

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
Д.А. Зубцов
10 декабря 2013 г.

ПРОГРАММА

по дисциплине: Основы современной физики: квантовая макрофизика
по направлению: 010900 «Прикладные математика и физика»
факультеты: ФОПФ, ФФКЭ, ФПФЭ, ФМХФ, ФАЛТ
кафедра: общей физики
курс: III
семестр: 6

Трудоёмкость: теор. курс: обязательная часть – 1 зач. ед.,
вариативная часть – 2 зач. ед.,
дополн. за сложность – 0 зач.ед.

физ. практикум: обязательная часть – 0 зач. ед., вариативная часть – 2 зач. ед.,
дополн. за сложность – 1 зач.ед.

лекции – 34 часа

Экзамен – 6 семестр

практические (семинарские)
занятия – 34 часа

Диф. зачёт – 6 семестр

лабораторные занятия –
34 часа

Самостоятельная работа –
2 часа в неделю

ВСЕГО ЧАСОВ – 102

Программу и задание составили:

д.ф.-м.н., проф. А.И. Морозов
д.ф.-м.н., проф. Ю.В. Петров
д.ф.-м.н., проф. Ю.М. Ципенюк
к.ф.-м.н., доц. А.О. Раевский

Программа принята на заседании кафедры общей физики 21 ноября 2013 г.

Заведующий кафедрой

А.В. Максимычев

Квантовая макрофизика

1. Кристаллические структуры твердых тел, трансляционная симметрия кристаллов, решетка Бравэ, элементарная и примитивная ячейки, ячейка Вигнера–Зейтца, базис. Рентгеновские и нейтронные методы исследования кристаллических структур, дифракция Брэгга–Вульфа, обратная решетка, брэгговские плоскости зона Бриллюэна. Типы связей в кристаллах: кулоновская (ионные кристаллы), обменное взаимодействие (атомные кристаллы), ван-дер-ваальсовская (молекулярные кристаллы), металлическая (металлы). Дефекты кристаллической решетки: точечные, линейные (дислокации), плоские, объемные.

2. Гармонические колебания одномерной решетки одинаковых атомов и решетки из чередующихся атомов двух сортов. Законы дисперсии, квазиимпульс, акустические и оптические моды колебаний атомов в кристаллах. Возбужденные состояния кристалла, гармонические колебания одномерной решетки одинаковых атомов, закон дисперсии, зона Бриллюэна. Акустические и оптические моды колебаний атомов в кристаллах. Дебаевское приближение для акустической ветви колебаний твердого тела, температура Дебая. Модель Эйнштейна для описания оптических ветвей колебаний твердого тела. Возбужденные состояния кристалла. Фононы как квазичастицы, аналогия с фотонами (фононный газ). Решеточная теплоемкость. Решеточная теплопроводность, процессы переброса. Неустойчивость одно- и двумерных решеток. Фотонные кристаллы.

3. Электроны в металлах, адиабатическое приближение. Модель свободных электронов. Характер распределения электронов по энергии при нуле температур, наличие максимальной энергии (энергия Ферми). Энергетическое распределение электронов при ненулевой температуре (распределение Ферми). Энергия Ферми и химпотенциал, температура вырождения. Электронная теплоемкость и ее температурная зависимость, соотношение с решеточной теплоемкостью.

4. Физическая причина появления зон разрешенных и запрещенных значений энергии, модели слабой и сильной связи. Расчет закона дисперсии в модели сильной связи. Качественное объяснение различия в электропроводности изоляторов, полупроводников и металлов. Объяснение сплошного спектра излучения твердых тел.

Понятие о ферми-жидкости, электроны как квазичастицы.

5. Динамика электронов проводимости в металлах. Электропроводность в модели Друде–Лоренца. Роль длины свободного пробега, квазиклассический характер динамики электронов проводимости в металлах, эффективная масса электронов. Взаимоотношение между электрон-электронными и электрон-фононными столкновениями. Электронная теплопроводность, температурная зависимость рассеяния электронов на фононах и примесях и

друг на друге. Правило Маттисена для электронов проводимости в металлах. Качественный вывод закона Блоха–Грюнайзена. Электронная теплопроводность. Качественное различие механизмов релаксации энергии и импульса электронов в процессах тепло- и электропроводности, закон Видемана–Франца.

6. Электронные и дырочные возбуждения в полупроводниках, эффективная масса, заряд дырок. Положение уровня Ферми в полупроводниках, фактор зоны, правило "рычага". Собственные и примесные полупроводники, донорные и акцепторные уровни, оценка энергии мелких примесных уровней. Температурная зависимость положения уровня Ферми в примесных полупроводниках.

7. Зависимость концентрации проводящих электронов от температуры. Электропроводность полупроводников. Подвижность носителей. Температурная зависимость времени релаксации электронов. Контактные явления в полупроводниках. Равенство химпотенциалов при равновесии. (p–n)-переход во внешнем электрическом поле. Выпрямляющие свойства (p–n)-перехода.

8. Сверхтекучесть жидкого гелия-4 и гелия-3. Квантовые возбуждения в сверхтекучей жидкости, закон дисперсии Ландау. Качественное объяснение отсутствия вязкости в сверхтекучем гелии. Явление сверхпроводимости, отличие сверхпроводника от идеального металла, эффект Мейсснера, лондонская глубина проникновения. Роль кристаллической решетки в явлении сверхпроводимости, изотоп-эффект, куперовское спаривание. Качественное подобие явлений сверхтекучести и сверхпроводимости как квантового явления в системе бозонов.

9. Длина когерентности, нулевой импульс пары, s-спаривание электронов. Связь длины когерентности с величиной сверхпроводящей щели. Величина щели в теории БКШ. Микроскопическое описание незатухающего сверхтока, критический импульс, критический ток и критическое магнитное поле. Квантование магнитного потока. Сверхпроводники I и II рода, понятие о вихрях магнитного потока, вихревая решетка, пиннинг. Первое и второе критические поля, оценки их величин. Высокотемпературные сверхпроводники, особенности их кристаллической структуры и физических свойств. Области практического использования и перспективы применения сверхпроводимости.

10. Эффект Ааронова–Бома. Мезоскопические явления, квантовые поправки к электропроводности. Низкоразмерные структуры, понятие о квантовых ямах, проволоках и точках. Двухмерный характер движения электронов в структурах металл-окисел-полупроводник (МОП-структура) и графене. Квантование Ландау. Эффект Холла в полупроводниках, холловское удельное сопротивление (постоянная Холла). Качественное рассмотрение целочисленного квантового эффекта Холла, квантовый эталон сопротивления.

11. Магнетизм веществ: диа-, пара- и ферромагнетики. Формула Ланжевена–Бриллюэна для описания намагничивания парамагнетиков. Парамагнетизм Паули и диамагнетизм Ландау. Квантовая природа ферромагнетизма. Закон Кюри–Вейсса. Возбуждения в спиновой системе ферромагнетиков. Классическое и квантовое описание спиновых волн. Закон 3/2 Блоха.

12. Вещество в экстремальных условиях: высокие температуры и давления, сильные электрические и магнитные поля. Нуклеосинтез, происхождение элементов и эволюция звезд, нейтронные звезды, черные дыры. Плазма в космосе и твердом теле, плазмоны. Метаматериалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ципенюк Ю.М.* Квантовая микро- и макрофизика. М.: Физматкнига., 2006.
2. *Гладун А.Д.* Строение вещества. Ч. 2. М.: МФТИ, 2010.
3. *Белонучкин В.Е., Заикин Д.А., Ципенюк Ю.М.* Основы физики. Т. 2. М.: Физматлит, 2007.
4. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т. 5. М.: Наука, 1986.
5. *Гольдин Л.Л., Новикова Г.И.* Введение в квантовую физику. М.: Наука, 1988.
6. *Крылов И.П.* Основы квантовой физики и строение вещества. М.: МФТИ, 1989.
7. *Киттель Ч.* Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

8. *Мейлихов Е.З.* Электроны и фононы в общей физике твердого тела. М.: МФТИ, 2005.
9. *Мейлихов Е.З.* Общая физика полупроводников. М.: МФТИ, 2006.
10. *Мейлихов Е.З.* Общая физика сверхпроводников. М.: МФТИ, 2003.
11. *Морозов А.И.* Физика твердого тела. Кристаллическая решетка. Фононы. М.: МИРЭА, 2010. (Сайт кафедры).
12. *Морозов А.И.* Физика твердого тела. Электроны в кристалле. Металлы. Полупроводники. Диэлектрики. Магнетики. Сверхпроводники. М.: МИРЭА, 2010. (Сайт кафедры).
13. *Петров Ю.В.* Введение в физику твердого тела. М.: МФТИ, 1999.
14. *Петров Ю.В.* Основы физики конденсированного состояния. М.: ИД «Интеллект», 2013.
15. *Ципенюк Ю.М.* Нулевые колебания. М.: МФТИ, 2011.
16. *Мейлихов Е.З.* Вектор-потенциал и эффект Ааронова–Бома. М.: МФТИ, 2009.

