Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

УТВЕРЖДЕНО
Проректор по учебной работе
и довузовской подготовке
А. А. Воронов
25 июня 2019 г.

ПРОГРАММА

по дисциплине: **Физика неравновесных процессов**

по направлению:
03.04.01 «Прикладные математика и физика»,
14.04.02 «Ядерные физика и технологии»,
16.04.01 «Техническая физика»

физтех-школа: **для всех физтех-школ, кроме ФЭФМ, ФПМИ**

кафедра: **теоретической физики**

курс: 1 (магистратура)

семестр: 1

Трудоемкость:

теор. курс: вариативная часть – 3 зачет. ед.

лекции – 30 часов

Экзамен – 1 семестр

практические (семинарские)
занятия – 30 часов

Курсовые и контрольные работы – 4

ВСЕГО АУДИТОРНЫХ ЧАСОВ — 60

Самостоятельная работа – 45 часов

Программу и задание составили к.ф.-м.н., доц.
Н. М. Щелкачев

Программа принята на заседании
кафедры теоретической физики
25 мая 2019 года

Заведующий кафедрой
д.ф.-м.н., профессор
Ю. М. Белоусов

Физика неравновесных процессов

А. Классическая теория

I. Математический аппарат. Случайные процессы. Марковские цепи. Обобщенные кинетические уравнения.

II. Кинетика электронов. Кинетическое уравнение Больцмана. Интеграл столкновений при рассеянии электронов на примесях в металле. Вычисление остаточного сопротивления. Термоэлектрические явления в металле и полупроводнике, диссипативная функция Рэлея, симметрия кинетических коэффициентов. Тензор электропроводности металла в магнитном поле. Эффект Холла.

III. Кинетика газов и жидкости. Кинетическое уравнение Больцмана для одноатомных газов. Свойства интеграла столкновений. Вывод уравнений гидродинамики. Законы сохранения и потоки энергии, энтропии, тензор плотности потока импульса. Равновесное и локально-равновесное распределение. Условие применимости гидродинамики. Теплопроводность и вязкость. Поглощение звука.

IV. Плазма. Уравнения Власова. Бесстолкновительная плазма. Диэлектрическая проницаемость. Затухание Ландау. Спектр плазмонов.

В. Квантовая кинетика

I. Неравновесная матрица плотности. Квантовое уравнение Лиувилля. Теория линейного отклика Кубо. Запаздывающая, причинная и опережающая функции Грина. Вывод кинетического уравнения для электронов, рассеивающихся на примесях.

II. Неравновесная нанофизика. Ток через квантовый точечный контакт. Квантование кондактанса. Эффект Ааронова–Бома. Двумерные электронные системы. Графен. Диффузионные квантовые проволоки, углеродные нанотрубки. Электронная фазовая когерентность. Слабая локализация, резонансное туннелирование. Одноэлектронное туннелирование. Кулоновская блокада. Случайные матрицы. Туннелирование и котуннелирование. Эффект Казимира. Наноплазмоника и метаматериалы. Спайзеры.

III. Неравновесные явления в сверхпроводящих контактах. Андреевское отражение. Контакты сверхпроводник – нормальный металл. Слабая связь между сверхпроводниками. Эффект Джозефсона и его приложения. Сквиды.

C. Кинетика зародышеобразования

Фазовые переходы первого рода. Метастабильные состояния и зародыши новой фазы. Классическая и квантовая кинетика образования зародышей в чистом веществе и в пересыщенном растворе. Теория коалесценции зародышей в растворе.

Литература

Основная

1. *Максимов Л.А., Полищук И.Я.* Лекции по физической кинетике: учеб. пособие. Москва : МФТИ, 2007.

2. *Колоколов И.В., Образовский Е.Г., Подивилов Е.Б.* Физическая кинетика. Москва : МФТИ-НГУ, 2010.

3. *Бурмистров С.Н.* Задачи по физической кинетике. – М. : Долгопрудный : ИД «Интеллект», 2016.

4. *Биккин Х.М., Ляпилин И.И.* Неравновесная термодинамика и физическая кинетика. Екатеринбург, 2009.

5. *Петруччионе Ф., Бройер Х.-П.* Теория открытых квантовых систем. – Москва–Ижевск : НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", Институт компьютерных исследований, 2010.

6. *Зайцев Р.О.* Введение в современную кинетическую теорию. Москва : УРСС, 2017.

7. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Статистическая физика. Ч. 1. – Москва : Наука, 1995.

