

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

УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана физического факультета МГУ,  
профессор, д.ф.-м.н.

  
В.В. Белокуров /  
« 21 » марта 2024 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

**Физика плазмы**

*Physics of plasma*

Программа (программы) подготовки  
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре  
Физика плазмы  
(103-01-00-139-фмн)

---

Москва 2024

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с Приказом по МГУ от 24 ноября 2021 года № 1216 «Об утверждении Требований к основным программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, самостоятельно устанавливаемых Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова».

1. Краткая аннотация:

**Название дисциплины:** Физики плазмы.

**Цель изучения дисциплины** – расширение и углубление знаний о современном состоянии и тенденциях развития в области физики плазмы.

2. Уровень высшего образования - подготовка кадров высшей квалификации.

3. Научная специальность: 1.3.9 Физика плазмы; область науки: естественные науки.

4. Место дисциплины (модуля) в структуре Программы аспирантуры: дисциплины (модули), направленные на подготовку к кандидатским экзаменам - Дисциплина, совпадающая с наименованием научной специальности.

5. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся:

*Объем дисциплины (модуля) составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 54 часа составляет контактная работа аспиранта с преподавателем (52 часов занятия лекционного типа, 2 часов мероприятия текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации), 54 часа составляет самостоятельная работа учащегося.*

6. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия.

Необходимы знания высшей математики и общей физики в объеме курсов, преподаваемых на физических специальностях классических университетов, полученных на предыдущих уровнях высшего образования.

7. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля),  форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них					Самостоятельная работа обучающегося, часы из них			
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка к коллоквиумам	Всего
<b>Тема 1. Термодинамика плазмы</b> <i>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.</i>	7			3			3	4		4
<b>Тема 2. Элементарные процессы</b> <i>Столкновения заряженных частиц, дальное действие,</i>	7			3			3	4		4

<p>частоты столкновений, столкновения электронов с атомами (упругие и неупругие), столкновения тяжелых частиц. Ионизация, рекомбинация, перезарядка и прилипание. Возбуждение и диссоциация молекул электронным ударом.</p>										
<p><b>Тема 3. Физическая кинетика</b> 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.</p>	6			3			3	3		3
<p><b>Тема 4. Динамика заряженных частиц в электрическом и магнитном полях</b> Движение в скрещенных электрическом и магнитном полях. Дрейфовое приближение, разновидности дрейфового движения. Заряженная частица в высокочастотном поле. Понятие</p>	8			4			4	4		4

<i>адиабатического инварианта.</i>										
<b>Тема 5. Магнитная гидродинамика плазмы</b> <i>Уравнения движения плазмы в магнитном поле, проникновение магнитного поля в плазму, вмороженность магнитного поля. Законы сохранения в идеальной одножидкостной МГД. Двухжидкостное приближение.</i>	8			4			4	4		4
<b>Тема 6. Неустойчивость плазмы</b> <i>Равновесные конфигурации плазмы в магнитной гидродинамике, пинч. Неустойчивость плазмы, виды неустойчивости, перегреваемая и ионизационная неустойчивости. Энергетический принцип МГД-устойчивости.</i>	8			4			4	4		4
<b>Тема 7. Колебания и волны в плазме</b> <i>Основные типы колебаний и волн в плазме: лэнгмюровские электронные и ионные, электромагнитные, ионно-звуковые, магнитозвуковые, альфвеновские. Показатель преломления плазмы, пространственная и временная дисперсия, фазовая и групповая скорости плазменных волн.</i>	8			4			4	4		4

<p><b>Тема 8. Взаимодействие заряженных частиц с волнами в плазме</b>  <i>Возбуждение и затухание волн в плазме, черенковское излучение, затухание Ландау. Раскачка плазменных колебаний пучками. Квазилинейное приближение.</i></p>	8		4			4	4		4
<p><b>Тема 9. Взаимодействие электромагнитных волн с плазмой</b>  <i>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.</i></p>	8		4			4	4		4
<p><b>Тема 10. Излучение плазмы</b>  <i>Элементарные радиационные процессы, интенсивность спектральных линий, сплошные спектры, вынужденное испускание. Пробег излучения, перенос излучения в среде, оптически прозрачная и непрозрачная плазма, лучистая теплопроводность.</i></p>	8		4			4	4		4

