

**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**



УТВЕРЖДАЮ
Декан ФФ, д.ф.-м.н.
В.Е.Блинов
2022 г.

Рабочая программа дисциплины

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

направление подготовки: **03.04.02 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: - контактная работа 68 часов										
Компетенции ОПК-1										

Руководитель программы
д.ф.-м.н.,

И.Б. Логашенко

Новосибирск, 2022

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.	10
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.	10
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.	10
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.	11
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.	11
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.	11

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
<p>ОПК-1. Способен применять фундаментальные знания в области физики для решения научно-исследовательских задач, а также владеть основами педагогики, необходимыми для осуществления преподавательской деятельности.</p>	<p>ОПК - 1.1. Применяет фундаментальные знания и новейшие достижения физики для решения научно-исследовательских задач в избранной области.</p> <p>ОПК - 1.2. Применяет современные экспериментальные и теоретические методы, информационные технологии для решения поставленных научно-исследовательских задач.</p>	<p>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.</p> <p>Уметь применять изученные модели и методы для нахождения решения простых задач по тематике курса.</p> <p>Владеть методами вычисления свойств плазмы по заданным основным параметрам (плотности, температуре).</p>

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. 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.

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: - контактная работа 68 часов										
Компетенции ОПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, консультации, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

- текущий контроль успеваемости: задания для самостоятельного решения, контрольные работы;
- промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоёмкость рабочей программы дисциплины составляет 4 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 32 часа;
 - практические занятия – 32 часа;
 - самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 58 часов;
 - промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультации и экзамен) – 22 часа.
- Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, групповые консультации, экзамен) составляет 68 часов.

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

Дисциплина «Физика плазмы» представляет собой полугодовой курс, читаемый в магистратуре физического факультета НГУ. Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетные единицы, 144 академических часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы		Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	
				Лекции	Практические занятия		
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Введение, темы 1-8 программы лекций	1-8	61	16	16	29	
2.	Темы 9-16 программы лекций	9-16	61	16	16	29	
3.	Групповая консультация		2				2
4.	Самостоятельная подготовка обучающегося к экзамену		18				18
5.	Экзамен		2				2
Всего			144	32	32	58	22

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. Околосемная 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 Саха. 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	2

<p>плазме. Аналогия с электростатикой. Сила торможения для разных частиц. Сравнение торможения в газе и плазме. Проводимость плазмы. «Убегающие электроны». Время релаксации энергии.</p>	
<p>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 C₂.</p>	2
<p>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.</p>	2
<p>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 в замороженности. Почему называется «в замороженности»? 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.</p>	2
<p>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.</p>	2
<p>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 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.</p>	2

<p>Тема 9. Управляемый термоядерный синтез. Управляемый термоядерный синтез. Зависимость ВВП 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 τ_E. Принципы удержания плазмы. Типовая структура т/я электростанции. Коэффициент плазменного усиления Q. Альтернативные термоядерные топлива. Реакция $D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$. Реакция $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3 {}^4\text{He}$. Стоимость термоядерной энергии. Структура стоимости т/я энергии. Радиоактивность термоядерной станции. Прогресс в достигнутой Т/Я мощности. Зачем нужна термоядерная энергия?</p>	2
<p>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 GEKKO-XII (Япония). Проект Fusion Test Facility.</p>	2
<p>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?</p>	2

<p>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. Стелларатор С (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 τ_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.</p>	2
<p>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 ГАММА-10. Параметры ГАММА-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 С-2 (Tri Alpha Energy). Boeing Fusion Reactor.</p>	2
<p>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.</p>	2
<p>Тема 15. Плазменные технологии. Плазма для практических целей. Плазменная медицина: 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 РИП. 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 π пучок e^-. Кильватерное ускорение π лазер. Двигатели для космоса. Принцип работы плазменного двигателя. Образец плазменного двигателя СПД-100. Двигатель VASIMR (США). Статус работ по VASIMR.</p>	2

