

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики  
Российской академии наук» (ИПФ РАН)**

УТВЕРЖДАЮ:

Зам. директора по научной работе

\_\_\_\_\_ М.Ю. Глявин

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

## **Рабочая программа дисциплины**

### **Физика плазмы**

---

Уровень высшего образования  
Подготовка кадров высшей квалификации

---

Направление подготовки / специальность  
03.06.01 Физика и астрономия

---

Направленность образовательной программы  
01.04.08 «Физика плазмы»

---

Квалификация (степень)  
Исследователь. Преподаватель-исследователь.

---

Форма обучения  
очная

---

Нижний Новгород

20\_\_

## 1. Место и цели дисциплины в структуре образовательной программы (ОП)

Дисциплина «Физика плазмы» относится к числу профильных дисциплин вариативной части образовательной программы, является обязательной для освоения и изучается на третьем году обучения, в пятом семестре.

Освоение дисциплины опирается на знания, умения, навыки и компетенции, сформированные на двух предшествующих уровнях образования и на первых двух годах обучения в аспирантуре. В частности, на знания, умения и навыки, полученные в ходе освоения таких дисциплин, как «Методы магнитного удержания плазмы», «Физика газового разряда», «Геофизическая электродинамика», «Теоретическая механика», «Электродинамика», «Теория колебаний и волн», «Электромагнитные волны», «Основы кинетики и электродинамики плазмы», «Линейные и нелинейные волновые процессы в плазме», «Электродинамика квазиоптических систем», «Высокочастотная релятивистская электроника», «Статистическая радиофизика», «Микроволновая спектроскопия» и т.п. При освоении данной дисциплины необходимы знания, умения и навыки по математическому анализу, математической физике и дифференциальным уравнениям, приобретенные в бакалавриате и магистратуре.

### Целями освоения дисциплины являются:

- формирование у аспирантов углубленных знаний о методах удержания и поддержания плазмы в лабораторных магнитных ловушках разного типа, об основных физических процессах в газовом разряде, об основных физических явлениях в околоземном космическом пространстве; ознакомление с современными методами диагностики плазмы.
- формирование у аспирантов профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» и направленностью подготовки 01.04.08 «Физика плазмы»

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОП (компетенциями выпускников)

Таблица 1:

Планируемые результаты обучения по дисциплине

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине
<b>ПК-1</b> <i>способность самостоятельно разбираться, непредвзято оценивать и оперативно ориентироваться в передовых идеях и самых последних достижениях современной физики</i> (этап освоения – завершающий)	З1 (ПК-1) – знать методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях. У1 (ПК-1) – уметь при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи, поддающиеся операционализации исходя из наличных ресурсов и ограничений. В1 (ПК-1) – владеть навыками критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях
<b>ПК-2</b> <i>способность проводить научные исследования и решать научно-исследовательские задачи, соответствующие направленности подготовки, используя специализированные знания в области физики и астрономии, современные методы исследований и информационные технологии, с учетом отечественного и зарубежного опыта</i> (этап освоения – завершающий)	З1 (ПК-2) – знать основные направления современных научных исследований в области физики плазмы в контексте характеристик современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта. У1 (ПК-2) – уметь самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики плазмы и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий; представлять результаты научно-исследовательской деятельности (в т.ч., диссертационной работы) академическому и бизнес-сообществу. В1 (ПК-2) – владеть навыками проведения научных исследований в области физики плазмы с учетом характеристик и возможностей современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта.

<p><b>ПК-3</b>  <i>способность свободно ориентироваться в разделах физики, необходимых для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности (в соответствии с направленностью подготовки)</i>  (этап освоения – завершающий)</p>	<p>31 (ПК-2) – знать современное состояние науки в области физики плазмы; современные подходы к моделированию различных явлений в области физики плазмы и оценке полученных результатов;  У1 (ПК-3) – уметь самостоятельно интерпретировать результаты научного исследования; оценивать границы применимости полученных результатов научного исследования в области радиофизики и возможности их внедрения.  В1 (ПК-3) Владеть навыками решения практических, в том числе и научно-инновационных, задач, основанными на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях.</p>
--	--

По результатам освоения дисциплины «Физика плазмы» и изученных ранее специальных дисциплин (дисциплин по выбору) аспиранты сдают кандидатский экзамен по специальности 01.04.08 «Физика плазмы».

### 3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 38 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (24 часа занятия лекционного типа, 12 часов занятия семинарского типа – семинары, научно-практические занятия, в т.ч. мероприятия текущего контроля успеваемости, 2 часа мероприятия промежуточной аттестации), 36 часов – подготовка и сдача кандидатского экзамена, 34 часа составляет самостоятельная работа обучающегося.

