

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ



УТВЕРЖДАЮ
И.о. декана физического
факультета МГУ

/ В.В. Белокуров /

«21» марта 2024 г.

**ПРОГРАММА-МИНИМУМ
КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ**

1.3.9 Физика плазмы

Шифр и наименование области науки

1. Естественные науки

Наименование отраслей науки, по которым присуждаются ученые степени

Физико-математические науки

Москва 2024

I. Описание программы

Программа-минимум кандидатского экзамена, разработана Физическим факультетом Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова на основе паспорта научной специальности, утвержденного Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, и учебного плана программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по специальности 1.3.9 Физика плазмы, в отрасли физико-математических наук.

II. Основные разделы и вопросы к экзамену

Тема 1. Основные понятия физики плазмы.

Понятие плазмы. Параметры плазмы. Плазменная частота. Дебаевский радиус.

Плазменные колебания. Дебаевское экранирование.

Функция распределения частиц плазмы. Максвелловское распределение, распределение Ферми-Дирака. Вырожденная плазма.

Газовое приближение. Плазменный параметр.

Тема 2. Элементарные процессы и кинетика плазмы.

Дифференциальное, полное, транспортное сечение рассеяния. Константа скорости реакции и скорость реакции. Столкновения первого и второго рода. Эффект Рамзауэра-Таундсенда. Частоты столкновений электронов с нейтральными и заряженными частицами. Принцип детального равновесия.

Классический метод вычисления эффективных сечений и условия его применимости. Формула Резерфорда. Модель Томсона.

Квантово-механический метод вычисления эффективных сечений взаимодействий. Борновское приближение и условия его применимости. Упругое и неупругое рассеяния электронов: рассеяние на малые и большие углы, изотропное и анизотропное рассеяние.

Прямая и ступенчатая ионизации электронным ударом. Ионизация при столкновении тяжелых частиц. Параметр Мессе. Эффект Пеннинга. Отрицательные ионы. Прилипание электронов. Рекомбинация электронов и положительных ионов. Ион-ионная рекомбинация. Резонансная перезарядка. Свободная диффузия электронов и ионов. Амбиполярная диффузия в плазме. Связь между коэффициентом диффузии, подвижностью и средней энергией электронов.

Наращение энергии электронов в постоянном и переменном электрических полях. Баланс энергии электронов. Функции распределения электронов по энергиям Максвелла и Дрювейстейна. Убегающие электроны в сильно- и слабоионизованной плазме. Рекомбинационный, прилипательный и диффузионный режимы поддержания стационарного состояния неравновесных разрядов.

Атомарные и молекулярные спектры. Связанно-связанные, связанно-свободные и свободно-свободные переходы. Механизмы уширения спектральных линий в низкотемпературной плазме. Тормозное

ирекombинационное излучение. Перенос возбуждения в газе. Радиационный перенос возбуждения.

Кинетика перераспределения энергии между различными компонентами и степенями свободы молекулярного газа. Поступательная, вращательно-поступательная и колебательно-поступательная релаксация. Функция распределения электронов по энергиям в слабоионизованной и сильно ионизованной молекулярной плазме. Механизмы нагрева молекулярного газа.

Тема 3. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях.

Движение заряженных частиц в статических электрическом и магнитном полях.

Дрейф заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях.

Движение заряженных частиц в неоднородном высокочастотном поле. Сила Миллера.

Тема 4. Электродинамика плазмы.

Уравнения Максвелла в плазменных средах. Материальные уравнения в линейной электродинамике сред с пространственной и временной дисперсией.

Тензоры диэлектрической проницаемости и проводимости. Соотношения Крамерса-Кронига для проводимости и диэлектрической проницаемости.

Диэлектрическая проницаемость изотропной электрон-ионной плазмы. Тензор диэлектрической проницаемости холодной магнитоактивной плазмы.

Энергия электромагнитного поля в среде, поток энергии. Энергии и импульсы волн в диспергирующих средах.

Дисперсионное уравнение для электромагнитных волн в анизотропной среде. Продольные и поперечные волны в изотропных средах.