8. *Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П.* Статистическая физика. Ч. 2. – Москва : Наука, 1978.

9. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Физическая кинетика. – Москва : Наука, 2001.

10. *Максимов Л.А., Ильин А.В.* Лекции по физической кинетике: учеб. пособие. – Москва : МФТИ, 1973.

11. *Горелкин В.Н., Минеев В.П.* Введение в физическую кинетику: учеб. пособие. – Москва : МФТИ, 1989.

12. *Горелкин В.Н., Минеев В.П.* Дополнительные главы физической кинетики: учеб. пособие.– Москва : МФТИ, 1990.

<u>*Дополнительная*</u>

1. *Максимов Л.А., Полищук И.Я.* Введение в термодинамику и кинетику диэлектрических стекол: учебно-метод. пособие. — Москва : МФТИ, 2005.

2. *Максимов Л.А., Полищук И.Я.* Введение в теорию фазовых переходов первого рода: учебно-метод. пособие. — Москва : МФТИ, 2005.

3. *Максимов Л.А., Полищук И.Я.* Элементы теории кинетики твердых тел.: учебно-метод. пособие. — Москва : МФТИ, 2005.

4. *Щелкачев Н.М., Лесовик Г.Б..* Одномерное рассеяние в квантовой механике и его приложения: учеб. пособие. – Москва : МФТИ, 2010.

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И ПОНЯТИЯ

1. Кинетика газа

Функция распределения $f(t, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{r})$:

$$\int f(t, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{r}) d\boldsymbol{v} = n(t, \boldsymbol{r}) \equiv n, \quad \int \boldsymbol{v} f(t, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{r}) d\boldsymbol{v} = n\langle \boldsymbol{v} = n\boldsymbol{V} = \boldsymbol{j}.$$

Среднее любой одночастичной величины $a(t, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{r})$:

$$\langle a \rangle = \frac{\int a(t, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{r}) f(t, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{r}) d\boldsymbol{v}}{f(t, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{r}) d\boldsymbol{v}}.$$

Тепловая скорость $\boldsymbol{u} = \boldsymbol{v} - \langle \boldsymbol{v} \rangle = \boldsymbol{v} - \boldsymbol{V}$.
Плотность внутренней энергии: $\epsilon = nm\langle u^2/2 \rangle$.
Плотность потока тепла: $\boldsymbol{Q} = nm\langle u^2 \boldsymbol{u}/2 \rangle$.
Тензор давлений: $\Pi_{ik} = nm\langle u_i u_k \rangle$.
Уравнение Больцмана:

$$\hat{L}f = \frac{\partial f}{\partial t} + v_i \frac{\partial f}{\partial x_i} + \frac{F_i}{m} \frac{f}{\partial v_i} = \hat{I}_{st} f,$$

$$\hat{I}_{st} = \iiint W(1, 2; 1', 2') \big[f(1') f(2') - f(1) f(2) \big] d\boldsymbol{v}_2 d\boldsymbol{v}'_1 d\boldsymbol{v}'_2 \, ;$$

$$\frac{\partial \langle na \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle n v_i a \rangle}{\partial x_i} = n\langle \hat{L} \rangle + \int a \hat{I}_{st} f \, d\boldsymbol{v}.$$

Субстанциональная производная:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \boldsymbol{V} \cdot \nabla = \frac{\partial}{\partial t} + V_i \frac{\partial}{\partial x_i} \,.$$

Гидродинамическая форма законов сохранения:

$$\frac{dn}{dt} = -\mathrm{div}\, \boldsymbol{V} \,,$$

$$\frac{dV_i}{dt} = -\frac{1}{mn}\frac{\partial \Pi_{ik}}{\partial x_k} + \frac{F_i}{m} \,,$$

$$\frac{d}{dt}\frac{mnu^2}{2} = -\mathrm{div}\, \boldsymbol{Q} - \Pi_{ik}\frac{\partial V_i}{\partial x_k} \,.$$

Локально-равновесная функция распределения:

$$f_0 = n\left(\frac{m}{2\pi T}\right)^{3/2} \exp\left[-\frac{m(\boldsymbol{v} - \boldsymbol{V})^2}{2T}\right] ,$$

$$\frac{n\langle u^2\rangle_0}{2} = \frac{3}{2}T, \quad \Pi^0_{ik} = nT\delta_{ik} \,.$$