Таблица 2:

**Структура дисциплины**

Наименование раздела дисциплины	Всего, часов	в том числе			Самостоятельная работа обучающегося, часов
		Контактная работа, часов		Всего	
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа		
Программа-минимум кандидатского экзамена по специальности «физика плазмы» (подготовка в соответствии с программой, разработанной экспертным советом Высшей аттестационной комиссии и утвержденной приказом Минобрнауки России от 8 октября 2007 г. № 274)	36	12	6	18	18
Дополнительная программа кандидатского экзамена по специальности «физика плазмы» (подготовка в соответствии с программой, разработанной в ИПФ РАН и утвержденной приказом директора 11.04.2011)	34	12	6	18	16
в т.ч. текущий контроль			4		
<b>Аттестация по дисциплине – экзамен</b>				2	36
<b>Итого</b>				<b>108</b>	

Таблица 3:

**Содержание дисциплины**

№ п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела (темы)
<b>Программа-минимум кандидатского экзамена по специальности «физика плазмы»</b>		
1	Термодинамика плазмы	Понятие плазмы, квазинейтральность, микрополя, дебаевский радиус, идеальная и неидеальная плазма. Условие термодинамического равновесия, термическая ионизация, формула Саха, корональное равновесие, снижение потенциала ионизации. Вырождение плазмы, статистика Больцмана и Ферми—Дирака, модель Томаса—Ферми.
2	Элементарные процессы	Столкновения заряженных частиц, дальное действие, частоты

		столкновений, столкновения электронов с атомами (упругие и неупругие), столкновения тяжелых частиц. Ионизация, рекомбинация, перезарядка и прилипание. Возбуждение и диссоциация молекул электронным ударом.
3	Физическая кинетика	Уравнения Больцмана и Власова, интеграл столкновений, время максвеллизации и скорость выравнивания температур различных компонент плазмы. Скорость ионообразования и рекомбинации электронов и ионов, образование и разрушение возбужденных атомов (ионов). Явления переноса в плазме, электропроводность, диффузия и теплопроводность частиц при наличии и отсутствии магнитного поля. Кинетика возбужденных молекул в плазме.
4	Динамика заряженных частиц в электрическом и магнитном полях	Движение в скрещенных электрическом и магнитном полях. Дрейфовое приближение, разновидности дрейфового движения. Заряженная частица в высокочастотном поле. Понятие адиабатического инварианта.
5	Магнитная гидродинамика плазмы	Уравнения движения плазмы в магнитном поле, проникновение магнитного поля в плазму, замороженность магнитного поля. Законы сохранения в идеальной одножидкостной МГД. Двухжидкостное приближение.
6	Неустойчивость плазмы	Равновесные конфигурации плазмы в магнитной гидродинамике, пинч. Неустойчивость плазмы, виды неустойчивости, перегреваемая и ионизационная неустойчивости. Энергетический принцип МГД-устойчивости.
7	Колебания и волны в плазме	Основные типы колебаний и волн в плазме: ленгмюровские электронные и ионные, электромагнитные, ионно-звуковые, магнитозвуковые, альфвеновские. Показатель преломления плазмы, пространственная и временная дисперсия, фазовая и групповая скорости плазменных волн
8	Взаимодействие заряженных частиц с волнами в плазме	Возбуждение и затухание волн в плазме, черенковское излучение, затухание Ландау. Раскачка плазменных колебаний пучками. Квазилинейное приближение
9	Взаимодействие электромагнитных волн с плазмой	Распространение электромагнитных волн в неоднородной плазме, геометрическая оптика, плазменный резонанс, циклотронный резонанс, линейная трансформация. Основные нелинейные процессы взаимодействия волн, неустойчивость плазмы в сильном электромагнитном поле. Рассеяние и трансформация волн
10	Излучение плазмы	Элементарные радиационные процессы, интенсивность спектральных линий, сплошные спектры, вынужденное испускание. Пробег излучения, перенос излучения в среде, оптически прозрачная и непрозрачная плазма, лучистая теплопроводность.
11	Диагностика плазмы	Зондовые методы, оптические методы, СВЧ-методы, корпускулярные методы, лазерное рассеяние, магнитные измерения.
12	Электрический разряд в газах	Основные виды разряда: тлеющий разряд, искра, электрическая дуга, ВЧ-, СВЧ- и оптический разряд. Условия стационарности разряда, излучающий разряд в плотной плазме, плазменно-пучковый разряд.
13	Гидродинамические и тепловые явления в плазме	Ударные волны в плазме, скачок уплотнения, релаксационный слой, излучение ударных волн, нелинейные волны теплопроводности. Токовые слои.
<b>Дополнительная программа кандидатского экзамена по специальности «физика плазмы»</b>		
1	Кинетический и гидродинамический методы описания плазмы	Уравнение Лиувилля и условия корректного перехода к кинетическому уравнению с самосогласованным полем для одночастичной функции распределения. Разлет бесстолкновительной плазмы. (ограниченной и из полупространства). Приближенное описание столкновений в рамках кинетического уравнения. Интеграл столкновений в форме Ландау, уравнение Фоккера-Планка, релаксационная форма интеграла столкновений. Кинетическое описание упругих и неупругих столкновений электронов с атомами и молекулами. Приближенное описание кинетики электронов в слабом однородном электрическом поле (расчет эффективной частоты столкновений и нагрева электронов).