Тема 5. Кинетические и гидродинамические модели плазмы. Интегралы столкновений.

Модель независимых частиц.

Уравнения многожидкостной гидродинамики.

Уравнения одножидкостной гидродинамики неизотермической плазмы.

Уравнения магнитной гидродинамики. Диффузия магнитного поля и вмороженность силовых линий магнитного поля.

Бесстолкновительное кинетическое уравнение с самосогласованным полем (кинетическое уравнение Власова).

Кинетическое уравнение с учетом столкновений. Интеграл столкновений Больцмана.

Интеграл столкновений Ландау.

Модельный интеграл столкновений Батнагара-Гросса-Крука, τ -приближение.

Тема 6. Волны в плазме. Плазменные неустойчивости.

Ленгмюровские волны в изотропной плазме. Ионно-звуковые и ионные ленгмюровские волны в неизотермической изотропной плазме. Поперечные электромагнитные волны в изотропной плазме.

Затухание Ландау волн в плазме.

Магнитогидродинамические волны. Высокочастотные волны магнитоактивной плазмы. Ленгмюровские волны в плазме в сильном внешнем магнитном поле.

Гидродинамическая и кинетическая пучковые неустойчивости в плазме.

Волны с отрицательной энергией в неравновесной плазме.

Неустойчивость плазмы с током и ионно-звуковая неустойчивость.

Поверхностные волны в пространственно-ограниченной плазме.

Проникновение поперечных и продольных электромагнитных волн в плазму.

Плазменный волновод.

Тема 7. Нелинейные явления в плазме.

Захват заряженных частиц волнами в плазме. Нелинейное насыщение пучковой неустойчивости в плазме.

Квазилинейная теория плазмы.

Приближение слабой нелинейности. Разложение материальных уравнений по степеням поля.

Нелинейное резонансное взаимодействие волн в плазме. Трехволновое взаимодействие.

Рассеяние волн на частицах плазмы.

Тема 8. Диагностика плазмы.

Зондовые методы диагностики плазмы. Ленгмюровские одиночный и двойной зонды. Электронная и ионная части вольт-амперной характеристики зонда. Определение зондовым методом концентрации электронов, потенциала плазмы, температуры и функции распределения электронов.

Диагностика плазмы с помощью сверхвысокочастотных волн.

Интерферометрия плазмы.

Определение температуры газа по доплеровскому уширению спектральных линий. Определение вращательной и колебательной температур в молекулярной плазме. Определение концентрации электронов по штарковскому уширению спектральных линий. Определение температуры электронов по тормозному и рекомбинационному спектрам.

Актинометрия.

Тема 9. Газовые разряды.

Пробой газа в электрическом поле. Первый и второй коэффициенты Таунсенда. Кривая Пашена. Вольт-амперная характеристика газового разряда.

Тлеющий разряд. Катодный слой. Нормальная плотность тока. Анодное падение потенциала. Положительный столб. Теория положительного столба в диффузионном режиме.

Дуговой разряд. Коронный разряд. Искра.

Высоковольтные наносекундные разряды.

Емкостной высокочастотный разряд. Приэлектродные слои.

Индуктивный разряд. Гибридный разряд.

Сверхвысокочастотные разряды. Свободно локализованный СВЧ разряд. Поверхностный СВЧ разряд.

Разряд в многокомпонентных газовых смесях. Механизмы пространственного разделения компонентов смеси: ионный ветер, термодиффузия, катафорез.

Диэлектрический барьерный разряд.

Дозвуковые и сверхзвуковые плазмотроны. Магнитоплазменный компрессор.

Лазерная искра.

Разряд на основе электронного циклотронного резонанса.

Механизмы распространения разрядов: волна пробоя, амбиполярная диффузия, электронная теплопроводность, медленное горение.

Тема 10. Прикладные проблемы физики плазмы.

Плазменная СВЧ-электроника. Черенковские плазменные усилители и генераторы на релятивистских электронных пучках. Излучение волн в плазме при аномальном эффекте Доплера.

