

<b>МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ</b>			
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение			
высшего образования			
«Московский физико-технический институт (государственный университет)»			
<b>МФТИ</b>			
«УТВЕРЖДАЮ»			
Проректор по учебной и методической работе			
Зубцов Д.А.			
«   » _____ 20 г.			
<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>			
<b>по дисциплине:</b>	Введение в физику низкотемпературной плазмы		
<b>по направлению:</b>	03.03.01 - Прикладные математика и физика (бакалавриат)		
<b>профиль подготовки/ профиль подготовки/</b>	Современные проблемы физики и энергетики		
<b>факультет:</b>	проблем физики и энергетики		
<b>кафедра:</b>	прикладной физики		
<b>курс:</b>	4		
<b>квалификация:</b>	бакалавр		
<b>Программу составил:</b>	Александров Н.Л., доктор физико-математических наук, профессор		
<b>Программа обсуждена на заседании кафедры</b>			
СОГЛАСОВАНО:			
Заведующий кафедрой		Леонов А.Г.	
Декан факультета проблем физики и энергетики		Леонов А.Г.	
Начальник учебного управления			

## ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

### Цели курса:

Целью курса является изучение физических основ низкотемпературной плазмы, ее свойств и приложений.

### Задачи дисциплины

- освоение студентами базовых знаний в области физики низкотемпературной плазмы;
- приобретение студентами знаний в области приложений низкотемпературной плазмы;
- оказание консультаций и помощи студентам в проведении собственных теоретических и экспериментальных исследований в области физики низкотемпературной плазмы;
- приобретение навыков количественных оценок основных параметров, характеризующих свойства низкотемпературной плазмы.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

### 1. Термодинамика низкотемпературной плазмы

Принцип детального равновесия. Вывод формулы Саха. Система уравнений для определения состава плазмы в многокомпонентных газах.

Понятие и параметры неидеальности. Энергия электростатического взаимодействия в плазме. Уравнение состояния слабонеидеальной плазмы. Снижение потенциала ионизации в неидеальной плазме.

### 2. Гидродинамика низкотемпературной плазмы

Модель проводящей среды (одножидкостная модель). Модель двух жидкостей. Параметр Холла. Проводимость плазмы в магнитном поле.

Течение вязкой проводящей среды в канале. Профили Гартмана для скорости, плотности электрического тока и магнитного поля. Параметр Гартмана. Практические приложения этого явления.

### 3. Элементарные процессы в плазме

Понятие сечения рассеяния. Типы сечений. Следствия законов сохранения энергии и импульса. Условия справедливости классического и квантового описания столкновений частиц.

Классическая теория рассеяния. Формула Резерфорда для рассеяния заряженных частиц. Поляризационное взаимодействие. Резонансная перезарядка. Общие закономерности для сечений рассеяния. Квантовые эффекты: резонансное рассеяние, эффект Рамзауэра.

Ионизация и рекомбинация заряженных частиц в плазме. Образование и гибель отрицательных ионов. Процессы с участием возбужденных частиц.

### 4. Кинетика плазмы

Проводимость и диэлектрическая проницаемость плазмы. Распространение электромагнитных волн в плазме. Амбиполярная диффузия плазмы. Соотношение Эйнштейна.

Условия неравновесности энергетического распределения электронов и ионов в плазме. Уравнение Больцмана. Двучленное (лоренцево) приближение. Энергетическое распределение электронов в слабоионизованной плазме в электрическом поле. Влияние магнитного поля. Абсолютная и дифференциальная проводимость плазмы; изменение ее знака. Убегание электронов. Распределение ионов в плазме по скоростям.

### 5. Излучение в плазме

Излучение в линиях. Фоторекомбинация электронов и ионов. Тормозное излучение при рассеянии заряженных частиц друг на друге и на нейтральных частицах.

Естественное уширение. Доплеровское уширение. Столкновительное уширение. Влияние микрополей в плазме.

### 6. Низкотемпературная плазма в природе и лаборатории. Ее приложения.

Плазма Солнца. Атмосферное электричество. Молния и другие разряды в атмосфере.

Газовый разряд: тлеющий разряд, несамостоятельный разряд, дуга, корона, искра, разряд в электромагнитных волнах. Пучковая плазма. Фотоплазма. Лазеры, плазмохимия, источники света, микроэлектроника, плазменные двигатели, МГД генераторы, сварка, нанесение покрытий, плазменная аэродинамика, плазменная медицина.

### **Основная литература**

1. Райзер Ю.П., Физика газового разряда. Долгопрудный: Издательский дом Интеллект, 2009. - 736 с.
2. Смирнов Б.М., Свойства газоразрядной плазмы. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2010. – 363 с.
3. Энциклопедия низкотемпературной плазмы, под ред. В.Е. Фортова, М.: Наука, 2000 - 2008.
4. Морозов А.И., Введение в плазмодинамику, М.: Физматлит, 2006. – 576 с.