		<p>Явление убегающих электронов. Моменты функции распределения и переход к гидродинамическому описанию плазмы. Приближение квазигидродинамики, вывод диффузионных уравнений, явление термодиффузии и теплопроводности. Амбиполярная диффузия. «Вмороженность» магнитного поля в плазму. Нагрев электронов в постоянном и высокочастотном электрическом поле при наличии столкновений.</p>
2	Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях	<p>Релятивистские уравнения движения заряженных частиц в электромагнитном поле. Точные решения в однородных постоянных полях и в поле бегущей плоской волны. Движение заряженной частицы в магнитной ловушке, адиабатические инварианты, неоклассический перенос. Движение частицы в слабо неоднородном высокочастотном электромагнитном поле, высокочастотный потенциал, влияние внешнего магнитного поля. Движение электрона в пространственно периодическом электрическом поле. Квазиимпульс и зонный спектр электронов. Экранировка зарядов в кристалле в приближении случайных фаз.</p>
3	Волны в плазме	<p>Феноменологическое описание электродинамики сред с временной и пространственной дисперсией. Плоские монохроматические волны, тензор диэлектрической проницаемости, соотношение Крамерса-Кронига. Распространение волновых пакетов, плотность энергии и потока энергии квазимонохроматических электромагнитных волн в среде с временной дисперсией, волны с отрицательной энергией.</p> <p>Тензор диэлектрической проницаемости в холодной магнитоактивной плазме. Электромагнитные и потенциальные волны в изотропной плазме с учетом теплового движения в рамках гидродинамического описания. Классификация волн в магнитоактивной плазме. Тензор диэлектрической проницаемости плазмы в рамках кинетического описания. Распространение электромагнитных волн в плоскостной плазме. Нормальный и аномальный скин-эффект. Поглощение волн в областях плазменного и циклотронного резонанса. Линейная трансформация волн в изотропной и магнитоактивной плазме, эффект предельной поляризации волн. Поверхностные волны на границе плазменного полупространства. Каналирование волн в плоских слоях с повышенной и пониженной плотностью плазмы. Резонансные характеристики простейших плазменных объектов – плоский слой, цилиндр, шар. Геометрооптическое описание волн в нестационарной плоскостной изотропной плазме. Геометрическая оптика в магнитоактивной плазме. Антенна в плазме. Излучение электромагнитных волн в плазме сторонними источниками (антеннами, пучками заряженных частиц). Использование плазмы для согласования антенны со средой.</p>
4	Взаимодействие заряженных частиц с волнами в плазме	<p>Понятие об абсолютной и конвективной неустойчивости. Кинетические и гидродинамические неустойчивости электромагнитных волн в плазме.</p> <p>Эволюция функции распределения электронов в поле монохроматической плазменной волны. Квазилинейная теория, релаксация электронного пучка в плазме, ускорение частиц плазменной турбулентностью, механизм Ферми, формирование энергетического спектра частиц. Эхо в плазме. Аномальная диффузия, теплопроводность и сопротивление. Новые методы ускорения заряженных частиц и фотонов в плазме; ускорение на кильватерной волне и волне биений.</p>
5	Нелинейные эффекты в плазме	<p>Механизмы трехволнового взаимодействия в плазме. Примеры трехволновых процессов. Распадные неустойчивости. Соотношения Мэнли-Роу. Модифицированный распад. Процессы индуцированного рассеяния волн. Механизмы нелинейного самовоздействия волн в плазме (тепловые, силовые, ионизационные, релятивистские). Уравнения движения плазмы с учётом усреднённой силы со стороны</p>