<p>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.</p> <p>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.</p>	2
---	---

Программа практических занятий (32 часа)

- Занятие 1. Квазинейтральность плазмы. Дебаевское экранирование. Ленгмюровские колебания. (2 часа)
- Занятие 2. Классификация плазмы. Понятие идеальности плазмы. Локальные параметры плазмы через функцию распределения на примере ленгмюровских зондов. (2 часа)
- Занятие 3. Ионизационное равновесие плазмы, формула Саха. (2 часа)
- Занятие 4. Элементарные процессы в плазме. Длина пробега. Корональное равновесие. (2 часа)
- Занятие 5. Промежуточная контрольная работа 1 (2 часа)
- Занятие 6. Движение заряженных частиц в плазме. Транспортное сечение. (2 часа)
- Занятие 7. Времена релаксации энергии и импульса в плазме, рассеяние частиц по углу. (2 часа)
- Занятие 8. Плазма в электрическом поле, ток в плазме. Проводимость плазмы. Убегающие электроны, поле Драйзера. (2 часа)
- Занятие 9. Дрейфовое приближение. (2 часа)
- Занятие 10. Излучение плазмы: тормозное, рекомбинационное, циклотронное. (2 часа)
- Занятие 11. Адиабатические инварианты. Пробкотрон, удержание частиц в пробочном магнитном поле. (2 часа)
- Занятие 12. Волны в плазме, прохождение и затухание электромагнитных волн. (2 часа)
- Занятие 13. Промежуточная контрольная работа 2 (2 часа)
- Занятие 14. Термоядерный синтез. (2 часа)
- Занятие 15. Концепции удержания плазмы. Инерционный и магнитный синтез. Токамак. (2 часа)
- 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.

5.1. Основная литература

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

5.2. Дополнительная литература

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 \(https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database\)](https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database) - – свободный доступ
3. [Evaluated nuclear data \(https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm\)](https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.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

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
ОПК - 1.1. Применяет фундаментальные знания и новейшие достижения физики для решения научно-исследовательских задач в избранной области.	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 научно-исследовательских задач.	Уметь применять изученные модели и методы для нахождения решения простых задач по тематике курса. Владеть методами вычисления свойств плазмы по заданным основным параметрам (плотности, температуре).	Проведение контрольных работ, экзамен.

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

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ОПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно

			негрубых ошибок.	несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ОПК 1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ОПК 1.2	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

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 $n_e = n_i = 10^6 \text{ см}^{-3}$, $T_e = T_i = 10 \text{ кэВ}$, с максвелловской функцией распределения частиц по скоростям? Ответ обосновать.
2. Вычислить долю нейтральных атомов в водородной лазерной плазме с $T = 1,2 \cdot 10^6 \text{ К}$ и плотностью $n = 10^{24} \text{ см}^{-3}$.
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 $0,1 \text{ эВ}$.

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

1. Спутник находится на высоте 400 км . Плотность плазмы ионосферы не более $2,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$. Определить, на какой частоте возможна связь между поверхностью Земли и спутником.
2. Оценить, за какое время остынет термоядерная плазма с плотностью $n_e = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и температурой $T = 10 \text{ кэВ}$ вследствие тормозного излучения электронов.
3. Токамак Tore Supra имеет большой радиус $2,25 \text{ м}$, малый радиус $0,7 \text{ м}$, тороидальное поле $3,5 \text{ Тл}$. 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 $\sigma_{\text{пер}} = 6 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2}$, ионизации $\sigma_{\text{ион}} = 2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^{-2}$.

Форма экзаменационного билета представлена на рисунке

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

**«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»
(Новосибирский государственный университет, НГУ)**

Физический факультет

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № _____

1

2

3

Составитель _____ /Ф.И.О. преподавателя/
(подпись)

« _____ » _____ 20 г.

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

**Лист актуализации рабочей программы
по дисциплине «Физика плазмы»
по направлению подготовки 03.04.02 Физика
Профиль: все профили подготовки**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного