

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное**  
**учреждение высшего образования**  
**«Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова»**

Кафедра теоретической физики

УТВЕРЖДАЮ

Декан физического факультета  
  
И.С. Огнев  
(подпись)

23 мая 2023 года

**Рабочая программа дисциплины**

«Кинетические уравнения в замагниченной среде»

программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре

по научной специальности 1.3.3 Теоретическая физика

Форма обучения очная

Программа одобрена  
на заседании кафедры теоретической физики  
от «17» апреля 2023 года, протокол № 8

Ярославль

### 1. Цели освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины является изучение методов теоретического описания и исследования кинетического уравнения Больцмана во внешней активной среде в различных приближениях; изучение эффектов, возникающих за счет поправок к уравнению Больцмана в сильном магнитном поле.

### 2. Место дисциплины в структуре программы аспирантуры

Данная дисциплина является дисциплиной по выбору.

### 3. Планируемые результаты освоения дисциплины: -

В результате освоения дисциплины аспирант должен:

#### Знать:

– основные процессы, влияющие на установление теплового равновесия в немагнитной и магнитной плазме.

#### Уметь:

– выводить уравнение Больцмана в диффузионном приближении;  
– выводить уравнение Компанейца в немагнитной среде;  
– выводить уравнение Компанейца в магнитной среде;  
– находить релятивистские поправки к уравнению Компанейца.

#### Владеть навыками:

– решения задач формирования спектров излучения в условиях немагнитной среды;  
– решения задач формирования спектров излучения в условиях магнитной среды.

### 4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетные единицы, 108 акад. часов.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	С е м е с т р	Виды учебных занятий и их трудоемкость (в академических часах)					Формы текущего контроля успеваемости  Форма промежуточной аттестации
			лек ции	пра кти чес кие	лаб ора тор ные	кон сул ьта ции	сам ост о я те ль н ая раб ота	
1	Уравнение Больцмана в диффузионном приближении	2	2	1		0	23	Задания для самостоятельной работы
2	Уравнение Компанейца в немагнитной среде	2	2	1			23	Задания для самостоятельной работы
3	Дисперсионные свойства частиц в сильном магнитном поле	2	2	2			23	Задания для самостоятельной работы
4	Уравнение Компанейца в сильном магнитном поле	2	2	2			23	Задания для самостоятельной работы

	<b>Всего 108 час.</b>		<b>8</b>	<b>6</b>		<b>2</b>	<b>92</b>	
--	-----------------------	--	----------	----------	--	----------	-----------	--

### Содержание разделов дисциплины:

#### **Тема 1. Уравнение Больцмана в диффузионном приближении**

Уравнение Фоккера-Планка.

Слабо ионизованный газ в электрическом поле.

Флуктуации в слабо ионизованном неравновесном газе.

Рекомбинация и ионизация.

#### **Тема 2. Уравнение Компанейца в немагнитной среде**

Коэффициент поглощения фотона за счет комптоновского рассеяния в нерелятивистском приближении.

Уравнения Компанейца. Время установления теплового равновесия. Учет тормозного излучения. Эффект Сюняева-Зельдовича.

Релятивистские поправки к уравнению Компанейца. Учет малого отклонения от состояния теплового равновесия газа электронов.

#### **Тема 3. Дисперсионные свойства частиц в сильном магнитном поле**

Поляризационный оператор фотона в сильном магнитном поле и его аналитические свойства.

Собственные значения и собственные векторы поляризационного оператора фотона в сильном магнитном поле. Нормальные моды.

Закон дисперсии фотона в сильном магнитном поле.

#### **Тема 4. Уравнение Компанейца в сильном магнитном поле**

Коэффициенты поглощения фотонов различных поляризаций за счет комптоновского рассеяния в сильном магнитном поле.

Система уравнений Больцмана в сильно замагниченной плазме в нерелятивистском приближении. Аналог уравнения Компанейца.

Комптонизация в сильном магнитном поле. Приложение к физике магнитаров.