		высокочастотного поля. Модуляционная неустойчивость, ленгмюровские солитоны. Примеры самовоздействия электромагнитных волн в плазме (волноводные каналы, солитоны огибающих, ионизационное каналирование поверхностных волн). Сильная и слабая турбулентность плазмы. Параметрическое возбуждение ионно-звуковой и ленгмюровской волн в высокочастотном поле. Генерация “кавитонов” в области плазменного резонанса. Ионно-звуковые солитоны. МГД и бесстолкновительные ударные волны.
6	Излучение плазмы	Виды излучения: Тормозное, магнитотормозное, черенковское, переходное, комптоновское. Нормальный и аномальный эффект Доплера. Особенности излучения релятивистских электронов. Синхротронное излучение в плазме. Сила реакции излучения; давление излучения в плазме. Тепловое и нетепловое излучения плазмы. Уравнение переноса излучения. Реабсорбция излучения, связь коэффициента поглощения и излучательной способности среды, метод коэффициентов Эйнштейна. Усиление излучения в неравновесной плазме. Вынужденное излучение из плазмы, в которой заданы начальные электронные токи. Рассеяние электромагнитных волн на флуктуациях плотности плазмы.
7	Специальные разделы физики плазмы: космическая плазма	Магнитосфера Земли: формирование магнитосферы, особенности движения частиц, механизмы ускорения и потерь заряженных частиц в магнитосфере. Динамика радиационных поясов. Механизмы возбуждения основных видов электромагнитных излучений в магнитосферной плазме. Циклотронные мазеры. Физика космических лучей. Механизмы их ускорения в оболочках сверхновых, в окрестностях нейтронных звезд и активных ядер галактик. Диффузия космических лучей в магнитном поле Галактики. Проблема космических лучей сверхвысоких энергий. Плазменные магнитосферы и радиоизлучение Юпитера, Солнца, пульсаров и активных галактик. Звёздный ветер. Токовые слои и их неустойчивости. Аккрецирующие рентгеновские источники. Релятивистские джеты и выбросы. Космические гамма – всплески.
8	Специальные разделы физики плазмы: УТС	Стационарный и инерционный управляемый термоядерный синтез, реакции термоядерного синтеза, критерий Лоусона, пороговая температура. Основные системы для магнитного удержания плазмы (токамак, стеларатор, прямая ловушка). МГД-неустойчивости плазменного шнура и методы их стабилизации. Критерий устойчивости Шафранова-Крускала. Диффузия Пфирша – Шлютера, «банановый» перенос в тороидальных и тандемных ловушках, бутстреп-ток. Методы нагрева и генерации тока в термоядерной плазме. Механизм поглощения лазерного излучения в плотной плазме, абляционное сжатие мишени, энергия поджига реакции, системы с быстрым поджигом. Лазерный реактивный двигатель. Усиление ВУФ в рекомбинирующей плазме.
9	Специальные разделы физики плазмы: разряд	Физика газового разряда, классификация разрядов, их особенности и примеры (равновесный и неравновесный разряды; низкочастотный, высокочастотный и оптический разряды). Принцип подобия для высокочастотного пробоя газа. Ограничение электронной концентрации в плазме неравновесного разряда, поддерживаемого в сфокусированных пучках электромагнитных волн. Распространение разряда навстречу падающему электромагнитному излучению. Плазменно-пучковый разряд. ЭЦР разряд в прямой магнитной ловушке, классификация режимов удержания плазмы, генерация многозарядных ионов.
10	Специальные разделы физики плазмы: аэрозольная плазма	Вигнеровский и пылевой кристаллы. Особенности распространения электромагнитных волн в пылевой плазме. Рассеяние электромагнитных волн на аэрозолях.

#### 4. Образовательные технологии

Основными видами образовательных технологий дисциплины «Физика плазмы» являются занятия лекционного типа с применением технологий интерактивного обучения (презентаций), проблемный метод изложения материала, диалоговая форма проведения занятий и самостоятельная работа аспиранта. Для активизации познавательного процесса проводятся также занятия семинарского типа: аспирантам даются задания по самостоятельной подготовке семинаров по тематике лекций, которые впоследствии представляются в виде устных презентаций с последующим обсуждением.

#### 5. Формы организации и контроля самостоятельной работы обучающихся

Используются виды самостоятельной работы аспиранта: в читальном зале библиотеки ИПФ РАН, в компьютерном классе с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе курса и контролируется в ходе аудиторных занятий по данной дисциплине. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, доступные ресурсы в Интернет по тематике курса, а также конспекты и презентации лекций.