Линеаризованное уравнение Больцмана: $f = f_0(1+\chi)$,

$$\hat{L}\ln f_0 = \iint \left[\chi(1') + \chi(2') - \chi(1) - \chi(2)\right] f_0(2)|\boldsymbol{v}_{12}|d\sigma d\boldsymbol{v}_2 \,,$$

$$\hat{L}\ln f_0 = \frac{m}{T}\left[u_i u_k - \delta_{ik}\frac{u^2}{3}\right]\frac{\partial V_i}{\partial x_k} + \left[\frac{mu^2}{2} - \frac{5}{2}\right]\frac{u_i}{T}\frac{\partial T}{\partial x_i} \,.$$

2. В тау-приближении для однокомпонентного газа:

$$\hat{I}_{st} f = -\frac{f - f_0}{\tau} \,, \quad f = f_0 - \tau \hat{L} f_0 \,,$$

$$\Pi_{ik} = nT\delta_{ik}\delta_{ik} - \eta\left[\frac{\partial V_i}{\partial x_k} + \frac{\partial V_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ik}\frac{\partial V_i}{\partial x_k}\right] ,$$

$$\boldsymbol{Q} = -\varkappa \nabla T, \quad \eta = nT\tau, \quad \varkappa = \frac{5}{2}\frac{nT\tau}{m} \,.$$

3. Тау-приближение для легких частиц в тяжелом газе:

$$\tau^{-1} = nv\sigma_{tr} = nv\pi\int\limits_0^\pi (1 - \cos\vartheta)\sigma(\vartheta)d\vartheta.$$

Фононный вклад в электропроводность металлов:

$$\sigma = \frac{Ne^2\tau_{tr}}{m} \sim \begin{cases} 1/T, & T \gg \Theta_D\,, \\ 1/T^5, & T \ll \Theta_D\,. \end{cases}$$

Число Лоренца и закон Видемана–Франца:

$$L = \frac{\varkappa}{\sigma T} = \frac{\mathrm{const}}{e^2}\,.$$

4. Общий вид потоков в гидродинамике

$$\boldsymbol{J} = \rho \boldsymbol{V} \quad \boldsymbol{Q} = -\varkappa \nabla T,$$

$$\Pi_{ik} = P\delta_{ik} - \eta\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_k} + \frac{\partial V_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ik}\frac{\partial V_l}{x_L}\right) - \zeta\delta_{ik}\mathrm{div}\,\boldsymbol{V}.$$

Скорость диссипации энергии в вязкой жидкости:

$$R = \frac{\eta}{2}\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_k} + \frac{\partial V_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ik}\frac{\partial V_l}{\partial x_l}\right)^2 + \zeta(\mathrm{div}\,\boldsymbol{V})^2 + \varkappa\frac{(\nabla T)^2}{T}\,.$$

Скорость звука и коэффициент поглощения звука в жидкости (газе):

$$u^2 = \big(\partial P/\partial\rho\big)_S\,, \quad \alpha = \left[\frac{4}{3}\eta + \zeta + \varkappa\left(\frac{1}{C_V} - \frac{1}{C_P}\right)\right]\frac{\omega^2}{2\rho u^3}\,.$$

Квантовое кинетическое уравнение

$$G = \begin{pmatrix} G^{--} & G^{-+} \\ G^{+-} & G^{++} \end{pmatrix}.$$

$$G^{-+}_{\alpha\beta}(\boldsymbol{r},t;\boldsymbol{r'},t') = i\langle\psi^+_\beta(\boldsymbol{r'},t')\psi_\alpha(\boldsymbol{r},t)\rangle,$$

$$G^{+-}_{\alpha\beta}(\boldsymbol{r},t;\boldsymbol{r'},t') = -i\langle\psi_\alpha(\boldsymbol{r},t)\psi^+_\beta(\boldsymbol{r'},t')\rangle,$$

$$G^{--}_{\alpha\beta}\boldsymbol{r},t;\boldsymbol{r'},t') = \theta(t-t')G^{+-}_{\alpha\beta}(\boldsymbol{r},t;\boldsymbol{r'},t') + \theta(t'-t)G^{-+}_{\alpha\beta}(\boldsymbol{r},t;\boldsymbol{r'},t'),$$

$$G^{++}_{\alpha\beta}(\boldsymbol{r},t;\boldsymbol{r'},t') = \theta(t-t')G^{-+}_{\alpha\beta}(\boldsymbol{r},t;\boldsymbol{r'},t') + \theta(t'-t)G^{+-}_{\alpha\beta}(\boldsymbol{r},t;\boldsymbol{r'},t')$$

