**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования**
**«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»**
**(Новосибирский государственный университет, НГУ)**

**Физический факультет**
**Кафедра физики плазмы**




**Рабочая программа дисциплины**

# ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Направление подготовки **03.04.02 Физика**

Направление подготовки **03.04.01 Прикладные математика и физика**

Направленность (профиль): **все профили подготовки**

Форма обучения **Очная**

| Семестр | Общий объем | Виды учебных занятий (в часах) | | | | Промежуточная аттестация (в часах) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Контактная работа обучающихся с преподавателем | | | Самостоятельная работа, не включая период сессии | Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации | Контактная работа обучающихся с преподавателем | | | |
| | | Лекции | Практические занятия | Лабораторные занятия | | | Консультации | Зачет | Дифференцированный зачет | Экзамен |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1 | 144 | 32 | 32 | | 58 | 18 | 2 | | | 2 |
| Всего 144 часа / 4 зачётные единицы, из них:<br>- контактная работа 68 часов | | | | | | | | | | |
| Компетенции ОПК-1(03.04.02 Физика, 03.04.01 Прикладные математика и физика) | | | | | | | | | | |

Руководитель программы
д.ф.-м.н., И.Б. Логашенко

**Новосибирск, 2026**

**Содержание**

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы. ....3

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы. ....4

3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу. ....4

4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий. ....5

5. Перечень учебной литературы. ....9

6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся. ....9

7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины. ....9

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине. ....10

9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине. ....10

10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине. ....10

## 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Дисциплина «Физика плазмы» относится к профессиональному циклу и предлагается к изучению по выбору магистрантам в качестве альтернативной. В результате изучения дисциплины магистранты должны овладеть основными понятиями и методами физики плазмы, изучить основные теоретические подходы к описанию плазменных процессов, ознакомиться с современным состоянием дел в области исследований высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза, с применениями плазменных процессов в современных технологиях, с ролью плазменных процессов в астрофизике.

Особенностью данного курса является то, что он предлагается к изучению магистрантами, для которых данная научная дисциплина не является профильной. Поэтому при выборе структуры курса и тематики лекций особое внимание обращалось на поддержание баланса между глубиной и точностью изложения материала в теоретической части и наиболее подробным и широким охватом состояния работ и исследований по плазменным тематикам.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося общепрофессиональной компетенции:

| Результаты освоения образовательной программы (компетенции) | Индикаторы | Результаты обучения по дисциплине |
|---|---|---|
| **ОПК-1. (03.04.02 Физика)** Способен применять фундаментальные знания в области физики для решения научно-исследовательских задач, а также владеть основами педагогики, необходимыми для осуществления преподавательской деятельности. | **ОПК - 1.1.** Применяет фундаментальные и прикладные знания, новейшие достижения в области физико-математических и естественных наук для решения поставленных задач при проведении научных работ, аналитических и (или) проектных исследований в избранной области профессиональной деятельности.<br>**ОПК - 1.2.** Применяет современные экспериментальные и теоретические методы, информационные технологии для решения поставленных задач при проведении научных работ, аналитических и (или) проектных исследований в избранной области профессиональной деятельности. | **Знать** определения и формулы для основных величин, характеризующих плазму; плазменные явления в природе, технике и лабораторных экспериментах; характерные параметры лабораторной и космической плазмы; методы, возможности и области применимости различных теоретических моделей, используемых для описания явлений в плазме; параметры плазмы, необходимые для реализации управляемого термоядерного синтеза; задачи, направления и статус работ по управляемому термоядерному синтезу1<br>**Уметь** применять изученные модели и методы для нахождения решения простых задач по тематике курса. |
| **ОПК-1. (03.04.01 Прикладные математика и физика)** Способен применять фундаментальные знания в области физики для решения научно-исследовательских задач, а также владеть основами педагогики, необходимыми для | **ОПК - 1.1.** Применяет фундаментальные и прикладные знания, новейшие достижения в области физико-математических и естественных наук для решения поставленных задач при проведении научных работ, аналитических и (или) проектных исследова- | |

| Результаты освоения образовательной программы (компетенции) | Индикаторы | Результаты обучения по дисциплине |
|---|---|---|
| осуществления преподавательской деятельности. | ний в избранной области профессиональной деятельности.<br>**ОПК - 1.2.** Применяет современные экспериментальные и теоретические методы, информационные технологии для решения поставленных задач при проведении научных работ, аналитических и (или) проектных исследований в избранной области профессиональной деятельности. | **Владеть** методами вычисления свойств плазмы по заданным основным параметрам (плотности, температуре). |

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы.

Дисциплина «Физика плазмы» реализуется в осеннем семестре 1-го курса для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки **03.04.02 Физика**, **03.04.01 Прикладные математика и физика**. Курс является одной из профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой физики плазмы.

Для его восприятия требуется предварительная подготовка студентов по таким разделам физики как механика, электродинамика, физика сплошных сред, физика атомов и молекул. Требуется также знание основных операций векторного и тензорного анализа в декартовой, цилиндрической и сферической системах координат.

Параллельно лекциям проводятся практические занятия, в ходе которых обучаемые закрепляют полученные на лекциях теоретические знания и овладевают практическими навыками решения простейших задач по физике плазмы.

## 3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Трудоемкость дисциплины – 4 з.е. (144 ч)

Форма промежуточной аттестации: 1 семестр – экзамен

4. Таблица 3.1

| № | Вид деятельности | Семестр |
|---|---|---|
| | | 1 |
| 1 | Лекции, ч | 32 |
| 2 | Практические занятия, ч | 32 |
| 3 | Лабораторные занятия, ч | |
| 4 | Занятия в контактной форме, ч,<br>из них | 68 |
| 5 | из них аудиторных занятий, ч | 64 |
| 6 | в электронной форме, ч | - |
| 7 | консультаций, час. | 2 |
| 8 | промежуточная аттестация, ч | 2 |
| 9 | Самостоятельная работа, час. | 76 |

| | | |
|---|---|---|
| 10 | Всего, ч | 144 |

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

**Программа и основное содержание лекций (32 часа)**

| | |
|---|---|
| **Введение.** Структура курса. О системе оценок. Программа курса. Литература. | 0,5 |
| **Тема 1. Понятие плазмы.** Что такое плазма? Плазма молнии. Околоземная плазма. Вселенная. Плазма в быту. Плазменные технологии. Определение плазмы. Рождение «плазмы». Ирвинг Ленгмюр. Единицы измерения • температура. Четвёртое состояние вещества. Взаимодействие частиц в плазме. Это тоже плазма. Некоторые определения и обозначения. Классическая и вырожденная плазма. Идеальная и неидеальная плазма. Пространство параметров. Примеры типов плазмы. Типичные параметры плазмы. Квазинейтральность плазмы. Дебаевский радиус. Плазменные колебания. Плазменная частота. Поле в плазме: пробный заряд. Дебаевская экранировка. Проникновение поля в плазму. Разделение зарядов на границе. Значение дебаевского радиуса. Дебаевская сфера. Энергия взаимодействия частицы. Параметр неидеальности плазмы. | 1,5 |
| **Тема 2. Элементарные процессы в плазме. Равновесие.** Элементарные процессы в плазме. Ионизация электронным ударом. Фотоионизация и фоторекомбинация. Модели равновесия в плазме. Плазма в термодинамическом равновесии. Учитываем свободные электроны. Формула Саха́. Степень ионизации. Комментарии к выводу. Корональное равновесие. Сравнение моделей. Некоторые другие элементарные процессы. Резонансная перезарядка. Атомарные пучки большой мощности. Диагностика по нейтралам перезарядки. Эксперимент – установка ГОЛ-3 (ИЯФ). | 2 |
| **Тема 3. Столкновения частиц в плазме.** Столкновения частиц в плазме. Транспортное сечение. Кулоновский логарифм. Траектории частиц в плазме. Релаксация импульса и энергии частиц. Задача о рассеянии частицы. Рассеяние в холодной плазме. Рассеяние в горячей плазме. Аналогия с электростатикой. Сила торможения для разных частиц. Сравнение торможения в газе и плазме. Проводимость плазмы. «Убегающие электроны». Время релаксации энергии. | 2 |
| **Тема 4. Излучение плазмы.** Низкотемпературная плазма. Токамак Tore Supra (Cadarashe, France). Плазма в токамаке Tore Supra. Термоядерная плазма. Типы излучения плазмы. Оптически непрозрачная плазма. Циклотронное излучение. Циклотронное излучение из плазмы. ЭЦИ диагностика на токамаке. Тормозное излучение – одна частица. Тормозное излучение – плазма. Рекомбинационное излучение. Тормозное и рекомбинационное излучение. Линейчатое излучение. Пример сложного спектра плазмы. Диагностика электронной температуры. Типы линейчатых спектров. Интенсивность линейчатого излучения. Отношение мощности двух линий. Оценка температуры по составу ионов. Уширение спектральных линий. Доплеровское уширение. Измерение ионной температуры. Штарковское расщепление линий. Штарковское уширение в плазме. Использование эффекта Штарка. Эффект Зеемана. Диагностика локального магнитного поля. Излучение плазмы с атомными пучками. MSE-диагностика на установке ГДЛ. Молекулярные спектры в плазме. Молекулярная полоса $C_2$. | 2 |
| **Тема 5. Кинетическое уравнение.** Теоретические модели описания плазмы. Кинетическое уравнение с самосогласованным полем. Функция распределения. Самосогласованное и случайное поле. Кинетическое уравнение. Интеграл столкновений. Свойства интеграла столкновений. Формула для электропроводности. Коэффициент теплопроводности. Коэффициенты переноса. Комментарий по поводу закона Ома. | 2 |

| | |
|---|---|
| **Тема 6. Магнитная гидродинамика.** Двухжидкостная магнитная гидродинамика. Моменты кинетического уравнения. Уравнение движения. Уравнение теплопереноса. Переход к одножидкостной модели. Одножидкостная магнитная гидродинамика. Переход к одножидкостным уравнениям. Одножидкостные МГД-уравнения. Сокращённые уравнения Максвелла. Уравнение вмороженности. Почему называется «вмороженность»? Магнитное динамо. Тензор напряжений магнитного поля. Направление давления поля. Понятие равновесия плазмы. Простейшие равновесия ● тэта-пинч. Простейшие равновесия ● Z-пинч. МГД-неустойчивости Z-пинча. Установка MAGPIE – теневые диагностики. Желобковая неустойчивость. Метод малых колебаний. Типы плазменных неустойчивостей. | 2 |
| **Тема 7. Волны в плазме.** Просто волны (напоминание). Волны в плазме простыми словами. Волны в однородной плазме. Диэлектрическая проницаемость. Ленгмюровская волна. Движение частиц в ленгмюровской волне. Ионный звук. Свойства ионного звука. Затухание Ландау. Физический смысл затухания Ландау. Нелинейное затухание Ландау. Электромагнитные волны. Дисперсионное соотношение для электромагнитной волны. Распространение радиоволн. Интерферометрия плазмы. СВЧ диагностики плазмы. Интерферометр на стеллараторе LHD. Дисперсионный интерферометр. Волны в однородной плазме ● резюме. МГД-волны в замагниченной плазме. Уравнения для МГД возмущений. Альфвеновские волны. Свойства альфвеновской волны. Магнитный звук. Распространение магнитного звука. | 2 |
| **Тема 8. Движение частиц в магнитном поле.** Однородное магнитное поле. Циклотронный резонанс. Источники СВЧ – гиротроны ($\lambda \sim 2$ мм). ЭЦР нагрев на токамаке TCV (Швейцария). Дрейфовое приближение. Метод получения дрейфовых уравнений. Магнитное и электрическое поле. Понятие дрейфового движения. Градиентный дрейф. Вектор кривизны силовой линии. Центробежный дрейф. Магнитный момент частицы. Движение в неоднородном магнитном поле. Пробкотрон Будкера-Поста. Удержание частиц в пробкотроне. Движение частиц в пробкотроне. Понятие дрейфовой поверхности. Пример сложной дрейфовой поверхности. Линейные<br>и тороидальные конфигурации. Магнитное поле тороида. Поляризация плазмы. Появление радиального дрейфа. Как бороться с дрейфом наружу? Дрейф в винтовом тороидальном поле. Тороид с плазмой с точки зрения МГД. Вводим магнитное поле плазменного тока. Добавляем вертикальное магнитное поле. Основные части токамака. | 2 |
| **Тема 9. Управляемый термоядерный синтез.** Управляемый термоядерный синтез. Зависимость ВНП от энергетики. Структура первичной энергии. Хватит ли альтернативной энергетики? Физические основы Т/Я энергетики. Термоядерные реакции – определение. Потенциальная энергия взаимодействия. Г. Гамов, Е. Теллер (1938). Реакции термоядерной энергетики. Топливо для термоядерной энергетики. Зависимость сечения от энергии. Эффективность различных реакций. Почему именно плазма? Критерий Лоусона. Баланс энергии в реакторе. Энергетическое время жизни $\tau_E$. Принципы удержания плазмы. Типовая структура т/я электростанции. Коэффициент плазменного усиления Q. Альтернативные термоядерные топлива. Реакция $D + {}^3He \rightarrow {}^4He + p$. Реакция $p + {}^{11}B \rightarrow 3\ {}^4He$. Стоимость термоядерной энергии. Структура стоимости т/я энергии. Радиоактивность термоядерной станции. Прогресс в достигнутой Т/Я мощности. Зачем нужна термоядерная энергия? | 2 |
| **Тема 10. Инерциальный термоядерный синтез.** Инерциальное удержание плазмы. Геометрия облучения мишени. Критерий Лоусона (инерциальный УТС). Стадии сжатия мишени. Параметры для инерциального УТС. Структура «инерциальной» электростанции. Драйверы для инерциального УТС. Оптимальные режимы сжатия мишеней. Стадия ускорения и сжатия мишени. Стадия термоядерного горения. Неустойчивость Рэлея-Тейлора. Пример влияния неустойчивостей. Мишени для инерциального синтеза. Схемы сжатия мишеней. Военный УТС. Лазеры: выбор длины волны. Установка «Искра-5» (Саров, ВНИИЭФ). Проект NIF (Ливермор, США). NIF – оптическая схема одного канала. NIF – мишенная камера. NIF – мишень (хольраум). Первый полномасштабный эксперимент. Результаты работы NIF (проблемы). Результаты работы NIF (достижения). Элементы лазера NIF. Схема с быстрым поджигом мишени. Получение ультракоротких импульсов. Fast Ignition на | 2 |

