

## Рабочая программа дисциплины

### 1. Коллективные эффекты в физике плазмы и физике квантовых газов

#### 2. Лекторы.

2.1. к.ф.-м.н., ассистент, Андреев Павел Александрович, кафедра общей физики физического факультета МГУ, [andreevpa@physics.msu.ru](mailto:andreevpa@physics.msu.ru), 8-495-9391090.

#### 3. Аннотация дисциплины.

Физика плазмы, плазмоподобных сред и квантовых газов имеет дело с системами многих частиц. В этих областях разрабатываются аналитические модели для описания коллективных явлений. В предлагаемом учебном курсе обсуждаются наиболее популярные современные методы моделирования коллективных эффектов и их применения к аналитическому решению фундаментальных и современных проблем. В этом курсе рассматриваются метод цепочек Боголюбова, метод квантовой гидродинамики, методы построения замкнутого аппарата для различных классов физических систем, приводящие в частности к уравнению Власова, уравнению Гросса-Питаевского. Учебный курс состоит из шестнадцати лекций, посвященным теоретическим основам вышеперечисленных методов и их применению к конкретным задачам.

#### 4. Цели освоения дисциплины.

Овладеть базовыми теоретическими знаниями необходимыми для аналитического исследования свойств плазмоподобных сред и квантовых газов. Изучить наиболее распространенные и эффективные на сегодняшний день теоретические модели и области их применения.

#### 5. Задачи дисциплины.

Изучение теоретических основ наиболее эффективных методов построения моделей и аналитического описания основных коллективных эффектов в плазмоподобных средах и квантовых газах. Получение базовых знаний об области применения и точности различных теоретических подходов. Получение практических навыков решения простейших задач, допускающих аналитическое решение.

#### 6. Компетенции.

##### 7.1. Компетенции, необходимые для освоения дисциплины.

М-ПК-1

##### 7.2. Компетенции, формируемые в результате освоения дисциплины.

М-ОНК-1, М-ОНК-2, М-ИК-3, М-ПК-1, М-ПК-2, М-ПК-3, М-СПК-1, М-СПК-8

#### 7. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

В результате освоения дисциплины студент должен знать теоретические основы наиболее распространенных методов аналитического исследования свойств плазмоподобных сред и ультрахолодных квантовых газов и пределы их применимости; уметь самостоятельно выбрать адекватный метод решения конкретной научной задачи; владеть навыками работы с математическим аппаратом физических теорий, необходимыми для дальнейшего их изучения; иметь опыт деятельности в решении простейших задач, имеющих аналитическое решение.

#### 8. Содержание и структура дисциплины.

Вид работы	Семестр			Всего
			10	
<b>Общая трудоёмкость, акад. часов</b>			72	72
<b>Аудиторная работа:</b>			34	34
Лекции, акад. часов			17	17
Семинары, акад. часов			17	17
Лабораторные работы, акад. часов			-	-
<b>Самостоятельная работа, акад. часов</b>			38	38
<b>Вид итогового контроля (зачёт, зачёт с оценкой, экзамен)</b>			экзамен	экзамен

N раз- дела	Наименование раздела	Трудоёмкость (академических часов) и содержание занятий			Форма текущего контроля	
		Аудиторная работа				Самостоятельная работа
		Лекции	Семинары	Лабораторные работы		
1	Общие принципы моделирования плазмоподобных сред	1 час. Примеры коллективных эффектов. Методы их описания: гидродинамические и кинетические методы моделирования. Связь между гидродинамическими и кинетическими уравнениями: метод Грэда. Микроскопическая теория коллективных эффектов: цепочки Боголюбова, уравнение Власова, интеграл столкновений Ландау	1 час. Применение микроскопических концентрации и функции распределения по Климантовичу и их обобщения к прямому выводу гидродинамики из микроскопической динамики по Кузьменкову		2 часа. Работа с лекционным материалом. Решение задач на вывод уравнений гидродинамики из кинетического уравнения.	Об, Оп
2	Волновые эффекты в плазмоподобных средах	1 час. Вырожденный электронный газ: уравнение состояния в равновесном состоянии и в режиме малых отклонений от положения равновесия.	1 час. Нулевой звук в вырожденном Ферми газе и Ферми жидкости.		2 часа. Работа с лекционным материалом. Решение задач на вывод уравнения состояния для давления в двумерном электронном газе.	ДЗ, Об, Оп
		1 час. Основные коллективные процессы в плазмоподобных средах: ионный звук, ленгмюровские волны, электромагнитные волны в плазме, поверхностные волны.	1 час. Волны в двумерном электронном газе. Особенности спектра электрон-позитронной (электрон-дырочной) плазмы.		3 часа. Работа с лекционным материалом. Решение задач на влияние вида уравнения состояния на спектры коллективных возмущений.	
		1 час. Уравнения гидродинамики в цилиндрических и сферических координатах. Уравнения состояния электронов на цилиндрической и сферической поверхностях.	1 час. Спектры коллективных возбуждений вырожденных электронов на цилиндрической и сферической поверхностях.		2 часа. Работа с лекционным материалом. Решение задач на вывод квантового потенциала Бома и квантовых сил инерции.	
3	Метод квантовой гидродинамики	1 час. Метод квантовой гидродинамики. Вывод основных уравнений для спин-1/2 фермионов в кулоновском взаимодействии.	1 час. Гамильтониан Брейта для электрон-электронного взаимодействия, его особенности для электрон-позитронного взаимодействия: спин-орбитальное взаимодействие, дарвиновский член, аннигиляционное взаимодействие. Неполнота потенциала Бома для многочастичных систем.		3 часа. Работа с лекционным материалом. Сравнение гамильтониана Брейта с слаборелятивистским пределом уравнения Дирака. Преобразование Фолди- Ваутхойзена.	ДЗ, Об, Оп
		1 час. Гидродинамические завихренность и	1 час. Спиновые структуры.		2 часа. Работа с лекционным материалом.	