<p><b>Тема 11. Диагностика плазмы</b>  Зондовые методы, оптические методы, СВЧ-методы, корпускулярные методы, лазерное рассеяние, магнитные измерения.</p>	8			4			4	4		4
<p><b>Тема 12. Электрический разряд в газах</b>  Основные виды разряда: тлеющий разряд, искра, электрическая дуга, ВЧ-, СВЧ- и оптический разряд. Условия стационарности разряда, излучающий разряд в плотной плазме, плазменно-пучковый разряд.</p>	8			4			4	4		4
<p><b>Тема 13. Гидродинамические и тепловые явления в плазме</b>  Ударные волны в плазме, скачок уплотнения, релаксационный слой, излучение ударных волн, нелинейные волны теплопроводности. Токовые слои.</p>	6			3			3	3		3
<p><b>Тема 14. Прикладные проблемы физики плазмы</b>  Управляемый термоядерный синтез, магнитное удержание и нагрев плазмы в магнитных ловушках и инерциальных системах. Геофизические и астрофизические плазменные явления - ионосфера Земли, межпланетная плазма, звезды. Плазменные источники излучения,</p>	8			4			4	4		4

<p>плазменная СВЧ-электроника. Преобразование тепловой энергии в электрическую: МГД-преобразователи, тепловые преобразователи. Химические реакции в равновесной и неравновесной плазме. Механизмы и кинетика осуществления плазмохимических реакций, роль заряженных и возбужденных частиц. Энергетика химических реакций в электрических разрядах. Закалка продуктов плазмохимических процессов. Методы диагностики химически активной плазмы. Взаимодействие плазмы с поверхностью твердых тел. Плазменные технологии (травление, имплантация, упрочнение, нанесение покрытий и пр.</p>										
<p>Промежуточная аттестация: допуск к кандидатскому экзамену</p>	2					2	2			
<b>Итого</b>	<b>108</b>			<b>52</b>		<b>2</b>	<b>54</b>	<b>54</b>		<b>54</b>

## 8. Образовательные технологии

Используемые формы и методы обучения: лекции и семинарские занятия, самостоятельная работа аспирантов.

В процессе преподавания дисциплины преподаватель использует как классические формы и методы обучения (лекции и семинарские занятия), так и активные методы обучения.

При проведении лекционных занятий преподаватель использует при необходимости аудиовизуальные, компьютерные и мультимедийные средства обучения, а также демонстрационные и наглядно-иллюстрационные (в том числе раздаточные) материалы.

9. Учебно-методические материалы для самостоятельной работы по дисциплине (модулю): аспирантам предоставляется программа курса, план занятий и задания для самостоятельной работы, презентации к лекционным занятиям.

10. Ресурсное обеспечение:

### Основная литература:

1. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы. М.: Атомиздат, 1968.
2. Кролл Н., Трайвелпис А. Основы физики плазмы. М.: Мир, 1975.
3. Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков. М.: Атомиздат, 1979.
4. Основы физики плазмы. Т.1, 2 и доп. к т. 2. / Под ред. Р.З. Сагдеева, М.Н. Розенблюта. М.: Энергоатомиздат, 1984-1985.
5. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том. Ч. I-IV/ Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000.
6. Александров А.Ф., Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Основы электродинамики плазмы. М.: Высш. шк., 1988.
7. Трубников Б.А. Теория плазмы: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1996.
8. Лукьянов С.Ю., Ковальский Н.Г. Горячая плазма и управляемый термоядерный синтез: Учеб. для вузов. М.: МФТИ, 1999.
9. Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме. М.: Наука, 1988.
10. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
11. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. Издание 3, Переработанное и дополненное, Издательский дом Интеллект, 2009, 734 с.
12. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. М.: Наука. Т. 3: Квантовая механика Т. 5: Статистическая физика. Т.7: Электродинамика сплошных сред. Т. 10: Физическая кинетика.
13. Животов В.К., Русанов В.Д., Фридман А.А. Диагностика неравновесной химически активной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985.
14. Веденов А.А. Задачник по физике плазмы. М.: Атомиздат, 1981.
15. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982.
16. Генин Л.Г., Свиридов В.Г. Гидродинамика и теплообмен МГД-течений в каналах. М.: Изд-во МЭИ, 2001.
17. Фортов В.Е., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы. М.: ОИХФ, 1984.
18. Shunjiro Shinohara, High-Density Helicon Plasma Science, From Basics to Applications. Springer. Singapore Pte Ltd. 2022. 313 с.
19. Миямото К. Основы физики плазмы и управляемого синтеза. Физматлит, 2007 г. 424 с. ISBN 978-5-9221-0838-6.