#### 6. Фонд оценочных средств для аттестации по дисциплине

##### 6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), и уровня их сформированности

Описание показателей и критериев оценивания компетенций приведены в приложении 1.

##### 6.2. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине. Описание шкал оценивания

Для оценивания сформированности компетенций используется промежуточная аттестация в форме кандидатского экзамена с оценкой по пятибалльной шкале («плохо», «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично»). Кандидатский экзамен сдается по совокупности всех освоенных за время обучения специальных дисциплин.

##### Критерии оценок:

Отлично	Высокий уровень подготовки с незначительными ошибками. Аспирант дает полный и развернутый ответ на все заданные теоретические вопросы; точно отвечает на дополнительные вопросы; приводит почти полные, аргументированное решение сформулированной задачи с незначительными недочетами, способен успешно решить дополнительную задачу. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, демонстрирующих знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий на 90% и выше
Хорошо	В целом хорошая подготовка с заметными ошибками или недочетами. Аспирант дает полный ответ на все заданные теоретические вопросы билета с небольшими неточностями, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит почти полное решение сформулированной задачи с некоторыми недочетами. Изложение решений и полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей и не всегда полной обоснованностью выводов, демонстрирующих, в целом, знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки, владение основными методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 70 до 90%.
Удовлетворительно	Минимально достаточный уровень подготовки. Аспирант показывает минимальный уровень теоретических знаний, допускает ошибки при ответах на дополнительные вопросы; приводит неполные, слабо аргументированное решение сформулированной задачи. Изложение решений и полученные ответы не отличаются стройной логической последовательностью, четкостью в выражении мыслей и обоснованностью выводов, что говорит о не достаточно полном понимании общефизических и профессиональных дисциплин, умении применять на практике лишь некоторые приобретенные навыки, владении не всеми изученными методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий от 50 до 70%.

Неудовлетворительно	Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Аспирант дает ошибочные ответы, как на заданные теоретические вопросы, так и на наводящие и дополнительные вопросы экзаменатора; приводит решение сформулированной задачи с грубыми недочетами, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки, не владение методиками решения задач. Выполнение контрольных экзаменационных заданий до 50%.
Плохо	Подготовка абсолютно недостаточная. Аспирант не отвечает на поставленные вопросы, демонстрирует полное непонимание сформулированной задачи. Выполнение контрольных экзаменационных заданий менее 20 %.

### 6.3. Контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих сформированность компетенций.

Промежуточная аттестация в форме кандидатского экзамена проводится по программе кандидатского экзамена по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Вопросы по программе кандидатского экзамена по специальности 01.04.03 – физика плазмы приведены в приложении 2.

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

### а) основная литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. М.: Наука. Т. 3: Квантовая механика – 5 экз.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. М.: Наука. Т. 5: Статистическая физика – 5 экз.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. М.: Наука. Т.7: Электродинамика сплошных сред – 4 экз.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. М.: Наука. Т. 10: Физическая кинетика. – 4 экз.
5. Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков. М.: Атомиздат, 1979. – 5 экз.
6. Александров А.Ф., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Основы электродинамики плазмы. М.: Высш. шк., 1988. – 3 экз.
7. Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме. М.: Наука, 1988. – 4 экз.
8. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. – 3 экз.
9. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2000. – 5 экз.
10. Русанов В.Д., Фридман А.А. Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984. – 9 экз.
11. Фортов В.Е., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы. М.: ОИХФ, 1984. – 3 экз.
12. “Вопросы теории плазмы” (под ред. Леонтовича М.А.). – М.: Госатомиздат, 1980, т.10. – 6 экз.
13. Сборник научных трудов «Взаимодействие сильных электромагнитных волн с бесстолкновительной плазмой» под ред. А.Г. Литвака, 1980 [Электронный ресурс – Виртуальная библиотека ИПФ РАН] <http://www.iapras.ru/biblio/img/emv.pdf>
14. Proceedings of the International Workshop Strong Microwaves in Plasmas, 2006, 2003, 2000, 1996, 1993, 1991. [Электронный ресурс – Виртуальная библиотека ИПФ РАН] <http://www.iapras.ru/biblio/b1s.html>

### б) дополнительная литература

1. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. М.: Атомиздат, 1968. – 2 экз.
2. “Электродинамика плазмы” (под ред. Ахизера А.И.). – М.: Наука, 1974. – 2 экз.
3. Власов С. Н., Таланов В. Н. “Самофокусировка волн”. – Н. Новгород, ИПФ РАН, 1997. – 3 экз.
4. Железняков В.В. “Радиоизлучение Солнца и планет”. – М.: Наука, 1964. – 2 экз.
5. Беспалов П. А., Трахтенгерц В. Ю. “Альфвеновские мазеры”. - ИПФ АН СССР, Горький, 1986. – 3 экз.