		<i>спиральность в системах частиц со спином следуя работам Такабаяси.</i>			<i>Решение задач на тему исследования минимума энергии при заданной спиральности.</i>	
<b>4</b>	Спиновые эффекты в волновых процессах в плазмоподобных средах	<i>1 час. Уравнение состояния для давления частично поляризованных фермионов. Независимое рассмотрение электронов с спином вверх и электронов с спином вниз, как две различные жидкости.</i>	<i>1 час. Уравнение состояния для тепловой части спинового тока.</i>		<i>3 часа. Работа с лекционным материалом. Решение задач на статистические свойства поляризованных фермионов в двумерных системах и вывод уравнения состояния для спинового тока.</i>	ДЗ, Об, Оп
		<i>1 час. Спектр возбуждений в замагниченной квантовой плазме частиц с спином: спиновые волны.</i>	<i>1 час. Вклад спина в ленгмюровские волны. Вклад спинового тока в спектр поперечных волн.</i>		<i>2 часа. Работа с лекционным материалом. Решение задач на вычисление вклада потенциала Бома, аномального магнитного момента и аннигиляционного взаимодействия в спектр спиновых волн.</i>	
		<i>1 час. Спин-электрон акустические волны.</i>	<i>1 час. Слабонелинейные эффекты, метод Крылова-Боголюбова-Митропольского в применении к гидродинамическим задачам.</i>		<i>2 часа. Работа с лекционным материалом. Решение задач на применение метода Крылова-Боголюбова-Митропольского.</i>	
		<i>1 час. Поверхностные спин-электрон акустические волны. Линейное взаимодействие волн.</i>	<i>1 час. Поверхностные плазмоны и спелноны в спин поляризованных средах и их линейное взаимодействие.</i>		<i>2 часа. Работа с лекционным материалом. Гамильтониан системы спелнонов и анализ электрон-спелнонного взаимодействия.</i>	
<b>5</b>	Методы моделирования квантовых газов	<i>1 час. Атомарный конденсат Бозе-Эйнштейна с короткодействующим взаимодействием. Применение метода квантовой гидродинамики к выводу уравнения Гросса-Питаевского.</i>	<i>1 час. Спектр Боголюбова. Спектр Ландау для сверхтекучего гелия. Ротоны и максоны. Двухжидкостная модель сверхтекучей жидкости при конечной температуре.</i>		<i>2 часа. Работа с лекционным материалом. Решение задач на вычисление температуры Бозе конденсации и числа частиц в основном состоянии.</i>	ДЗ, Об, Оп
		<i>1 час. Ультрахолодные газы точечных электрических и магнитных диполей.</i>	<i>1 час. Спектр коллективных возбуждений в системе дипольных квантовых газов.</i>		<i>3 часа. Работа с лекционным материалом. Вывод связи уравнений Максвелла с потенциалами диполь-дипольных взаимодействий.</i>	
<b>6</b>	Коллективные эффекты в квантовых газах	<i>1 час. Вклад конечного радиуса ионов и атомов в модели и свойства плазмы и Бозе газа.</i>	<i>1 час. Применение квазипотенциалов к взаимодействию частиц конечного размера.</i>		<i>2 часа. Работа с лекционным материалом. Сравнение вкладов конечного радиуса частиц с вкладом потенциала Бома в спектре ионо-звуковых волн.</i>	ДЗ, Об, Оп