Функция распределения:

$$n(t,\boldsymbol{R},\boldsymbol{p}) = -i\int G^{-+}_{\omega,\boldsymbol{p}}(t,\boldsymbol{R})\frac{d\omega}{2\pi}\,,$$

$$G^{-+}_{\omega,\boldsymbol{p}}(t,\boldsymbol{R}) = \int e^{i\omega t - i\boldsymbol{pr}}G^{-+}_{\omega,\boldsymbol{p}}\left(t+\frac{\tau}{2},\boldsymbol{R}+\frac{\boldsymbol{r}}{2};\,t-\frac{\tau}{2},\boldsymbol{R}-\frac{\boldsymbol{r}}{2}\right)d\boldsymbol{r}\,d\tau.$$

$$\left[\hat{G}_0(0,1)\right]^{-1}\hat{G}(1,2)=\hat{\tau}_3\delta(X_1-X_2)+\int\hat{\tau}_3\hat{\Sigma}(1,3)\hat{G}(3,2)d^4X_3\,.$$

Функция Грина для свободных и равновесных фермионов:

$$\hat{G}^{(0)}(\omega,\boldsymbol{p})=\begin{pmatrix}\frac{1-n_F(\xi_{\boldsymbol{p}})}{\omega-\xi_{\boldsymbol{p}}+i\delta}+\frac{n_F(\xi_{\boldsymbol{p}})}{\omega-\xi_{\boldsymbol{p}}-i\delta} & 2\pi n_F(\xi_{\boldsymbol{p}})\delta(\omega-\xi_{\boldsymbol{p}})\\ -2\pi i\big(1-n_F(\xi_{\boldsymbol{p}})\big)\delta(\omega-\xi_{\boldsymbol{p}}) & -\frac{1-n_F(\xi_{\boldsymbol{p}})}{\omega-\xi_{\boldsymbol{p}}-i\delta}-\frac{n_F(\xi_{\boldsymbol{p}})}{\omega-\xi_{\boldsymbol{p}}+i\delta}\end{pmatrix}.$$

Функция распределения Ферми: $n_F^{-1}(\xi_{\boldsymbol{p}})=\exp(-\xi_{\boldsymbol{p}}/T)+1$.

Формулы, предполагающиеся известными из предшествующих курсов

«Золотое» правило Ферми:

$$dW_{fi}=\frac{2\pi}{\hbar}|F_{fi}|^2\delta(E_i-E_f).$$

Формула Сохоцкого:

$$\frac{1}{x-i\delta}=P\frac{1}{x}+i\pi\delta(x).$$

Уравнения Максвелла:

$$\operatorname{div}\boldsymbol{D}=4\pi\rho,\quad \operatorname{div}\boldsymbol{B}=0,\quad \boldsymbol{D}=\boldsymbol{E}+4\pi\boldsymbol{P}.$$

$$\operatorname{rot}\boldsymbol{E}=-\frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t}\,,\quad \operatorname{rot}\boldsymbol{H}=\frac{4\pi}{c}\boldsymbol{j}+\frac{1}{c}\frac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t}\quad \boldsymbol{H}=\boldsymbol{B}+4\pi\boldsymbol{M}.$$

ЗАДАНИЕ 1

1. Мезоскопическая система с квантовым микроконтактом представляет собой два резервуара электронов, соединенных тонким проводящим каналом с поперечным размером и продольной длиной, много меньших длины свободного пробега. К резервуарам приложено напряжение. а) Используя представление вторичного квантования и подход Ландауэра, определить кондактанс микроконтакта в случае одного открытого канала. б)* Учесть, что в проводящем канале имеется рассеивающий центр с матрицей рассеяния S. с) Найти тепловой и дробовой шум [см. Н.М. Щелкачев, Г.Б. Лесовик, МФТИ, 2010].

2. Вычислить тензор проводимости $\sigma_{\alpha\beta}(\omega,B)$ вырожденного электронного газа в магнитном поле, используя τ-приближение. Предполагается, что слабое электрическое поле зависит от времени по

произвольному закону. Проверить выполнение принципа Онзагера для $\sigma_{\alpha\beta}(\omega, B)$. Найти выражение для $\sigma_{\alpha\beta}(t, B)$, где t – время, и показать, что $j_\alpha(t) = \int_{-\infty}^{t} \sigma_{\alpha\beta}(t-t', B) E_\beta(t') dt'$. Показать, что $j_\alpha = \sigma_{\alpha\beta} \otimes E_\beta$, где символ "$\otimes$" обозначает свертку.