| | |
|---|---|
| GEKKO-XII (Япония). Проект Fusion Test Facility. | |
| **Тема 11. Магнитное удержание плазмы. Токамак.** Удержание плазмы в магнитном поле. Элементы тороидальной геометрии. Роль магнитного поля. История работ по токамакам. Элементы конструкции токамака. Поддержание равновесия плазмы. Управление формой плазмы. Параметр q: величина запаса устойчивости. Понятие магнитной поверхности и вращательного преобразования. Магнитные поверхности токамаков. Пролётные и запертые частицы. Неоклассическая диффузия в токамаках. Коэффициент неоклассической диффузии. Реальность и неоклассическая теория. Универсальный профиль давления. Модель “кучи песка”. Омический нагрев плазмы. Предельный ток разряда. Неустойчивости – энергетический принцип. Пилообразные колебания. Пилообразные колебания - магнитные поверхности. Пилообразные колебания – томография. Пересоединение силовых линий. «Магнитные острова» в плазме. Тиринг-моды на TCV. Предельная плотность плазмы. МГД предел по давлению плазмы. Ограничение рабочей области параметров. Срывы в токамаках. Финальная фаза срыва (Alcator-C). Современные токамаки. Переход к плазме некруглого сечения. Дивертор. Переизлучение энергии в диверторе. Бутстрэп-ток. Методы дополнительного нагрева плазмы. Режимы с улучшенным удержанием. Новый радиальный профиль параметров. Эксперименты с D-T плазмой. Параметры плазмы в реакторе. Скейлинг энергетического времени жизни. Проект ИТЭР. Официальные цели проекта ИТЭР. История работ по проекту. Отработка технологий. Российский вклад в ИТЭР. ИЯФ СО РАН для ИТЭР. Сверхпроводник для ИТЭР. График строительства. Площадка ИТЭР – Кадараш (Франция). Площадка ИТЭР – общий вид. Площадка ИТЭР – строительство. ИТЭР и другие. Что дальше? | 2 |
| **Тема 12. Стеллараторы и другие схемы удержания с тороидальной плазмой.** Схемы удержания тороидальной плазмы. Обычные и сферические токамаки. Почему сферические токамаки? Сферические токамаки. Классические стеллараторы.<br>Стелларатор C (Принстон, США). Проблемы первых стеллараторов. Как делались первые токамаки в США. Сравнение с токамаками. Стелларатор LHD (NIFS, Нака, Япония). Зал стелларатора LHD. Внутри вакуумной камеры LHD. Плазма в LHD. LHD: разряды большой длительности. Лучшие достигнутые параметры. Сравнение достижений с токамаками. Проект W-7X (Германия). Работы по проекту W-7X. Скейлинг $\tau_E$ – сравнение с токамаками. Пинч с обращённым полем (Reversed Field Pinch). Начало работ по RFP. Астрофизическая предыстория RFP. Роль плазменного динамо. Механизм плазменного динамо. Стохастизация магнитного поля. Установка MST. Сравнение RFP с токамаками. | 2 |
| **Тема 13. Открытые ловушки.** Пробкотрон Будкера-Поста. Удержание частиц в пробкотроне. Дрейфовое движение в пробкотроне. Удержание плазмы в пробкотроне. Амбиполярный потенциал. Равновесие и устойчивость в пробкотроне. Стабилизация желобковой неустойчивости. Простейшие конфигурации с min B. Скейлинг энергетического времени жизни. Современные открытые ловушки. Действующие открытые ловушки. Амбиполярная ловушка. Термобарьеры в концевых ячейках. Амбиполярная ловушка GAMMA-10. Параметры GAMMA-10. Проект АМБАЛ-М (Новосибирск). Проект MFTF-B (LLNL, Ливермор, США). Газодинамическая ловушка. Удержание плазмы в ГДЛ. Установка ГДЛ (ИЯФ, Новосибирск). ГДЛ как нейтронный источник. Профиль нейтронного потока на ГДЛ. ГДЛ с нагревом электронов. Многопробочная ловушка. Удержание в многопробочной ловушке. Время жизни в многопробочной ловушке. Область параметров плазмы. Многопробочная ловушка ГОЛ-3. Схема многопробочной ловушки ГОЛ-3. Нагрев плазмы электронным пучком. Удержание плазмы в ГОЛ-3. Осцилляции нейтронного потока. ГОЛ-3: сравнение с токамаками. Наши перспективы: ГОЛ-NB. Наши перспективы: ГДМЛ. Установка C-2 (Tri Alpha Energy). Boeing Fusion Reactor. | 2 |
| **Тема 14. Электрический разряд в газах.** Геометрия задачи. Дрейф электронов в плазме – напоминание. Дрейф в слабоионизованной плазме. Теория пробоя Таунсенда. Размножение электронов в разряде. Электронная лавина. Условие зажигания разряда. Кривая Пашена. Вольт-амперная характеристика разряда. | 2 |
| **Тема 15. Плазменные технологии.** Плазма для практических целей. Плазменная медицина: | 2 |