6. Райзер Ю. П. “Физика газового разряда”. – М.: Наука, 1987. – 4 экз.
7. Мареев Е. А., Чугунов Ю. В. “Антенны в плазме”. - ИПФ РАН, Н. Новгород, 1991. – 3 экз.
8. Баранов В.Б., Краснобаев К.В. “Гидродинамическая теория космической плазмы”. – М.: Наука, 1977. – 3 экз.
9. Владимиров В.В., Волков А.Ф., Мейлихов Е.З. “Плазма полупроводников”. – М.: Атомиздат., 1979. – 2 экз.
10. Ситенко А.Г. “Флуктуации и нелинейное взаимодействие волн в плазме”. – Киев: Наукова думка, 1977. – 3 экз.
11. Ашкрофт Н., Мермин Н. “Физика твёрдого тела”. – М.: Мир, 1979, т.1. – 7 экз.
12. На переднем крае астрофизики./ Под ред. Ю. Эвретта. – М.: Мир, 1979. – 2 экз.
13. Физика внегалактических источников радиоизлучения./ Под ред. Р.Д. Дагке-саманского. – М.: Мир, 1987. – 2 экз.
14. Дюдерштадт Дж., Мозес Г. “Инерциальный термоядерный синтез”. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 3 экз.
15. Плазменная гелиогеофизика. В 2-х т. / Ред. Л. М. Зеленый. - М.: Физматлит, 2008–2 экз.

в) Интернет-ресурсы: Physics of Plasmas <http://phys.org/journals/physics-of-plasmas/>

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

- Специальные помещения для проведения занятий: лекционного типа, семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации, а также помещения для самостоятельной работы обучающихся, оснащенные компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет";
- Лицензионное программное обеспечение (*Windows, Microsoft Office*);
- Обучающиеся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья обеспечиваются (при необходимости) электронными и (или) печатными образовательными ресурсами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия, направленность 01.04.08 Физика плазмы.

Автор \_\_\_\_\_ А.Г. Шалашов

Ответственный за направление подготовки \_\_\_\_\_ Вл.В. Кочаровский

Рецензент:

Зав.сектором нелинейной и квантовой оптики  
конденсированных и плазмоподобных сред \_\_\_\_\_ М.Д. Токман,  
д.ф.м.н., профессор

Программа принята на заседании Ученого совета Отделения физики плазмы и электроники больших мощностей ИПФ РАН, протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года.

Ученый секретарь ОФПиЭБМ \_\_\_\_\_ О.С. Моченева

Программа принята на заседании Ученого совета отделения геофизических исследований и Центра гидроакустики ИПФ РАН, протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года.

Ученый секретарь ОГИиЦГ \_\_\_\_\_ М.В. Шаталина

Программа принята на заседании Ученого совета отделения нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН, протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ года.

Ученый секретарь ОНДиО \_\_\_\_\_ А.В. Коржиманов

**Карты компетенций, в формировании которых участвует дисциплина**

**ПК-1:** Способность самостоятельно разбираться, непредвзято оценивать и оперативно ориентироваться в передовых идеях и самых последних достижениях современной физики

Индикаторы компетенций	Критерии оценивания результатов обучения				
	1 Плохо	2 Неудовлетворительно	3 Удовлетворительно	4 Хорошо	5 Отлично
<u>Знания:</u> знать методы критического анализа и оценки современных научных достижений, а также методы генерирования новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	Отсутствие знаний	Фрагментарные знания без положительного результата применения	Успешная демонстрация знаний лишь по базовым разделам дисциплины	Успешная демонстрация знаний по всем разделам дисциплины с небольшими погрешностями и неточностями	Успешная демонстрация знаний по всем разделам дисциплины
<u>Умения:</u> уметь при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи, поддающиеся операционализации исходя из наличных ресурсов и ограничений	Отсутствие умений	Фрагментарное присутствие умений без положительного результата применения	Успешная демонстрация умений лишь по базовым разделам дисциплины	Успешная демонстрация умений по всем разделам дисциплины с небольшими недочетами и неточностями	Успешная демонстрация умений по всем разделам дисциплины
<u>Навыки:</u> владеть навыками критического анализа и оценки современных научных достижений и результатов деятельности по решению исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	Отсутствие навыков	Фрагментарные навыки без положительного результата применения	Успешная демонстрация навыков, соответствующая базовым разделам дисциплины, с некоторыми недочетами	Успешная демонстрация навыков, соответствующая всем разделам дисциплины, с небольшими недочетами	Успешная демонстрация навыков, соответствующая всем разделам дисциплины