3. Найти электрический ток и поток тепла в электронном газе в линейном приближении по электрическому полю и градиенту температуры. Найти кинетические коэффициенты в τ-приближении, предполагая, что газ вырожден. Вывести выражения для сопряженных сил, исходя из уравнения для производства энтропии. Убедиться в справедливости принципа Онсагера для кинетических коэффициентов. Получить соотношение Видемана–Франца [см. Биккин Х.М., Ляпилин И.И., Екатеринбург, 2009].

4. а) Используя подход Ландауэра и результаты задачи (1), выразить в общем случае поток тепла через функции распределения электронов в электродах. Определить величину кванта теплового кондактанса [http://arXiv.org/abs/cond-mat/0512609v1].
б) Найти тепловой кондактанс вторым способом, вычисляя поток энтропии и используя общую связь между потоком энтропии и потоком тепла в приближении линейного отклика [см. U. Sivan and Y. Imry, Phys. Rev. B **33**, 551 (1985)]. в) В квантовой механике можно ввести определение оператора плотности тока; существует ли квантовый оператор потока тепла (указание: вспомнить, как получается ток из теоремы Нетер...)?

5. Получить из уравнения Больцмана уравнение для потока импульса и найти тензор плотности потока импульса. Как изменится уравнение для потока импульса, если в τ-приближении учесть упругие столкновения на вмороженном беспорядке, как это делалось для электронного газа? Получить в гидродинамическом подходе проводимость Друде для металла.

6. Определить, какая часть тензора плотности потока импульса, который был найден в предыдущей задаче и выражен через функцию распределения, отвечает за вязкость. Найти коэффициент вязкости и температуропроводности одноатомного газа в τ-приближении. Сравнить коэффициенты температуропроводности и кинематической вязкости в τ-приближении. Вывести уравнение Навье–Стокса, учесть слагаемые, отвечающие за проводимость Друде.

7. а) Вычислить коэффициент диффузии тяжелого газа в легком. Получить соотношение Эйнштейна между подвижностью и коэффициентом диффузии. б) С помощью уравнения Фоккера–Планка определить подвижность тяжелой частицы в легком газе. с) Можно ли свести кинетическое уравнение со столкновительным членом типа Фоккера–Планка в импульсном пространстве к уравнению диффузии (Смолуховского) в реальном пространстве [параграф 6.2, Колоколов И.В., Образовский Е.Г., Подивилов Е.Б., МФТИ-НГУ, 2010]?

8. Модифицируем предыдущую задачу. Имеется плоская стенка, которая с небольшой скоростью движется через равновесный газ фермионов. Столкновения фермионов со стенкой носят зеркальный характер. Найти силу сопротивления, испытываемою стенкой. То же самое сделать для бозонов. Рекомендуется перед решением этих задач вспомнить определение тензора плотности потока импульса и обсудить его физический смысл. Как изменится решение задачи, если стенка является полупроницаемой мембраной, т.е. с вероятностью $D < 1$ частица может проходить сквозь стенку? Обсудить случай диффузного отражения от стенки.

ЗАДАНИЕ 2

1. В модели Калдейры–Леггетта частица массой M находится в потенциале $U_0(q)$ и взаимодействует с внешней средой–термостатом, который представляет собой бесконечный набор $\{\alpha\}$ фононов с частотами ω_α. Гамильтониан среды:

$$H_m = \sum_\alpha \left(\frac{m\dot{x}_\alpha^2}{2} + \frac{m\omega_\alpha^2 x_\alpha^2}{2} \right).$$

Сила, действующая на частицу со стороны каждого фонона, пропорциональна отклонению от равновесия, и потенциал взаимодействия равен

$$U = \sum_\alpha q C_\alpha x_\alpha \, .$$

Спектральная плотность фононных колебаний определяется как

$$J(\Omega) = \frac{\pi}{2} \sum_\alpha \frac{C_\alpha^2}{m\omega_\alpha} \delta(\Omega - \omega_\alpha).$$

Предполагая $J(\Omega) = \eta\Omega$, исключить переменные среды и найти эффективное уравнение движения частицы в среде, коэффициент трения, случайную силу и коррелятор случайной силы.

Проверить, что спектральная плотность коррелятора случайной силы соответствует флуктуационно-диссипационной теореме [Белоусов Ю.М., Бурмистров С.Н., Тернов А.И. Задачи по теоретической физике. – Долгопрудный : ИД «Интеллект», 2016].