| | |
|---|---|
| новые идеи. Плазменная медицина: примеры. Плазменная аэродинамика. Плазма как метаматериал. Плазменные дисплеи. Разряд с диэлектрическим барьером. Устройство плазменного дисплея. Ионная имплантация. Установка ионно-лучевого легирования. Высокодозная имплантация. Примеры использования PIII. Травление в микроэлектронике. Плазмохимическое травление. Ионное фрезерование и травление. Осаждение плёнок. Методы получения плёнок. Применение покрытий в медицине. Плазмохимическое осаждение (PECVD). Стекло с многослойным покрытием. Плоские телевизоры и мониторы. Дуговые плазматроны. Российские плазматроны. МГД-генераторы. Кильватерное ускорение частиц. Кильватерное ускорение ▪ пучок $e^-$. Кильватерное ускорение ▪ лазер. Двигатели для космоса. Принцип работы плазменного двигателя. Образец плазменного двигателя СПД-100. Двигатель VASIMR (США). Статус работ по VASIMR. | |
| **Тема 16. Плазма в космосе.** Из чего состоит Вселенная? Эволюция Вселенной. Измерение расстояний в астрономии. Что такое «тёмная материя»? Расширение Вселенной и закон Хаббла. Ускоряющаяся Вселенная. Гравитационная неустойчивость. Замыкаем систему уравнений. Решение системы уравнений. Анализ решения. Фрагментация вещества во Вселенной. Звёзды: светимость, масса, радиус. Равновесие звезды. Тепловое равновесие. Гидродинамическое равновесие. Предельная светимость звёзд. Тепловая и гравитационная энергия звезд. Структура Солнца. Реакции в звёздах и на Солнце. Реакции в звёздах – углеродный цикл. Горение гелия в звёздах. Образование тяжёлых элементов в звёздах. Диаграмма Герцшпрунга – Рассела. Эволюция звёзд. Эволюция звезды типа Солнца. Белые карлики – вырожденные звезды. Эволюция белых карликов. Эволюция массивных звёзд. Нейтронные звезды. Крабовидная туманность. Поколения звёзд. Конечное состояние эволюции звёзд. Электрон-позитронные звёзды.<br>Эволюция Солнца. Солнечная атмосфера. Солнечные пятна. Солнечные циклы. Роль магнитного поля. Активные области Солнца. Солнечный ветер. Магнитосфера Земли и солнечный ветер. Магнитосфера Земли: подробности. Радиационные пояса Земли. Северное сияние. Процессы в верхней атмосфере. Граница Солнечной системы. | 2 |

**Программа практических занятий (32 часа)**

Занятие 1. Квазинейтральность плазмы. Дебаевское экранирование. Ленгмюровские колебания. (2часа)

Занятие 2. Классификация плазмы. Понятие идеальности плазмы. Локальные параметры плазмы через функцию распределения на примере ленгмюровских зондов. (2часа)

Занятие 3. Ионизационное равновесие плазмы, формула Саха. (2часа)

Занятие 4. Элементарные процессы в плазме. Длина пробега. Корональное равновесие. (2часа)

Занятие 5. Промежуточная контрольная работа 1 (2часа)

Занятие 6. Движение заряженных частиц в плазме. Транспортное сечение. (2часа)

Занятие 7. Времена релаксации энергии и импульса в плазме, рассеяние частиц по углу. (2часа)

Занятие 8. Плазма в электрическом поле, ток в плазме. Проводимость плазмы. Убегающие электроны, поле Драйсера. (2часа)

Занятие 9. Дрейфовое приближение. (2часа)

Занятие 10. Излучение плазмы: тормозное, рекомбинационное, циклотронное. (2часа)

Занятие 11. Адиабатические инварианты. Пробкотрон, удержание частиц в пробочном магнитном поле. (2часа)

Занятие 12. Волны в плазме, прохождение и затухание электромагнитных волн. (2часа)

Занятие 13. Промежуточная контрольная работа 2 (2часа)

Занятие 14. Термоядерный синтез. (2часа)

Занятие 15. Концепции удержания плазмы. Инерционный и магнитный синтез. Токамак. (2часа)
Занятие 16. Физика газового разряда. (2 часа)

**Самостоятельная работа студентов (76 часов)**

| Перечень занятий на СРС | Объем, час |
|---|---|
| Подготовка к практическим занятиям. | 32 |
| Подготовка к контрольным работам | 12 |
| Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях | 14 |
| Подготовка к экзамену | 18 |

## 5. Перечень учебной литературы.


1. И.А. Котельников, Лекции по физике плазмы, Издательство БИНОМ, Москва, 2013, 384 с., ISBN 978-5-9963-1158-3
2. И.А. Котельников, Лекции по физике плазмы : Электронное издание, Издательство БИНОМ, Москва, 2013, 384 с., ISBN 978-5-9963-2298-3
3. Франк-Каменецкий Д. А. Лекции по физике плазмы. 3-е изд. М. : Интеллект, 2008. 280 с.
4. Н. Кролл, А. Трайвелпис. Основы физики плазмы / Под ред. А. М. Дыхне. М. : Мир, 1975. 527 с.
5. Лукьянов С. Ю. Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. М. : Наука, 1975. 397 с.
6. Арцимович Л. А., Сагдеев Р. З. Физика плазмы для физиков. М. : Атомиздат, 1979. 315 с.
7. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. Долгопрудный : Интеллект, 2009. 736 с.
8. Чен Ф. Основы физики плазмы. М. : Мир, 1987. 398 с.
9. Лукьянов С. Ю., Ковальский Н. Г. Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. М. : МИФИ, 1997. 430 с.
10. Князев Б.А. Низкотемпературная плазма и газовый разряд. Новосибирск, НГУ, 2002. 290 с.


## 6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.

Самостоятельная работа студентов поддерживается следующими учебными пособиями:

1. В.В. Поступаев, Физика плазмы. Электронный конспект курса лекций. Новосибирск, 2013, 506 с.
2. Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции. М. : Физматлит, 1961. 467 с.
3. Миямото К. Основы физики плазмы и управляемого синтеза: Перевод с англ. / Под ред. В. Д. Шафранова. М. : Физматлит, 2007. 407 с.

## 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:
- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

### 7.1 Современные профессиональные базы данных

1. IAEA Aladdin (https://www-amdis.iaea.org/ALADDIN/) – свободный доступ
2. NIST atomic spectra database (https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database) - – свободный доступ
3. Evaluated nuclear data (https://www-nds.iaea.org/exfor/endf.htm) - – свободный доступ

**7.2. Информационные справочные системы**

Не используются.

**8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.**

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

**9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.**

Для реализации дисциплины «Физика плазмы» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий,, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

**10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.**

**10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

***Текущий контроль***

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем опроса в начале каждой лекции по материалам предыдущей лекции. Студентам необходимо успешно выполнить две контрольные работы, предполагающие решение задач по материалам курса, а также решить 5 задач для самостоятельного решения.

***Промежуточная аттестация***

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная

компетенция ОПК-1 сформирована не ниже порогового уровня в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области кристаллографии и рентгеноструктурного анализа в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ОПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

**Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины**

Таблица 10.1

| **Код компетенции** | **Индикатор** | **Результат обучения по дисциплине** | **Оценочные средства** |
|---|---|---|---|
| **ОПК-1** | **ОПК - 1.1.** Применяет фундаментальные и прикладные знания, новейшие достижения в области физико-математических и естественных наук для решения поставленных задач при проведении научных работ, аналитических и (или) проектных исследований в избранной области профессиональной деятельности. | **Знать** определения и формулы для основных величин, характеризующих плазму; плазменные явления в природе, технике и лабораторных экспериментах; характерные параметры лабораторной и космической плазмы; методы, возможности и области применимости различных теоретических моделей, используемых для описания явлений в плазме; параметры плазмы, необходимые для реализации управляемого термоядерного синтеза; задачи, направления и статус работ по управляемому термоядерному синтезу. | Проведение контрольных работ, экзамен. |
| | **ОПК - 1.2.** Применяет современные экспериментальные и теоретические методы, информационные технологии для решения поставленных задач при проведении научных работ, аналитических и (или) проектных исследований в избранной области профес- | **Уметь** применять изученные модели и методы для нахождения решения простых задач по тематике курса.<br>**Владеть** методами вычисления свойств плазмы по заданным основным параметрам (плотности, температуре). | Проведение контрольных работ, экзамен. |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | сиональной деятельности. | | |

**10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Физика плазмы».**

**Таблица 10.2**

| Критерии оценивания результатов обучения | Шкала оценивания |
|---|---|
| **Решение заданий:**<br>– задание решено правильно,<br>– работа оформлена аккуратно, четкие рисунки и чертежи,<br>– осмысленность, логичность и аргументированность изложения материала,<br>– точность и корректность применения терминов и понятий.<br>«Сдать задачу» означает объяснение хода её решения и, при необходимости, ответы на дополнительные вопросы преподавателя, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы. В ответах на вопросы преподавателя обучающийся мог допустить непринципиальные неточности.<br>**Экзамен:**<br>– самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, отсутствие затруднений в объяснении процессов и явлений, а также при формулировке собственных суждений,<br>– точность и корректность применения терминов и понятий,<br>– наличие исчерпывающих ответов на дополнительные вопросы.<br>При изложении ответа на вопрос(ы) преподавателя обучающийся мог допустить непринципиальные неточности. | *Отлично* |
| **Решение заданий:**<br>– задание решено правильно,<br>– работа оформлена аккуратно, четкие рисунки и чертежи,<br>– осмысленность, логичность и аргументированность изложения материала, наличие затруднений в формулировке собственных суждений,<br>– точность и корректность применения терминов и понятий, при наличии незначительных ошибок.<br>«Сдать задачу» означает объяснение хода её решения и, при необходимости, ответы на дополнительные вопросы преподавателя, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины. Отвечает на дополнительные вопросы.<br>В ответах на вопросы преподавателя обучающийся мог допустить непринципиальные неточности. | *Хорошо* |

| | |
|---|---|
| **Экзамен:**<br>– самостоятельность, осмысленность, структурированность, логичность и аргументированность изложения материала, наличие затруднений в объяснении отдельных процессов и явления, а также при формулировке собственных суждений,<br>– точность и корректность применения терминов и понятий при наличии незначительных ошибок,<br>– наличие полных ответов на дополнительные вопросы с возможным присутствием ошибок. | |
| **Решение заданий:**<br>– задание решено правильно,<br>- работа оформлена неаккуратно<br>– неосознанность и неосновательность выбранных методов анализа,<br>– нет осмысленности в изложении материала, наличие ошибок в логике и аргументации,<br>– корректность применения терминов и понятий, при наличии незначительных ошибок.<br>«Сдать задачу» означает объяснение хода её решения и, при необходимости, ответы на дополнительные вопросы преподавателя, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины. При ответах на вопросы допускает ошибки<br>**Экзамен:**<br>– теоретический и фактический материал в слабой степени подкреплен ссылками на научную литературу и источники,<br>– частичное понимание и неполное изложение причинно-следственных связей,<br>– самостоятельность и осмысленность в изложении материала, наличие ошибок в логике и аргументации, в объяснении процессов и явлений, а также затруднений при формулировке собственных суждений,<br>– корректность применения терминов и понятий, при наличии незначительных ошибок,<br>– наличие неполных и/или содержащих существенные ошибки ответов на дополнительные вопросы. | *Удовлетворительно* |
| **Решение заданий:**<br>– задание решено неправильно,<br>– компилятивное, неосмысленное, нелогичное и неаргументированное изложение материала,<br>– грубые ошибки в применении терминов и понятий,<br>«Сдать задачу» означает объяснение хода её решения и, при необходимости, ответы на дополнительные вопросы преподавателя, имеющие принципиальное значение для данной дисциплины. На дополнительные вопросы не отвечает.<br>**Экзамен:**<br>– фрагментарное и недостаточное представление теоретического и фактического материала, не подкрепленное ссылками на научную литературу и источники,<br>– непонимание причинно-следственных связей,<br>– отсутствие осмысленности, структурированности, логичности и аргументированности в изложении материала,<br>– грубые ошибки в применении терминов и понятий,<br>– отсутствие ответов на дополнительные вопросы. | *Неудовлетво-рительно* |

### 10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

**Контрольная работа № 1 (дается в трех вариантах с различными численными данными)**

1. Является ли плазмой объект объемом 1 $см^3$ с параметрами $n_e = n_i = 10^6$ $см^{-3}$, $T_e = T_i = 10$ кэВ, с максвелловской функцией распределения частиц по скоростям? Ответ обосновать.
2. Вычислить долю нейтральных атомов в водородной лазерной плазме с $T = 1{,}2 \cdot 10^6$ К и плотностью $n = 10^{24}$ $см^{-3}$.
3. Найти длину пробега до рассеяния иона гелия с энергией 1 кэВ в ионосфере Земли, которая является плазмой с плотностью $10^6$ $см^{-3}$ и температурой 0,1 эВ.