**ПК-2:** Способность проводить научные исследования и решать научно-исследовательские задачи, соответствующие направленности подготовки, используя специализированные знания в области физики и астрономии, современные методы исследований и информационные технологии, с учетом отечественного и зарубежного опыта

Индикаторы компетенций	Критерии оценивания результатов обучения				
	1 Плохо	2 Неудовлетворительно	3 Удовлетворительно	4 Хорошо	5 Отлично
<u>Знания:</u> знать основные направления современных научных исследований в области физики плазмы в контексте характеристик современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта	Отсутствие знаний	Фрагментарные знания без положительного результата применения	Успешная демонстрация знаний лишь по базовым разделам дисциплины	Успешная демонстрация знаний по всем разделам дисциплины с небольшими погрешностями	Успешная демонстрация знаний по всем разделам дисциплины
<u>Умения:</u> уметь самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики плазмы и решать их с помощью	Отсутствие умений	Фрагментарное присутствие умений без положительного	Успешная демонстрация умений лишь по базовым разделам	Успешная демонстрация умений по всем разделам дисциплины с	Успешная демонстрация умений по всем разделам

современной аппаратуры и информационных технологий; представлять результаты научно-исследовательской деятельности (в т.ч., диссертационной работы) академическому и бизнес-сообществу.		ого результата применения	дисциплины	небольшими недочетами и неточностями	дисциплины
<u>Навыки:</u> владеть навыками проведения научных исследований в области физики плазмы с учетом характеристик и возможностей современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта	Отсутствие навыков	Фрагментарные навыки без положительного результата применения	Успешная демонстрация навыков, соответствующая базовым разделам дисциплины, с некоторыми недочетами	Успешная демонстрация навыков, соответствующая всем разделам дисциплины, с небольшими недочетами	Успешная демонстрация навыков, соответствующая всем разделам дисциплины

**ПК-3:** Способность свободно ориентироваться в разделах физики, необходимых для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности (в соответствии с направленностью подготовки)

Индикаторы компетенций	Критерии оценивания результатов обучения				
	1 Плохо	2 Неудовлетворительно	3 Удовлетворительно	4 Хорошо	5 Отлично
<u>Знания:</u> знать современное состояние науки в области физики плазмы; современные подходы к моделированию различных явлений в области физики плазмы и оценке полученных результатов	Отсутствие знаний	Фрагментарные знания без положительного результата применения	Успешная демонстрация знаний лишь по базовым разделам дисциплины	Успешная демонстрация знаний по всем разделам дисциплины с небольшими погрешностями	Успешная демонстрация знаний по всем разделам дисциплины
<u>Умения:</u> уметь самостоятельно интерпретировать результаты научного исследования; оценивать границы применимости полученных результатов научного исследования в области радиофизики и возможности их внедрения	Отсутствие умений	Фрагментарное присутствие умений без положительного результата применения	Успешная демонстрация умений лишь по базовым разделам дисциплины	Успешная демонстрация умений по всем разделам дисциплины с небольшими недочетами и неточностями	Успешная демонстрация умений по всем разделам дисциплины
<u>Навыки:</u> Владеть навыками решения практических, в том числе и научно-инновационных, задач, основанными на полученных в ходе освоения дисциплины знаниях	Отсутствие навыков	Фрагментарные навыки без положительного результата применения	Успешная демонстрация навыков, соответствующая базовым разделам дисциплины, с некоторыми недочетами	Успешная демонстрация навыков, соответствующая всем разделам дисциплины, с небольшими недочетами	Успешная демонстрация навыков, соответствующая всем разделам дисциплины