ЗАДАНИЕ ПО ФИЗИКЕ

для студентов 3-го курса 2, 4, 5, 6 и 8 факультетов
на весенний семестр 2013-2014 учебного года

№ сем.	Дата	Темы семинарских занятий	Задачи для решения:		
			на семинаре	дома	
				базовый курс	повышенный уровень
1	7–13 фев.	Структура и колебания кристаллических решёток.	2.1, 2.16, 2.19, Т.1	2.3, 2.20, 2.71, 2.77	Т.2, 2.72
2	14–20 фев.	Фононы. Модель Дебая.	2.23, 2.24, 2.31, 2.74	2.21, 2.58, 2.61, 2.75	2.47, 2.76
3	21–27 фев.	Решёточная теплоёмкость и теплопроводность.	2.40, 2.42, 2.54, 2.65	2.35, 2.52, 2.64, 2.68	2.34, 2.46
4	28 фев–6 мар.	Свободный электронный газ. Энергия Ферми. Теплоёмкость металлов	3.4, 3.5, 3.17, 3.22	3.18, 3.27, 3.44, 3.61	3.86, 3.95
5	7–13 мар.	Кинетика электронов в металле	3.65, 3.66, 3.74, 3.75	3.73, 3.76, 3.81, 3.88	3.77, Т.3
6	14–20 мар.	Зонный характер спектра электронов в твердых телах; поверхность Ферми	3.1, 3.36, 3.38, 3.43	3.34, 3.35, 3.85, 3.96	4.54
7	21–27 мар.	Контрольная работа			
8	28 мар. – 3 апр.	Сдача 1-го задания.			
9	4–10 апр.	Полупроводники	Т.4 4.12, 4.17, 4.43	4.9, 4.18, 4.26, 4.50	4.25, 4.49
10	11–17 апр.	Сверхпроводники.	5.19, 5.21, 5.23, 5.34	5.20, 5.22, 5.27, 5.32	4.39, 5.24
11	18–24 апр.	Низкоразмерные системы	3.87, 4.15, 4.16, 4.32	3.89, 4.33, 4.28, 4.31	4.51, Т.5
12	25 апр. – 1 мая	Магнетизм	6.69 (А) 6.148 (Г), Т.6	Т.7, Т.8, Т.9	6.60 (А), 6.251(Г)
13	2–8 мая	Вещество в экстремальных условиях	2.78, Т.10, Т.11	1.71, Т.12 6.72 (А), 6.141(Г).	6.261(Г), 3.24
14	9–15 мая	Сдача 2-го задания,			
15	16–22 мая	Зачет			

Примечание: Номера задач без букв соответствуют разделу «Строение вещества». Номера задач с буквой (А) – разделу «Атомная и ядерная физика», с буквой (Г) – разделу избранных задач ГОС экзаменов Сборника задач по общему курсу физики. Часть 3. Под ред. В.А. Овчинкина. М.: МФТИ. 2009.

Текстовые задачи

Т.1. Распространение продольных фононов вдоль главной диагонали элементарного куба в кристалле КВг хорошо описывается моделью двух-атомной одномерной цепочки. Найти скорость продольного звука, если минимальная частота оптических фононов в этом направлении составляет $\Omega_{\min} = 2,73 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$. Ребро элементарного куба (расстояние между ионами одноименного знака) составляет $2a = 6,6 \text{ \AA}$. В качестве периода цепочки следует брать расстояние между плоскостями одинаковых ионов, перпендикулярных главной диагонали куба.