Комптоновское рассеяние в случае резонанса. Поправки к уравнению Компанейца в сильном магнитном поле.

Учет процессов, изменяющих число частиц. Расщепления и слияние фотонов.

#### **5. Образовательные технологии, в том числе технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

**Вводная лекция** – дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Дается краткий обзор курса, история развития науки и практики, достижения в этой сфере, имена известных ученых, излагаются перспективные направления исследований. На этой лекции высказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой литературы.

**Академическая лекция с элементами лекции-беседы** – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Элементы лекции-беседы обеспечивают контакт преподавателя с аудиторией, что позволяет привлекать внимание аспирантов к наиболее важным темам дисциплины, активно вовлекать их в учебный процесс, контролировать темп изложения учебного материала в зависимости от уровня его восприятия.

**Практическое занятие** – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков по закреплению полученных на лекции знаний.

**Консультации** – вид учебных занятий, являющийся одной из форм контроля самостоятельной работы аспирантов. На консультациях по просьбе аспирантов рассматриваются наиболее сложные разделы дисциплины, преподаватель отвечает на вопросы аспирантов, которые возникают у них в процессе самостоятельной работы.

В процессе обучения используются следующие технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии:

**Электронный учебный курс «Кинетические уравнения в замагниченной среде» в LMS Электронный университет Moodle ЯрГУ**, в котором:

- представлены задания для самостоятельной работы аспирантов по темам дисциплины;
- представлен список литературы, рекомендуемой для освоения дисциплины;
- представлена информация о форме и времени проведения консультаций по дисциплине в случае их проведения в дистанционном формате в режиме онлайн.

## **6. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (при необходимости), рекомендуемых для освоения дисциплины**

### **а) основная литература**

1. Tanaka S.J., Asano K., Terasawa T., Avalanche Photon Cooling by Induced Compton Scattering: Higher-Order Kompaneets Equation. PTEP, 2015, no. 7, P. 073E01; [arXiv:1505.06541](https://arxiv.org/abs/1505.06541) [astro-ph.HE].
2. Brown L.S., Preston D.L. Leading Relativistic Corrections to the Kompaneets Equation. Astropart. Phys., 2012, V. 35, P. 742-748; [arXiv:1201.5606](https://arxiv.org/abs/1201.5606) [astro-ph.CO].
3. Chistyakov M.V., Romyantsev D.A.. Electromagnetic Processes in Strongly Magnetized Plasma; [arXiv:0811.4530](https://arxiv.org/abs/0811.4530) [hep-ph].

### **б) дополнительная литература**

1. Биккин Х. М., Ляпилин И. И., Неравновесная термодинамика и физическая кинетика. – Екатеринбург : УрО РАН, 2009. 500 с.  
<http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/books/BikkinLyapilin2009ru.pdf>
2. Chistyakov M.V., Romyantsev D.A.. Compton effect in strong magnetic plasma. International Journal of Modern Physics. 2009, Vol. 24, P. 3995; <https://arxiv.org/abs/hep-ph/0609192>
3. Challinor A., Lasenby A.. Relativistic corrections to the Sunyaev-Zeldovich effect. The Astrophysical Journal, 1998, V. 499, P. 1.  
[http://esoads.eso.org/cgi-bin/nph-data\\_query?bibcode=1998ApJ...499...1C&db\\_key=AST&link\\_type=ABSTRACT&high=596ca39c8323977](http://esoads.eso.org/cgi-bin/nph-data_query?bibcode=1998ApJ...499...1C&db_key=AST&link_type=ABSTRACT&high=596ca39c8323977)
4. Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Теоретическая физика. В 10 томах. Т. 10. Физическая кинетика. - М.: Наука, 1979. 527 с  
[http://www.lib.uni-yar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=752851&cat\\_cd=YARSU](http://www.lib.uni-yar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=752851&cat_cd=YARSU)

### **в) ресурсы сети «Интернет» (при необходимости)**

Автоматизированная библиотечно-информационная система «БУКИ-NEXT»  
[http://www.lib.uni-yar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_find.php](http://www.lib.uni-yar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php)

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

Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного

процесса по дисциплине включает в свой состав специальные помещения:

- учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа;
- учебные аудитории для проведения практических занятий (семинаров);
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций,
- учебные аудитории для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы;
- помещения для хранения и профилактического обслуживания оборудования.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет».