### **Дополнительная литература**

1. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т., Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982. - 376 с.
2. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т., Физика неидеальной плазмы, М.: Физматлит, 2004. - 528 с.
3. Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров С.А., Основы физики плазмы, Санкт-Петербург: Лань, 2011. - 448 с.

### **Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)**

Сон Э.Е. Учебно-методическое пособие «Лекции по физической механике», Долгопрудный: Изд. МФТИ, 2002. – 103 с.

### **Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины**

Успешное освоение курса требует посещения лекций и напряжённой самостоятельной работы студента. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы,
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях,
- подготовку к практическим занятиям, зачёту.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднениях в изучении отдельных тем следует обращаться за консультациями к лектору.

## **ПЕРЕЧЕНЬ ТИПОВЫХ КОНТРОЛЬНЫХ ВОПРОСОВ**

Аттестация по дисциплине «Введение в физику низкотемпературной плазмы» осуществляется в устной форме.

### **Перечень контрольных вопросов:**

1. Формула Саха.

2. Потенциал Дебая-Хюккеля.
3. Неидеальность плазмы. Параметры неидеальности. Энергия электростатического взаимодействия в плазме.
4. Уравнение состояния слабоионизованной плазмы.
5. Снижение потенциала ионизации в неидеальной плазме.
6. Гидродинамическое описание плазмы. Модель проводящей среды (жидкости).
7. Гидродинамическое описание плазмы. Модель двух жидкостей.
8. Параметр Холла. Проводимость плазмы в магнитном поле.
9. Течение вязкой проводящей среды в канале (течение Гартмана).
10. Столкновения частиц. Следствия законов сохранения энергии и импульса.
11. Условия справедливости классического описания столкновения частиц.
12. Понятие сечения столкновения. Классическая теория рассеяния.
13. Формула Резерфорда. Транспортное сечение рассеяния заряженных частиц.
14. Рассеяние ионов на атомах. Поляризационное взаимодействие. Резонансная перезарядка.
15. Релаксация импульса электронов в слабоионизованной плазме (характерные частота и длина релаксации).
16. Релаксация энергии электронов в слабоионизованной плазме (характерные частота и длина релаксации).
17. Процессы ионизации.
18. Процессы рекомбинации заряженных частиц.
19. Образование и разрушение отрицательных ионов.
20. Проводимость плазмы в гидродинамическом приближении в постоянном и переменном электрических полях.
21. Диэлектрическая проводимость плазмы. Распространение электромагнитных волн в плазме. Полное отражение волн от плазмы.
22. Вклад электронов в коэффициенты диффузии, вязкости и теплопроводности плазмы. Соотношение Эйнштейна.
23. Амбиполярная диффузия. Условие амбиполярности диффузии плазмы.
24. Условия неравновесности распределения электронов по скоростям в слабоионизованной плазме.
25. Уравнение Больцмана. Двучленное приближение (приближение Лоренца).
26. Скорость дрейфа электронов в кинетическом и гидродинамическом описаниях.
27. Распределение электронов по скоростям в слабоионизованной плазме в случае упругих столкновений с нейтральными частицами.
28. Убегание электронов.
29. Функция распределения ионов по скоростям в электрическом поле в случае резонансной перезарядки.
30. Изменение знака дифференциальной и абсолютной подвижности (проводимости) электронов.
31. Излучение и поглощение света в слабоионизованной плазме. Элементарные процессы.
32. Механизмы уширения спектральных линий.
33. Ионизация в различных типах газового разряда. Тлеющий разряд, несамостоятельный разряд, дуга, корона, искра, молния.
34. Приложения низкотемпературной плазмы.

## Примеры билетов

### Билет №1

1. Процессы ионизации. Понятие константы скорости элементарного процесса.

2. Оценить пространственный масштаб нарушения квазинейтральности плазмы при  $n_e = 10^{12} \text{ см}^{-3}$  и  $T = 1 \text{ эВ}$ .

Билет №2

1. Проводимость плазмы в гидродинамическом приближении в постоянном и переменном электрических полях.
2. Оценить параметр неидеальности  $\Gamma$  в равновесной плазме цезия (потенциал ионизации 4 эВ) при  $T = 0.5 \text{ эВ}$  и  $p = 10 \text{ атм}$ .

Билет №3

1. Релаксация энергии электронов в слабоионизованной плазме (характерные частота и длина релаксации).
2. Оценить столкновительное и штарковское уширение линии с длиной волны 340 нм, излучаемой молекулой  $N_2$  в слабоионизованной плазме молекулярного азота с  $n_e = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e = 1 \text{ эВ}$  и  $T = 300 \text{ К}$ .