Т.2. В приближении «ближайших соседей» закон дисперсии фононов $\omega(k)$ в зоне Бриллюэна является монотонно возрастающей функцией. При учете взаимодействия с соседями следующими за ближайшими это уже не всегда так. Например, в свинце в направлении [100] (вдоль ребра элементарного куба) частота фононов достигает максимума при $k_0 = 0,8k_{\text{Брил}}$, где $k_{\text{Брил}}$ — волновое число, соответствующее границе зоны Бриллюэна в этом направлении. Скорость продольного звука в этом направлении составляет $s = 2,2 \cdot 10^5 \text{ см/с}$. Используя модель одномерной цепочки, найти силовые постоянные для первых и вторых соседей. Свинец кристаллизуется в ГЦК-решетку с $d = 4,95 \text{ \AA}$. Период одномерной цепочки – это расстояние между соседними параллельными плоскостями, перпендикулярными направлению [100].

Т.3. Чистый образец из золота имеет при температуре $T = 295 \text{ К}$ удельное сопротивление $\rho = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Золото кристаллизуется в ГЦК-решетку с периодом $a = 4,1 \text{ \AA}$. Дебаевская температура золота $\theta = 197 \text{ К}$. Оценить по этим данным среднее (эффективное) сечение рассеяния электронов на фононах.

Т.4. При легировании кремния донорами с концентрацией $N_d = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, оказалось, что ток дырок при температуре $T = 600 \text{ К}$ уменьшился в $\gamma = 3$ раза по сравнению со случаем нелегированного образца. Найти долю ионизированных примесей при данной температуре, если эффективные массы электронов и дырок равны $m_n^* = 1,08m_0$ и $m_p^* = 0,56m_0$, ширина запрещенной зоны при данной температуре равна $E_g = 1,05 \text{ эВ}$. Подвижность дырок считать постоянной.

Т.5. Найти отношение электронной и решеточной теплоемкостей графена при низких температурах. Графен можно считать двумерным бесщелевым полупроводником с линейным законом дисперсии носителей тока $E(\vec{k}) = \pm \hbar c * k$, где \vec{k} – двумерный волновой вектор, $c = 108 \text{ см/с}$, знак «+» соответствует зоне проводимости, знак «-» – валентной зоне. В зоне Бриллюэна графена имеется два эквивалентных минимума закона дисперсии (две долины). Усредненная по двум поляризациям (продольной и поперечной) скорость звука в графене $s = 1,5 \cdot 10^6 \text{ см/с}$. Указание: воспользоваться

соотношением:
$$\int_0^{\infty} \frac{x^n}{e^x + 1} dx = \left(1 - \frac{1}{2^n}\right) \int_0^{\infty} \frac{x^n}{e^x - 1} dx.$$

Т.6. В феноменологической теории ферромагнетизма Вейсса на каждый магнитный атом (ион) действует эффективное магнитное поле $H_{\text{эф}} = \lambda M$, где λ – константа Вейсса, M – намагниченность кристалла. В то же время в квантовой теории Гайзенберга–Френкеля энергия взаимодействия атомов (ионов) выражается формулой $U_{\text{обм}} = -2J(\vec{S}_i; \vec{S}_j)$, где J – обменный интеграл, \vec{S}_i и \vec{S}_j – спины взаимодействующих атомов (ионов). Учитывая взаимодействие только с ближайшими n соседями и считая его одинаковым, найти связь константы Вейсса с обменным интегралом. Объем V , приходящийся на один атом (ион), считать заданным.

Т.7. В молекуле бензола C_6H_6 углеродные атомы образуют правильные шестиугольники (гексагоны) со стороной $a = 1,4 \text{ \AA}$. Волновая функция каждого «внешнего» электрона углеродного атома пронизывает все бензольное кольцо, что приводит к возникновению циркулирующего по кольцу тока. Оценить максимальный вклад этих электронов (когда все молекулы ориенти-

рованы одинаково) в диамагнитную восприимчивость жидкого бензола, плотность которого $\rho = 1,088 \text{ г/см}^3$.

Т.8. Магнитная восприимчивость жидкого ^3He выше температуры 1 К ведет себя точно по закону Кюри, т.е. $\chi \propto 1/T$. Вычислить величину восприимчивости ^3He при температуре $T = 2 \text{ К}$. Плотность ^3He при данной температуре равна $\rho = 0,07 \text{ г/см}^3$.

Т.9. Гетероструктура AlGaIn/GaN , охлажденная до температуры $T = 4 \text{ К}$, помещена в магнитное поле $B = 4 \text{ Тл}$. Оценить теплоемкость единицы поверхности двумерного электронного газа, если при $T = 0 \text{ К}$ полностью заполнен только один подуровень Ландау. Эффективная масса электронов равна $m^* = 0,16 m_0$, где m_0 – масса свободного электрона.

