

Поглощение ультразвука и электрон- фононный теплообмен в грязных проводниках за счет релаксации типа Мандельштама-Леонтовича

А.В. Штык, М.В. Фейгельман, В.Е. Кравцов

ИТФ им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Россия

МФТИ, Долгопрудный, Россия

ICTP, Trieste

arXiv:1303.4936

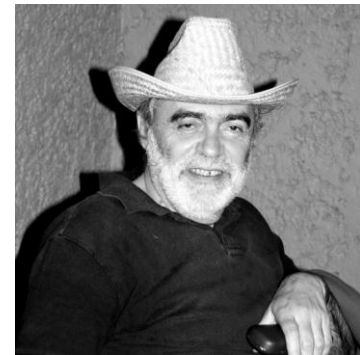
25.06.2013, Landau Days

Поглощение ультразвука и электрон- фононный теплообмен в грязных проводниках за счет релаксации типа Мандельштама-Леонтовича



А.В. Штык, М.В. Фейгельман, В.Е. Кравцов

ИТФ им. Л.Д. Ландау, Черногоровка, Россия
МФТИ, Долгопрудный, Россия
ICTP, Trieste



arXiv:1303.4936

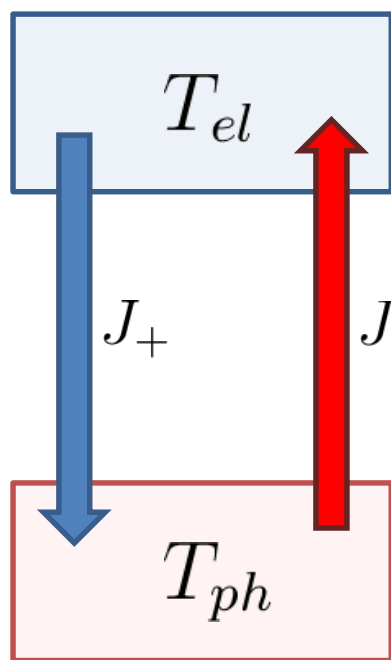
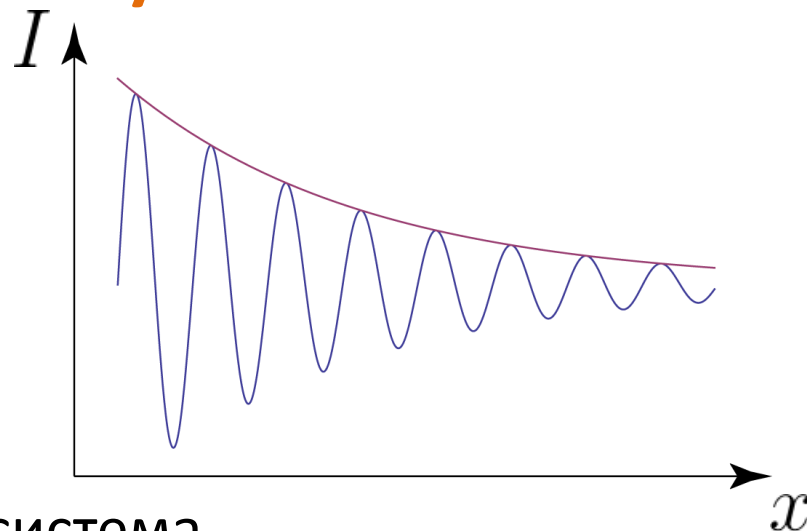
25.06.2013, Landau Days

Основные результаты

- I. Связь интенсивности поглощения ультразвука и электрон-фононного(ЭФ) теплообмена, справедливая при **любой** силе перегрева и электрон-электронного взаимодействия
- II. Релаксация типа Мандельштама-Леонтовича(МЛ). Ее примеры:
 - зарядовый канал при неидеальной экранировке
 - открытие спинового канала магнитным полем