20. Сковорода А.А. Магнитные ловушки для удержания плазмы. Физматлит, 2009 г. ISBN: 978-5-9221-1133-1
21. Тимофеев А.В. Резонансные явления в колебаниях плазмы. Физматлит, 2009 ISBN: 978-5-9221-1043-3
22. Lieberman M.A., Lichtenberg A.J. Principles of Plasma Discharges and Material Processing. N.-Y.: Wiley, 2005.
23. Кудрявцев А.А., Смирнов А.С., Цендин Л.Д. Физика тлеющего разряда. Лань, 2010.
24. Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Методы теории волн в средах с дисперсией. 2007. 272 с.
25. Кузелев М.В. Волновые явления в средах с дисперсией. Изд. стереотип. URSS. 2020. 400 с.

#### **Дополнительная литература:**

1. Итоги науки и техники. Физика плазмы: Серия сб. / Под ред. В.Д. Шафранова. М.: ВИНТИ.
2. Вопросы теории плазмы: Серия сб. / Под ред. М.А. Леонтовича, Б.Б. Кадомцева. М.: Атомиздат.
3. Химия плазмы: Серия сб. / Под ред. Б.М. Смирнова. М.: Энергоатомиздат.
4. Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. М.: Физматлит, 2006, 572 с
5. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2000.
6. Силин В.П. Введение в кинетическую теорию газов. М.: Наука, 1998.
7. Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольгрёвена. М.: Мир, 1971.
8. Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. М.: Мир, 1967.
9. Смирнов Б.М. Физика атома и иона. М.: Энергоатомиздат, 1986.
10. Смирнов Б.М. Физика слабоионизированного газа. М.: Наука, 1972.
11. Михайловский А.Б. Теория плазменных неустойчивостей. В 2 т. М.: Атомиздат, 1975-1977. Т. 1, 1975; Т. 2, 1977.
12. Русанов В.Д., Фридман А.А. Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984.
13. Иванов А.А., Соболева Т.К. Неравновесная плазмохимия. М.: Атомиздат, 1978.

11. Язык преподавания – русский.

12. Преподаватели:

1. Доктор физико-математических наук, профессор, Кузелев Михаил Викторович, e-mail: kuzelev@mail.ru, +7(495)939-25-47.
2. Доктор физико-математических наук, доцент, Двинин Сергей Александрович e-mail: DvininSA@my.msu.ru, +7(495)939-14-34.

#### **Фонды оценочных средств, необходимые для оценки результатов обучения**

#### **Образцы домашних заданий:**

1. Рассчитать Дебаевский радиус, Ленгмюровскую частоту, число частиц в дебаевской сфере, записать функцию распределения электронов по энергиям в равновесной плазме с плотностью заряженных частиц  $10^{10} \text{ см}^{-3}$  и температурой 4 электронвольта. Какой должна быть плотность нейтралов в такой плазме в условиях термодинамического равновесия?
2. Оценить частоту столкновений электронов с ионами и нейтральными частицами и частоту ион-нейтральных столкновений в плазме с температурой электронов 10000 К, ионов 500 К, нейтралов – 300 К. Рассчитать частоту возбуждения для плазмы, если порог