2. Неравновесные состояния ферми-жидкости описываются функцией распределения квазичастиц, зависящей от координат, импульсов и времени. При нулевой или достаточно низкой температуре столкновения квазичастиц настолько редки, что ими можно полностью пренебречь. Пользуясь кинетическим уравнением для функции распределения, определить условие, когда возможно распространение волн бесстолкновительного нуль-звука, и его скорость. Считать, что функция Ландау для взаимодействия квазичастиц не зависит от импульсов квазичастиц [Белоусов Ю.М., Бурмистров С.Н., Тернов А.И. Задачи по теоретической физике. – Долгопрудный : ИД «Интеллект», 2016].

3. а) Вычислить тензор диэлектрической проницаемости бесстолкновительной плазмы. Найти закон дисперсии поперечных колебаний в плазме. Описать затухание Ландау. б)* Найти закон дисперсии поперечных колебаний в плазме, используя метод функций Грина, вычислив соответствующий поляризационный оператор и исследовав полюса экранированного взаимодействия. Сравнить ответ с (а) [Л.С. Левитов, А.В. Шитов, Физматлит, 2002].
с)* В графене, представляющем собой монослой графита, найти продольную диэлектрическую проницаемость и дисперсию продольных плазменных колебаний–плазмонов [Белоусов Ю.М., Бурмистров С.Н., Тернов А.И. Задачи по теоретической физике. – Долгопрудный : ИД «Интеллект», 2016].

4. Частица массой M в метастабильном состоянии отделена потенциальным барьером, который удовлетворяет условию квазиклассичности, и вероятность распада настолька мала, что частица все время находится в термодинамическом равновесии с температурой T. Найти зависимость скорости распада метастабильного состояния с экспоненциальной точностью. Выразить ответ в терминах эффективного (евклидова) действия, определенного для движения частицы в инвертированном потенциале. Определить температуру, при которой термоактивационный механизм распада сменяется квантовым режимом распада [Белоусов Ю.М., Бурмистров С.Н., Тернов А.И. Задачи по теоретической физике. – Долгопрудный : ИД «Интеллект», 2016].

5. Выразить (аномальную) холловскую проводимость через кривизну Берри, используя формулы Кубо. Вывести выражение для друдевской проводимости металла и проводимость в пределе высоких частот, используя формулу Кубо.

6. а) Найти вклад в проводимость металла от электрон-фононного взаимодействия. Рассмотреть не только предел низких и высоких температур по сравнению с температурой Дебая, но и получить общую интегральную формулу. б) Обсудить эффекты Иоффе–Регеля.

7. а) Решить уравнение Линдблада для эволюции матрицы плотности двухуровневой системы, где релаксационный член описывает потери на спонтанную эмиссию (естественная ширина спектральной линии). б) Пусть теперь релаксационный член описывает дефазировку, что измениться в решении, какая фаза сбивается? с) Рассмотреть теперь некогерентную накачку в качестве линдбладиана. д) Рассмотреть задачу (а), но с дополнительными членами в уравнении Линдблада, соответствующими когерентной накачке. Вывести уравнения Блоха. Найти форму спектральной линии. Что такое молловский триплет?

8. а) Найти среднеквадратичное отклонение броуновской частицы, исходя из уравнения Ланжевена. Найти временной коррелятор скоростей броуновской частицы. Получить соответствующее уравнение Фоккера–Планка. б) Показать, что в жидкости коэффициент самодиффузии в общем случае интегрально выражается через временной коррелятор скорости частиц. с) Исходя из качественного анализа решений уравнения Навье–Стокса, показать, что временной коррелятор скорости частиц в жидкости или плотном газе имеет неэкспоненциальную, как в модельной задаче (а), а универсальную степенную асимптотику на больших временах: $\propto 1/t^{d/2}$, где d – это размерность пространства. Можно ли определить коэффициент самодиффузии в двумерной однокомпонентной жидкости?

Срок проведения 1-й контрольной работы и сдачи 1-го задания
14.10–19.10.2019 г.

Срок проведения 2-й контрольной работы и сдачи 2-го задания
02.12–07.12.2019 г.

Подписано в печать 25.06.2019. Формат 60×84 $^1/_{16}$.
Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,7. Тираж 90 экз. Заказ № 212.
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
Тел. (495) 408-58-22, e-mail: rio@mipt.ru

Отдел оперативной полиграфии «Физтех-полиграф»
141700, Моск. обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
Тел. (495) 408-84-30, e-mail: polygraph@mipt.ru