Сверхзвуковая плазменная аэродинамика. Автовоспламенение. Плазменно-стимулированное горение.

Взаимодействие плазмы с поверхностью твердых тел. Плазменные технологии (травление, имплантация, упрочнение, нанесение покрытий, поверхностная модификация материалов и пр.)

МГД-преобразователи механической энергии в электрическую.

Управляемый термоядерный синтез. Магнитное удержание и нагрев плазмы в токамаках и стеллараторах. Лазерный термоядерный синтез.

Методы получения потоков ускоренных ионов. Плазменные и ионные электрореактивные двигатели.

III. Критерии оценивания

Критерии и показатели оценивания ответа на экзамене			
Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Отлично
Фрагментарные знания в области физики плазмы	Неполные знания в области физики плазмы	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания в области физики плазмы	Сформированные и систематические знания в области физики плазмы

IV. Рекомендуемая основная литература

1. Александров А.Ф., Рухадзе А.А. Лекции по электродинамике плазмopodobных сред. М: Изд. МГУ, 1999.
2. Александров А.Ф., Рухадзе А.А. Лекции по электродинамике плазмopodobных сред. Неравновесные среды. М: Изд. МГУ, 2002.

3. Александров А.Ф., Кузелев М.В. Радиофизика. Физика электронных пучков и основы высокочастотной электроники. М: Изд. «Книжный дом «Университет»», 2007.
4. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М: URSS, 2015.
5. Гинзбург В.Л., Рухадзе А.А. Волны в магнитоактивной плазме. М: URSS, 2013.
6. Силин В.П., Рухадзе А.А. Электромагнитные свойства плазмы и плазмopodobных сред. М: URSS, 2018.
7. Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Методы теории волн в средах с дисперсией. М: Физматлит, 2007.
8. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М: URSS, 2009.
9. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М: URSS, 2008.
10. Шибков В.М. Физика низкотемпературной плазмы. Часть 1. Элементарные процессы. М: Физический факультет МГУ, 2019.
11. Шибков В.М. Физика низкотемпературной плазмы. Часть 2. Кинетика плазмы. М: Физический факультет МГУ, 2019.
12. Зарин С.А., Кузовников А.А., Шибков В.М. Свободно локализованный СВЧ-разряд в воздухе. М: Нефть и газ, 1996.
13. Шибкова Л.В., Шибков В.М. Разряд в смесях инертных газов. М.: Физматлит. 2005.
14. Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Электродинамика плотных электронных пучков в плазме. М: ЛЕНАНД, 2018.
15. Кузелев М.В., Рухадзе А.А., Стрелков П.С. Плазменная релятивистская СВЧ-электроника. М: ЛЕНАНД, 2018.
16. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М: Наука. 1982.

V. Рекомендуемая дополнительная литература

1. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Т.1. М: Гостехиздат, 1952.
2. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М: Наука, 1971.
3. Александров А.Ф., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Колебания и волны в плазменных средах. М: Изд. МГУ, 1990.
4. Александров А.Ф., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Основы электродинамики плазмы. М: Высшая школа, 1988.
5. Ахиезер А.И. и др. Электродинамика плазмы. М: Наука, 1974.
6. Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме. М: Наука, 1988.
7. Елецкий А.В., Палкина Л.А., Смирнов Б.М. Явления переноса в слабоионизованной плазме. М: Атомиздат, 1975.
8. Радциг А.А., Смирнов Б.М. Справочник по атомной и молекулярной физике. М: Атомиздат, 1980.
9. Русанов В.Д., Фридман А.А. Физика химически активной плазмы. М: Наука, 1984.

10. Лохте-Хольтгрёвен В.(ред). Методы исследования плазмы. М: Мир, 1971.
11. Мак-Даниель И. Процессы столкновений в ионизованных газах. М: Мир, 1967.
12. Месси Г., Бархоп Е. Электронные и ионные столкновения. М: ИЛ, 1958.
13. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда. М: Госатомиздат, 1961.
14. Смирнов Б.М. Атомные столкновения и электронные процессы в плазме. М: Атомиздат, 1968.