**Контрольная работа № 2 (дается в трех вариантах с различными численными данными)**

1. Спутник находится на высоте 400 км. Плотность плазмы ионосферы не более $2{,}5 \cdot 10^5$ $см^{-3}$. Определить, на какой частоте возможна связь между поверхностью Земли и спутником.
2. Оценить, за какое время остынет термоядерная плазма с плотностью $n_e = 10^{14}$ $см^{-3}$ и температурой T = 10 кэВ вследствие тормозного излучения электронов.
3. Токамак Tore Supra имеет большой радиус 2,25 м, малый радиус 0,7 м, тороидальное поле 3,5 Тл. Какую температуру можно получить в эксперименте с предельной плотностью, если относительное давление плазмы составляет 2,5%?

**Вопросы на экзамен**

1. Принципы удержания плазмы в токамаке. Основные элементы токамака. Предельный ток разряда в токамаке.
2. Пробный заряд в плазме. Дебаевская экранировка. Проникновение электрического поля в плазму. Разделение зарядов на границе плазмы.
3. Пилообразные колебания в токамаках. Внешние проявления, механизм возникновения и поддержания. Влияние пилообразных колебаний на энергетическое время жизни плазмы.
4. Виды равновесия. Формула Саха, условия её применимости. Константа равновесия, степень ионизации плазмы.
5. Излучение плазмы без магнитного поля. Виды излучения и их характеристика. Полный спектр излучения плазмы. Определение параметров плазмы по излучению.
6. Траектории заряженных частиц в токамаках. Пролётные и запертые частицы. Понятие неоклассической диффузии в токамаках.
7. Кинетическое описание плазмы. Функция распределения. Кинетическое уравнение с самосогласованным полем. Понятие интеграла столкновений, его физический смысл. Свойства интеграла столкновений.
8. Структура магнитного поля токамака. Поддержание равновесия плазмы в токамаке. Понятие магнитной поверхности и запаса устойчивости.
9. Ленгмюровские волны. Природа ленгмюровских волн. Плазменная частота. Метод кильватерного ускорения заряженных частиц.
10. Движение заряженных частиц в магнитном поле. Понятие дрейфового приближения. Виды дрейфовых движений. Дрейфовое движение при наличии силы тяжести.

1. Роль МГД-неустойчивостей в инерциальном УТС. Схемы сжатия мишени. Режимы сжатия мишеней. Схема быстрого поджига мишени.

2. Термоядерные реакции. Основные физические принципы. Характеристика основных реакций. Скорость реакций в плазме. Критерий Лоусона для магнитного и инерциального УТС.
3. Инерциальный управляемый синтез. Основные физические принципы. Стадии осуществления микровзрыва мишени. Конструкция мишеней для УТС (схема прямого обжатия).
4. Теплопроводность и проводимость плазмы. Вывод этих параметров в кинетическом приближении. Найти проводимость плазмы, состоящей из электронов и ионов с зарядом Z.
5. Циклотронное излучение плазмы. Диагностика параметров плазмы по циклотронному излучению в токамаках.
6. Термоядерные реакции в звёздах. Диаграмма Герцшпрунга-Рассела. Понятие главной последовательности. Эволюция звёзд типа Солнца.
7. Магнитная гидродинамика. Основные уравнения одножидкостной магнитной гидродинамики. Равновесие плазмы в магнитном поле. Понятие диамагнетизма плазмы.
8. Открытые ловушки. Удержание отдельных частиц в пробкотроне Будкера-Поста.

**Пример экзаменационного билета**

1. Принципы удержания плазмы в токамаке. Основные элементы токамака. Предельный ток разряда в токамаке.
2. Термоядерные реакции. Основные физические принципы. Характеристика основных реакций. Скорость реакций в плазме. Критерий Лоусона для магнитного и инерциального УТС
3. Пучок атомов водорода с энергией 20 кэВ проходит через кювету длиной 1 м, заполненную нейтральным водородом с давлением 1 Па, к которой приложено напряжение U = 1000 В. Найти среднюю энергию, которую приобретут атомы водорода после прохождения через кювету. Принять сечение перезарядки $\sigma_{пер} = 6 \cdot 10^{-16}$ см$^{-2}$, ионизации $\sigma_{ион} = 2 \cdot 10^{-16}$ см$^{-2}$.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям стандартов, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.