	<p><i>1 час.</i>  <i>Бозе атомы в магнитных и оптически-дипольных ловушках. Уравнение Гросса-Питаевского и спектр в квазидвумерных и квазиодномерных ловушках. Динамика БЭК в двойных потенциальных ямах: аналог двухуровневой системы.</i></p>	<p><i>1 час.</i>  <i>Атомы в оптических решетках, сверхпроводящая фаза и изолятор. Моделирование твердых тел посредством атомов в оптических ловушках. Модель Бозе-Хаббарда, и расширенная модель Бозе-Хаббарда.</i></p>		<p><i>2 часа.</i>  <i>Работа с лекционным материалом. Решение задач на применение метода сильной связи.</i></p>	
	<p><i>1 час.</i>  <i>Солитоны в конденсате Бозе-Эйнштейна в режиме сильной нелинейности: яркий и темный солитоны.</i></p>	<p><i>1 час.</i>  <i>Яркоподобный солитон в Бозе конденсате с отталкивающим взаимодействием в третьем порядке по радиусу взаимодействия: метод масштабирования переменной.</i></p>		<p><i>3 часа.</i>  <i>Работа с лекционным материалом. Нахождение решения уравнения Гросса-Питаевского в виде серого солитона в конденсате Бозе-Эйнштейна.</i></p>	
	<p><i>1 час.</i>  <i>Вихревые структуры, солитоны с отличным от нуля моментом импульса.</i></p>	<p><i>1 час.</i>  <i>Гидродинамическая модель системы многих сонаправленных вихрей.</i></p>		<p><i>2 часа.</i>  <i>Работа с лекционным материалом. Рассмотрение коллективных эффектов в системе вихрей.</i></p>	

## 9. Место дисциплины в структуре ООП ВПО

1. Дисциплина по выбору.
2. Вариативная часть, профессиональный блок, модуль "Специальные дисциплины по выбору".
3. Дисциплина входит в модуль "Специальные дисциплины по выбору", входящего в профессиональный блок вариативной части ООП ВПО. Дисциплина является теоретическим базисом к овладению современными методами аналитического расчета физических свойств плазмopodobных сред и ультрахолодных квантовых газов. Дисциплина дополняет дисциплины из ООП, посвященные квантовой физике, физике конденсированного состояния, физике магнитных явлений.
  - 3.1. Дисциплины и практики, которые должны быть освоены для начала освоения данной дисциплины:
    - дисциплины "Математический анализ", "Линейная алгебра", "Дифференциальные уравнения", "Интегральные уравнения и вариационное исчисление" из блока Б-ОН базовой части ООП ВПО,
    - дисциплины "Введение в квантовую физику", "Методы математической физики", "Квантовая теория" из блока Б-ПРОФ базовой части ООП ВПО.
  - 3.2. Дисциплины и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:

Научно-исследовательская работа из блока "Научно-исследовательская работа" и выпускная квалификационная работа по направлению "Физика" из блока "Итоговая государственная аттестация".

## 10. Образовательные технологии

Образовательные технологии, используемые при реализации различных видов учебной работы и дающие наиболее эффективные результаты освоения дисциплины:

- дискуссии,
- консультации
- преподавание дисциплин в форме авторских курсов по программам, составленным на основе результатов исследований научных школ МГУ,

## 11. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

Текущая аттестация проводится еженедельно. Критерии формирования оценки – посещаемость занятий, активность студентов на лекциях, восприятие излагаемого материала, выполнение домашних заданий.

Полный перечень вопросов к экзамену:

Билет №1

Кинетическая модель плазмы. Нулевой звук в вырожденном Ферми газе.

Билет №2

Ионный звук, ленгмюровские волны, электромагнитные волны в плазме, поверхностные волны, волны в двумерном электронном газе. Особенности спектра электрон-позитронной плазмы.

Билет №3

Уравнения гидродинамики в цилиндрических и сферических координатах. Уравнения состояния и спектры коллективных возбуждений вырожденных электронов на цилиндрической и сферической поверхностях. Дисперсия ленгмюровских волн.

Билет №4

Вывод основных уравнений квантовой гидродинамики. Гамильтониан Брейта.

Билет №5

Гидродинамические завихренность и спиральность в системах частиц со спином. Спиновые структуры.

Билет №6

Уравнение состояния для давления частично поляризованных фермионов. Уравнение состояния для тепловой части спинового тока.

Билет №7

Спектр возбуждений в замагниченной квантовой плазме частиц с спином: спиновые волны, вклад спина в ленгмюровские волны.

Билет №8

Спин-электрон акустические линейные и слабонелинейные нелинейные волны. Метод Крылова-Боголюбова-Митропольского.