Автор:

Профессор кафедры теоретической физики, д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_ Д.А. Румянцев

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины  
«Кинетические уравнения в замагниченной среде»**

**Оценочные материалы  
для проведения текущей и/или промежуточной аттестации  
аспирантов по дисциплине**

**1. Контрольные задания и (или) иные материалы,  
используемые в процессе текущего контроля успеваемости**

**Задания для самостоятельной работы к теме 1:**

1. Найти потенциал электрического поля, создаваемого покоящимся в плазме сторонним зарядом  $e$ .

**Задания для самостоятельной работы к теме 2:**

1. Определить коррелятор плотности в равновесном одноатомном газе в пренебрежении столкновениями.

**Задания для самостоятельной работы к теме 3:**

1. Определить коэффициент диффузии для примеси тяжелого газа в легком, предполагая скорости тяжелых частиц малыми по сравнению со скоростями легких.
2. С помощью уравнения Фоккера-Планка определить подвижность тяжелой частицы в легком газе.

**Задания для самостоятельной работы к теме 4:**

1. Найти скорость передачи энергии от электронов с температурой  $T_e T_e \gg m_e^2 m_e^2$  к ионам с температурой  $T_i T_i \gg M^2 M^2$ .
2. Найти электропроводность релятивистской лоренцевской плазмы.

**2. Список вопросов и (или) заданий для проведения промежуточной аттестации**

**Список вопросов к зачету:**

1. Уравнение Фоккера-Планка.
2. Слабо ионизованный газ в электрическом поле.
3. Флуктуации в слабо ионизованном неравновесном газе.
4. Рекомбинация и ионизация.
5. Коэффициент поглощения фотона за счет комптоновского рассеяния в нерелятивистском приближении.
6. Уравнения Компанейца. Время установления теплового равновесия. Учет тормозного излучения. Эффект Сюняева-Зельдовича.
7. Релятивистские поправки к уравнению Компанейца. Учет малого отклонения от состояния теплового равновесия газа электронов.
8. Поляризационный оператор фотона в сильном магнитном поле и его аналитические свойства.
9. Собственные значения и собственные векторы поляризационного оператора фотона в сильном магнитном поле. Нормальные моды.
10. Закон дисперсии фотона в сильном магнитном поле.
11. Коэффициенты поглощения фотонов различных поляризаций за счет комптоновского рассеяния в сильном магнитном поле.

12. Система уравнений Больцмана в сильно замагниченной плазме в нерелятивистском приближении. Аналог уравнения Компанейца.
13. Комптонизация в сильном магнитном поле. Приложение к физике магнитаров.
14. Комптоновское рассеяние в случае резонанса. Поправки к уравнению Компанейца в сильном магнитном поле.
15. Учет процессов, изменяющих число частиц. Расщепления и слияние фотонов.

## **2.1 Описание процедуры выставления оценки**

Зачет выставляется по результатам выполнения текущей самостоятельной работы и собеседования по вопросам к зачету.

Оценка «зачет» выставляется студенту, который владеет основным объемом знаний по программе дисциплины; знает основную терминологию данной области знаний; логически правильно излагает материал; отвечает на вопросы без существенных ошибок; владеет инструментарием дисциплины, умеет его использовать в решении стандартных (типовых) задач; способен самостоятельно применять типовые решения.

Оценка «незачтено» выставляется студенту, который не владеет основным объемом знаний по программе дисциплины; не знает основную терминологию данной области знаний; логически неправильно излагает материал; отвечает на вопросы с существенными ошибками; не владеет инструментарием дисциплины, не умеет его использовать в решении стандартных (типовых) задач; не способен самостоятельно применять типовые решения.