**Вопросы по программе кандидатского экзамена**

1. Понятие плазмы, квазинейтральность, микрополя, идеальная и неидеальная плазма, классическая и вырожденная плазма, дебаевский радиус, потенциал пробного заряда в плазме.
2. Столкновения заряженных частиц в плазме, задача Резерфорда, кулоновский логарифм. Торможение пробной заряженной частицы в плазме.
3. Элементарные процессы в плазме. Ионизация, рекомбинация, перезарядка и прилипание. Возбуждение и диссоциация молекул электронным ударом. Фоторекомбинация и фотоионизация.
4. Ионизация равновесной плазмы, формула Саха, снижение потенциала ионизации, условие термодинамического равновесия.
5. Кинетическое описание плазмы. Функция распределения. Уравнение Больцмана и Власова, самосогласованное и действующее поле. Приближение парных соударений.
6. Описание кулоновских столкновений в рамках кинетического уравнения Больцмана. Интеграл столкновений в форме Ландау, релаксационная форма интеграла столкновений ( $\tau$ -приближение). H-теорема Больцмана.
7. Гидродинамическое описание плазмы. Моменты функции распределения и вывод системы гидродинамических уравнений полностью ионизированной плазмы.
8. Одножидкостная и двухжидкостная гидродинамика. Идеальная магнитная гидродинамика, законы сохранения. Вмороженность и проникновение магнитного поля в плазму.
9. Явления переноса в плазме. Кинетические коэффициенты для изотропной плазмы. Теплопроводность и проводимость плазмы. Термосила. Тензор вязких натяжений.
10. Проводимость плазмы в слабом однородном электрическом поле. Задача Спитцера. Явление убегающих электронов.
11. Кинетические коэффициенты для плазмы в однородном магнитном поле. Закон Ома и эффект Холла.
12. Амбиполярное поле. Амбиполярная и униполярная диффузия. Аномальная (бомовская) диффузия.
13. Равновесные конфигурации плазмы в магнитной гидродинамике. Бессилловые конфигурации. Пинчи. Равновесие тороидальной плазмы.
14. МГД неустойчивости плазменного шнура и методы их стабилизации. Энергетический принцип МГД-устойчивости.
15. Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях. Релятивистские уравнения движения заряженных частиц в электромагнитном поле. Точные решения в однородных постоянных полях и в поле бегущей плоской волны.
16. Дрейфовое приближение. Движение частицы в магнитных ловушках, адиабатические инварианты, неоклассический перенос.
17. Движение частицы в слабо неоднородном высокочастотном электромагнитном поле. Высокочастотный потенциал.
18. Феноменологическое описание электромагнитных волн в изотропных и анизотропных средах с пространственной и временной дисперсией. Плоские электромагнитные волны, тензор диэлектрической проницаемости. Нормальные волны, двулучепреломление, поляризация нормальных волн.
19. Распространение волновых пакетов. Фазовая и групповая скорость, плотность энергии и плотность потока энергии. Электромагнитные волны и потенциальные колебания, резонансы среды.
20. Продольная и поперечная диэлектрическая проницаемость изотропной плазмы с максвелловскими распределениями ионов и электронов по импульсам. Нормальные волны в

однородной изотропной плазме. Электромагнитные волны, ленгмюровские электронные и ионные колебания, ионно-звуковые волны.

21. Тензор диэлектрической проницаемости в холодной магнитоактивной плазме. Циклотронный резонанс. Нормальные волны в однородной магнитоактивной плазме. Вистлеры. Магнитозвуковые волны. Альфвеновские волны. Моды Бернштейна.

22. Диссипация энергии электромагнитных волн и колебаний в плазме. Затухание из-за соударений. Затухание Ландау. Соотношения Крамерса-Кронига.

23. Излучение волн заряженными частицами. Тормозное излучение. Черенковское излучение. Циклотронное излучение. Синхротронное излучение. Нормальный и аномальный эффект Доплера. Сила реакции излучения.

24. Излучение плазмы. Тепловое и нетепловое излучение. Уравнение переноса излучения. Реабсорбция излучения, связь коэффициентов поглощения и излучательной способности среды. Метод коэффициентов Эйнштейна.

25. Кинетические и гидродинамические неустойчивости электромагнитных волн в плазме. Волны с отрицательной энергией. Понятие об абсолютной и конвективной неустойчивости.

26. Взаимодействие пучков заряженных частиц с плазмой. Пучковая неустойчивость. Квазилинейная теория плазменных колебаний. Релаксация электронного пучка в плазме.

27. Некогерентное рассеяние электромагнитных волн на флуктуациях плотности плазмы. Предел коротких волн. Предел длинных волн, коллективное рассеяние.

28. Распространение электромагнитных волн в неоднородной плазме. Геометрическая оптика. Линейная трансформация волн. Нормальный и аномальный скин-эффект. Поверхностные волны на границе плазменного полупространства.

29. Нелинейные эффекты в плазме. Трехволновые процессы в плазме. Соотношения Мэнли-Роу. Распадные неустойчивости. Модифицированный распад. Индуцированное рассеяние волн.

30. Механизмы нелинейного самовоздействия волн в плазме. Гидродинамическое описание плазмы с учетом усредненной силы со стороны высокочастотного поля. Самофокусировка. Модуляционная неустойчивость. Ленгмюровский солитон.