Билет №9

Поверхностные спин-электрон акустические волны. Линейное взаимодействие волн. Поверхностные плазмоны и спелтоны в спин поляризованных средах и их линейное взаимодействие.

Билет №10

Атомарный конденсат Бозе-Эйнштейна с короткодействующим взаимодействием. Применение метода квантовой гидродинамики к выводу уравнения Гросса-Питаевского.

Билет №11

Ультрахолодные газы точечных электрических и магнитных диполей. Спектр коллективных возбуждений в системе дипольных квантовых газов. Ротоны и максоны.

Билет №12

Вклад конечного радиуса ионов и атомов в модели и свойства плазмы и Бозе газа. Применение квазипотенциалов к взаимодействию частиц конечного размера.

Билет №13

Бозе атомы в магнитных и оптически-дипольных ловушках. Уравнение Гросса-Питаевского и спектр в квазидвумерных и квазиодномерных ловушках. Атомы в оптических решетках, сверхпроводящая фаза и изолятор. Модель Бозе-Хаббарда.

Билет №14

Солитоны в конденсате Бозе-Эйнштейна в режиме сильной нелинейности: яркий и темный солитоны. Яркоподобный солитон в Бозе конденсате с отталкивающим взаимодействием в третьем порядке по радиусу взаимодействия: метод масштабирования переменной.

Билет №15

Вихревые структуры, солитоны с отличным от нуля моментом импульса, гидродинамическая модель системы многих сонаправленных вихрей.

## 12. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

Основная литература

1. А.И. Ахиезер, и др., Электродинамика плазмы, М., Наука, 1974.
2. Ю.Л. Климонтович, Статистическая физика, М., Наука, 1982.
3. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Теоретическая физика. Статистическая физика ч.2, т.9. М., ФИЗМАТЛИТ, 2001.

Дополнительная литература

1. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, Теоретическая физика. Квантовая механика. т.3. М., Наука, 1989.
2. В.П. Силин, Введение в кинетическую теорию газов, М. Наука, 1971.
3. А. Ф. Александров, А.А. Рухадзе, Лекции по электродинамике плазмоподобных сред, М. Издательство Московского университета. Физический факультет МГУ, 1999.
4. А.А. Власов, Нелокальная статистическая механика, М., Наука, 1978.
5. Л. С. Кузьменков, Теоретическая физика. Классическая механика, М., Наука, 2015.

### Периодическая литература

1. Л. С. Кузьменков, С. Г. Максимов, Квантовая гидродинамика систем частиц с кулоновским взаимодействием и квантовый потенциал Бома, ТМФ **118**, 287 (1999).
2. Л. С. Кузьменков, С. Г. Максимов, В. В. Федосеев, Микроскопическая квантовая гидродинамика систем фермионов I, ТМФ **126**, 136 (2001).
3. В. Кон, Электронная структура вещества – волновые функции и функционалы плотности, УФН **172**, №3, стр. 337 (2002).
4. Л. П. Питаевский, Конденсация Бозе-Эйнштейна в магнитных ловушках. Введение в теорию, УФН **168**, 641 (1998).
5. F. Dalfovo, S. Giorgini, L. P. Pitaevskii, and S. Stringari, Theory of Bose-Einstein condensation in trapped gases, Rev. Mod. Phys. **71**, 463 (1999).
6. S. M. Mahajan and F. A. Asenjo, Vortical Dynamics of Spinning Quantum Plasmas: Helicity Conservation, Phys. Rev. Lett. **107**, 195003 (2011).
7. P. A. Andreev, Separated spin-up and spin-down quantum hydrodynamics of degenerated electrons: Spin-electron acoustic wave appearance, Phys. Rev. E **91**, 033111 (2015).
8. P. A. Andreev, L. S. Kuz'menkov, Problem with the single-particle description and the spectra of intrinsic modes of degenerate boson-fermion systems, Phys. Rev. A **78**, 053624 (2008).
9. М. А. Дрофа, Л. С. Кузьменков, Континуальный подход к системам многих частиц с дальним взаимодействием. Иерархия макроскопических полей и некоторые физические следствия, ТМФ **108**, 3 (1996).
10. T. Takabayasi, The vector representation of spinning particle in the quantum theory, I, Progr. Theor. Phys. **14**, 283 (1955).
11. S. Giorgini, L. Pitaevskii, S. Stringari, Theory of ultracold atomic Fermi gases, Rev. Mod. Phys. **80**, 1215 (2008).

### 13. Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Лекции по дисциплине проводятся в аудитории им. А.Н. Матвеева (комн. 4-30) физического факультета. Лекционная аудитория обеспечена проекционным оборудованием и компьютером.