поле.
5. Столкновения тяжелых частиц. Перезарядка.
6. Неустойчивость плазмы в сильном электромагнитном поле.
7. Уравнения Больцмана и Власова.

8. Электронные ленгмюровские волны.
9. Электропроводность плазмы.
10. Ионно-звуковые волны.
11. Диффузия частиц при отсутствии магнитного поля.
12. Магнитозвуковые и альфвеновские волны.
13. Диффузия частиц в магнитном поле.
14. Затухание Ландау.
15. Движение частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях.
16. Возбуждение и затухание волн в плазме. Черенковское излучение. Раскачка плазменных колебаний пучками.
17. Разновидности дрейфового движения частиц. Дрейфовое приближение.
18. Скорость ионообразования и рекомбинации электронов и ионов, образование и разрушение возбужденных атомов.
19. Уравнения движения плазмы в магнитном поле.
20. Распространение электромагнитных волн в неоднородной плазме.
21. Явления переноса в плазме.
22. Основные нелинейные процессы взаимодействия волн в плазме.
23. Проникновение магнитного поля в плазму. Вмороженность магнитного поля в плазму.
24. Рассеяние волн в плазме.
25. Двухжидкостное приближение в магнитной гидродинамике.
26. Элементарные радиационные процессы.
27. Равновесные конфигурации плазмы в магнитном поле.
28. Основные виды электрического разряда в газах.
29. Понятие плазмы. Идеальная и неидеальная плазма.
30. Оптические методы диагностики плазмы.
31. Термодинамически равновесная плазма. Формула Саха.
32. Зондовые методы диагностики плазмы.
33. Возбуждение и диссоциация молекул электронным ударом. Кинетика возбужденных молекул в плазме.
34. Плазменный резонанс. Линейная трансформация волн в плазме.
35. Интенсивность спектральных линий. Сплошные спектры. Перенос излучения в среде, лучистая теплопроводность.
36. Ударные волны в плазме, скачок уплотнения, релаксационный слой.

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. 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.

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)

Отечественные журналы в переводе:

-Plasma Physics Reports (<http://link.springer.com/journal/11452>;

-Radiophysics and Quantum Electronics

(<http://www.springer.com/astronomy/journal/11141> ;

Иностранные журналы:

-Contributions to Plasma Physics

(<http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/%28ISSN%291521-3986>;

-EPL (Europhysics Letters) (<http://iopscience.iop.org/0295-5075/>;

- Nature (<http://www.nature.com/nature/index.htm> ;
- Physics of Fluids B: Plasma Physics (<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pofb>;
- Physics of Plasmas (<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pop>;
- Plasma Physics and Controlled Fusion (<http://iopscience.iop.org/0741-3335/>;
- Plasma Chemistry and Plasma Processing (<http://link.springer.com/journal/11090>;
- Plasma Science and Technology (<http://iopscience.iop.org/1009-0630/>;
- Plasma Sources Science and Technology (<http://iopscience.iop.org/0963-0252/>;

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.

Программу разработал:

заведующий лабораторией физики
высокотемпературной плазмы,
д-р физ.-мат. наук, Гусаков Е.З.