Т.10. Определить, при какой минимальной концентрации холодной нейтральной электрон-протонной плазмы может начаться «нейтронизация», т.е. образование нейтронов по реакции аналогичной К-захвату. Кинетической энергией продуктов реакции пренебречь.

Т.11. Найти радиус нейтронной звезды с массой M , равной двум массам Солнца, и температурой не выше $T = 10^9 \text{ К}$. Радиационным давлением пренебречь.

Т.12. Наивысшие давления, реализованные в экспериментальных исследованиях свойств вещества при экстремальных условиях, создавались с помощью делящихся веществ, которые подвергались мгновенному делению при воздействии мощной вспышки нейтронного излучения от подземного термоядерного взрыва. Оценить предельную величину давления, которое может возникнуть на границе блока металлического урана, все ядра которого под воздействием вспышки разделились. Считая, что вся выделившаяся энергия ушла в излучение, оценить температуру вещества непосредственно после деления. Будет ли она достаточной для полной ионизации вещества и каково при этом будет газокинетическое давление? Плотность урана $\rho = 19,1 \text{ г/см}^3$, среднюю энергию деления E принять равной 200 МэВ в расчёте на одно ядро.

ОТВЕТЫ К ТЕКСТОВЫМ ЗАДАЧАМ:

$$1. s = \Omega_{\min} \sqrt{\frac{M_K}{M_{Br} + M_K}} \frac{2a}{2\sqrt{3}} \approx 3 \cdot 10^5 \text{ см/с.}$$

$$2. \beta_1 = -4\beta_2 \cos\left(\pi \frac{k_0}{k_{\text{Брилл}}}\right) = 12,1 \cdot 10^3 \text{ дн/см,}$$

$$\beta_2 = \frac{M_{\text{Pb}} s^2}{d^2 \left(1 - \cos \pi \frac{k_0}{k_{\text{Брилл}}}\right)} = 3,78 \cdot 10^3 \text{ дн/см.}$$

$$3. \bar{\sigma} = \frac{2}{9(12\pi^2)^{1/3}} \frac{e^2 \rho a \theta}{\hbar T} = 6,6 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2.$$

$$4. \alpha = \frac{n_i}{N_d} \left(\gamma - \frac{1}{\gamma}\right) = 0,51, \text{ где}$$

$$n_i = 2,51 \cdot 10^{19} \left(\frac{m_n^*}{m_0}\right)^{3/4} \left(\frac{m_p^*}{m_0}\right)^{3/4} \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) = 1,9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}.$$

$$5. \frac{C_s}{C_{ph}} = 3 \left(\frac{s}{c^*}\right)^2 = 6,75 \cdot 10^{-4}.$$

$$6. \lambda = \frac{2nJV}{g^2 \mu_B^2}.$$

$$7. \chi = \frac{6\rho N_A e^2 a^2}{4\mu mc^2} = -6,9 \cdot 10^{-7}.$$

$$8. \chi = \frac{J(J+1)g_{sn}^2 \mu_{\text{эБ}}^2}{3k_B T} \frac{\rho}{\mu} N_A = 4,735 \cdot 10^{-9}.$$

$$9. C \approx 2n_s k_B \left(\frac{\mu_B B}{k_B T} \right)^2 \frac{\exp \frac{\mu_B B}{k_B T}}{\left(\exp \frac{\mu_B B}{k_B T} + 1 \right)^2} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ эрг}/(\text{К} \cdot \text{см}^2),$$

где $n_s = B/\Phi_0 = eB/hc$.

$$10. n = (p_F c / \hbar c)^3 / 3\pi^2 = 7,37 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-3}, \text{ где}$$

$$p_F c = \sqrt{(m_n - m_p)^2 - m_e^2} c^2 = 1,19 \text{ МэВ}.$$

$$11. R = \left(\frac{9\pi^2}{4} \right)^{2/3} \frac{\hbar^2}{GM^{1/3} m_n^{8/3}} = 9,8 \text{ км}.$$

$$12. P \cong \frac{\rho}{A} N_A E = 15,36 \cdot 10^{12} \text{ атм}, T = \left(\frac{3}{4} \frac{Pc}{\sigma} \right)^{1/4} = 2,8 \cdot 10^8 \text{ К} = 24 \text{ КэВ}$$

Усл. печ. л. 0.75 Тираж 350 экз.