- процесса 10 эВ, максимум сечения  $10^{-15}$  см<sup>-3</sup> наблюдается при энергии 20 эВ при давлении нейтрального газа 1 Тор и температуре 300 К.
3. Рассчитать скорость дрейфа и скорость диффузии заряженных частиц в плазме с плотностью электронов  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>, с характерным размером неоднородности 3 см, в магнитном поле 100 Гс. Плотность нейтралов  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>. Сечения столкновений электронов и ионов с нейтралами равны  $10^{-15}$  см<sup>-2</sup>, температура электронов 10000 К, ионов и нейтралов 300 К. Будут ли электроны и ионы при этих условиях замагниченными?
  4. Пробочное отношение в магнитной ловушке равно 2 при поле магнитного поля в центральной области 500 Гс. Определить угол конуса потерь для электронов с энергией 10 эВ.
  5. Плотность электронов в плазме  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>, частота столкновений электрон-ион  $10^8$  с<sup>-1</sup>, магнитное поле 1000 Гс. Будет ли выполняться в такой плазме условия замороженности силовых линий магнитного поля?
  6. Неустойчивость плазмы. Равновесные конфигурации плазмы в магнитной гидродинамике, пинч. Неустойчивость плазмы, виды неустойчивости, перегревная и ионизационная неустойчивости. Энергетический принцип МГД-устойчивости.
  7. Рассчитать частоты право- и лево- поляризованных волн, ленгмюровской волны, быстрой и медленной магнитозвуковых волн и альфвеновской волны в плазме водорода при распространении вдоль магнитного поля с напряженностью 1000 Гс. Плотность и температура электронов  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>, 4 эВ, длина волны 10 см.
  8. Плотность электронов в плазме  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>, температура – 3 эВ. В плазме распространяется пучок электронов с плотностью  $10^9$  см<sup>-3</sup> и энергией 10 кЭв. Будет ли в такой системе наблюдаться неустойчивость, если да, то на какой частоте и какой будет инкремент.
  9. Рассчитать глубину проникновения поперечного электромагнитного поля частотой 1 ГГц в плазму. Плотность и температура электронов  $10^{11}$  см<sup>-3</sup> и 3 эВ. Частота столкновений электронов –  $10^8$  с<sup>-1</sup>. Какой механизм проникновения будет наблюдаться?
  10. В плазмохимический ВЧ установке с радиусом электродов 15 см и межэлектродным расстоянием 4 см зажигается разряд в аргоне при давлении  $10^{-2}$  Тор. Какая модель должна использоваться при описании такого разряда? Оценить частоту ионизации в разряде и плотность потока ионов на стенку при плотности плазмы  $3 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>.

#### Вопросы для промежуточной аттестации – зачета:

1. Дебаевский радиус, ленгмюровская частота, условия идеальности и неидеальности плазмы. Квантовая и классическая плазмы.
2. Условие термодинамического равновесия, формула Саха. Принцип детального равновесия. Связь вероятностей прямых и обратных процессов в равновесной плазме. Корональное равновесие. Снижение потенциала ионизации.
3. Вырожденная плазма, статистика Больцмана и Ферми-Дирака, модель Томаса-Ферми
4. Столкновения электронов и ионов с нейтралами, частоты столкновений, столкновения электронов с атомами (упругие и неупругие), столкновения тяжелых частиц. Сечение Фабриканта.
5. Столкновения заряженных частиц, дальное действие, Кулоновский логарифм.
6. Ионизация, рекомбинация, перезарядка и прилипание. Возбуждение и диссоциация молекул электронным ударом. Связь скоростей прямых и обратных реакций.
7. Уравнения Больцмана и Власова, интеграл столкновений, время максвеллизации и скорость выравнивания температур различных компонент плазмы.
8. Химические реакции. Возбуждение и девозбуждение. Скорость ионообразования и рекомбинации электронов и ионов, образование и разрушение возбужденных атомов

- (ионов). Пеннинговская ионизация. Прилипание. Диссоциативное прилипание. Конверсия ионов.
9. Явления переноса в плазме, электропроводность, диффузия и теплопроводность частиц при наличии и отсутствии магнитного поля. Кинетика возбужденных молекул в плазме.
  10. Динамика заряженных частиц в электрическом и магнитном полях. Движение в скрещенных электрическом и магнитном полях. Первый и второй адиабатические инварианты при движении в магнитной ловушке.
  11. Дрейфовое приближение, разновидности дрейфового движения. Заряженная частица в высокочастотном поле. Понятие адиабатического инварианта
  12. Уравнения движения плазмы в магнитном поле, проникновение магнитного поля в плазму, Вмороженность магнитного поля. Законы сохранения в идеальной одножидкостной МГД.
  13. Двухжидкостная магнитная гидродинамика. Условия применимости одножидкостной гидродинамики.
  14. Неустойчивость плазмы Равновесные конфигурации плазмы в магнитной гидродинамике, пинч. Неустойчивость плазмы, виды неустойчивости, перегревная и ионизационная неустойчивости. Энергетический принцип МГД-устойчивости.
  15. Основные типы колебаний и волн в холодной плазме – лэнгмюровские электронные и ионные, электромагнитные, ионно-звуковые, альфвеновские. Показатель преломления плазмы, пространственная и временная дисперсия, фазовая и групповая скорости плазменных волн.
  16. Низкочастотные волны в плазме. Быстрая и медленная магнитозвуковые волны, альфвеновская волна.
  17. Взаимодействие заряженных частиц с волнами в плазме Возбуждение и затухание волн в плазме, затухание Ландау.
  18. Раскачка плазменных колебаний пучками. Черенковское излучение. Квазилинейное приближение. Плазменно-пучковый разряд.
  19. Взаимодействие электромагнитных волн с плазмой Распространение электромагнитных волн в неоднородной плазме, геометрическая оптика, плазменный резонанс, циклотронный резонанс, линейная трансформация.
  20. Основные нелинейные процессы взаимодействия волн, неустойчивость плазмы в сильном электромагнитном поле. Рассеяние и трансформация волн в плазме.
  21. Нелинейные взаимодействия волн. Многоиндексные тензоры диэлектрической проницаемости.
  22. Элементарные радиационные процессы, Форма и интенсивность спектральных линий. Лоренцевская и доплеровская линии. Сплошные спектры. Спонтанное и вынужденное излучение. 23. Пробеги излучения, перенос излучения в среде, оптически прозрачная и непрозрачная плазма, лучистая теплопроводность. Уравнение Бибнрмана-Холстейна.
  23. Зондовые методы диагностики плазмы. Классическая теория зонда Ленгмюра. Плоский цилиндрический и сферический зонды. Условия применимости зондовых методов.  $P_{\text{gyls}}$  при высоких давлениях.
  24. Оптические методы диагностики плазмы. Методы определения плотности возбужденных атомов, температуры электронов, колебательной температуры, температуры нейтралов.
  25. СВЧ-методы исследования плазмы. Определение плотности электронов и частоты столкновений.
  26. Корпускулярные методы диагностики, лазерное рассеяние, магнитные измерения.
  27. Электрический разряд в газах Основные виды разряда: тлеющий разряд, искра, электрическая дуга, ВЧ-, СВЧ- и оптический разряд.
  28. Модель Ленгмюра и Тонкса. Уравнение плазмы и слоя.

29. Диффузионный режим разряда. Модель Шоттки.
30. Условия стационарности разряда, излучающий разряд в плотной плазме,
31. Гидродинамические и тепловые явления в плазме.
32. Ударные волны в плазме, скачок уплотнения, релаксационный слой, излучение ударных волн, Простые волны.
33. Законы сохранения на скачке ударной волны. Ударная адиабата.
34. Нелинейные волны теплопроводности. Токовые слои.

**Методические материалы  
для проведения процедур оценивания результатов обучения**

Зачет проходит по билетам, включающим 3 вопроса. Уровень знаний аспиранта по каждому вопросу на «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». В случае если на все вопросы был дан ответ, оцененный не ниже чем «удовлетворительно», аспирант получает общую оценку «зачтено».

**Шкала оценивания знаний, умений и навыков**

Результат освоения дисциплины	Критерии оценивания знаний, умений и навыков			
	2/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено
Знания	Отсутствие знаний основных законов физики плазмы	В целом успешные, но не систематические знания основных законов физики плазмы	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания основных законов физики плазмы	Успешные и систематические знания основных законов физики плазмы
Умения	Отсутствие умения применять знания основных законов физики плазмы для решения научных задач	В целом успешное, но не систематическое применять знания основных законов физики плазмы для решения научных задач	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение применять знания основных законов физики плазмы для решения научных задач	Успешное и систематическое умение применять знания основных законов физики плазмы для решения научных задач
Навыки	Отсутствие/фрагментарное владение навыками решения научных задач в области физики плазмы	В целом успешное, но не систематическое владение навыками решения научных задач в области физики плазмы	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками решения научных задач в области физики плазмы	Успешное и систематическое владение навыками решения научных задач в области физики плазмы