Поток тепла + поглощение ультразвука

$$I \sim \text{Exp}[-2\kappa x], \quad \kappa = (s\tau_{ph})^{-1}$$



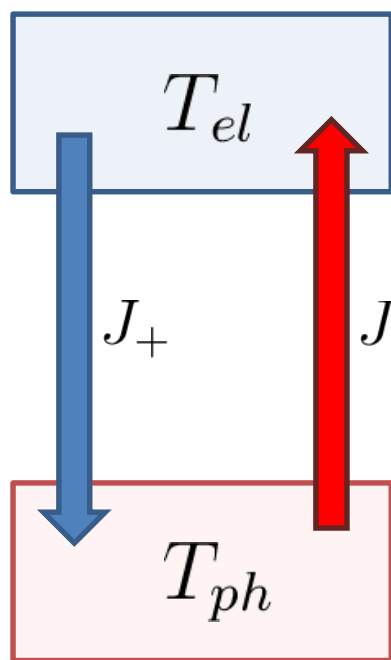
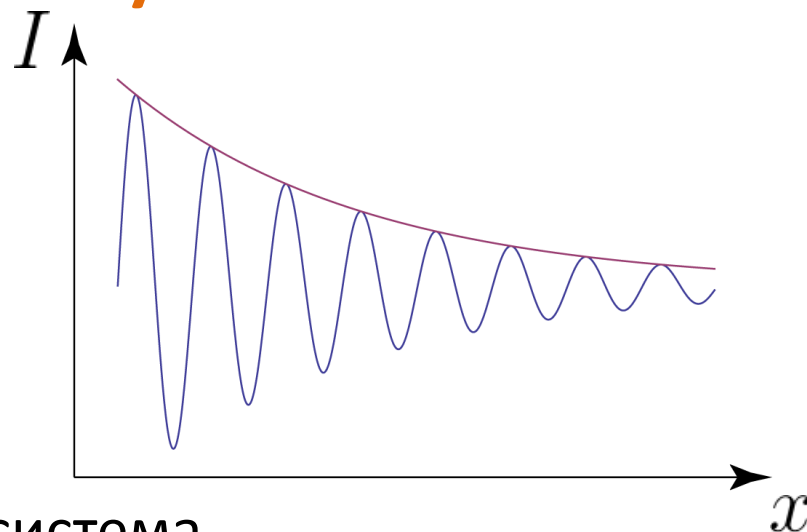
Электронная подсистема

Фононная подсистема (решетка)

$$\mathcal{J} = -\frac{dE_{el}}{dt} = -C_e \frac{dT_{el}}{dt}$$

Поток тепла + поглощение ультразвука

$$I \sim \text{Exp}[-2\kappa x], \quad \kappa = (s\tau_{ph})^{-1}$$

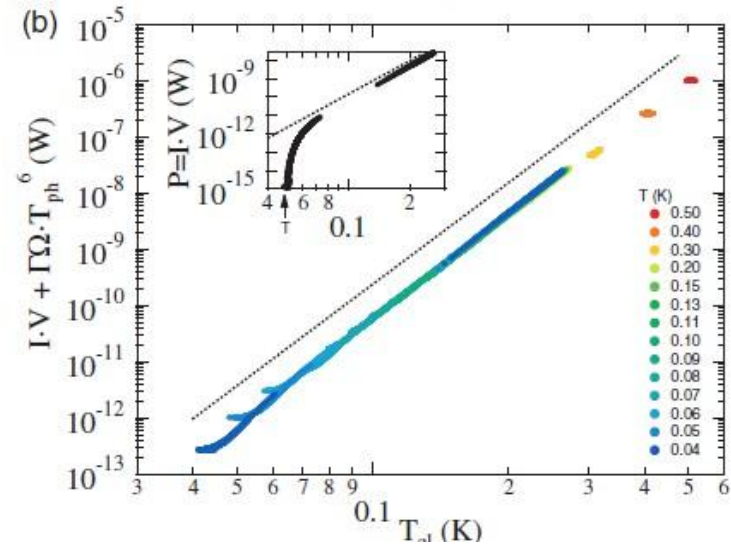
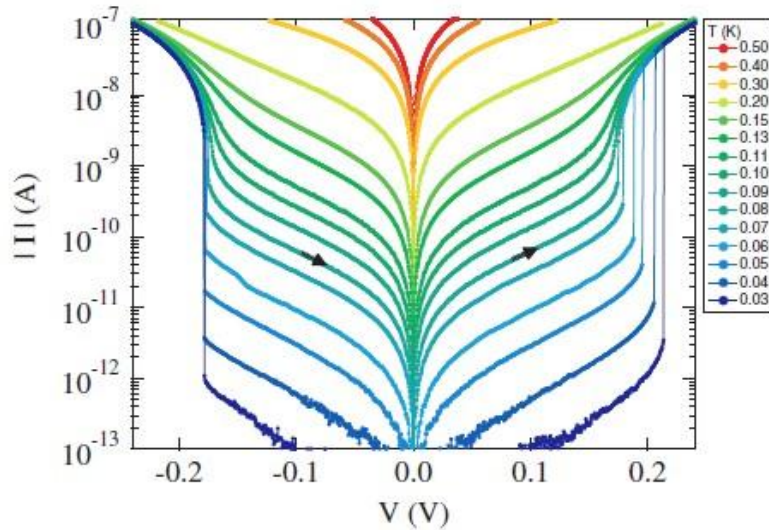


Электронная подсистема

$$\mathcal{J} = -\frac{dE_{el}}{dt} = -C_e \frac{dT_{el}}{dt}$$

Фононная подсистема (решетка)

Зачем?



M. Ovadia, B. Sacepe, and D. Shahar (2009).

B. L. Altshuler, V. E. Kravtsov, I.V. Lerner, and I.L. Aleiner (2009)

$$\mathcal{J} = \alpha(T_{el}^6 - T_{ph}^6)$$

Константа электрон-фононного взаимодействия α

отличается на 2-3 порядка от теоретических предсказаний !

- I. Связь интенсивности поглощения ультразвука и электрон-фононного(ЭФ) теплообмена, справедливая при **любой** силе перегрева и электрон-электронного взаимодействия
- II. Релаксация типа Мандельштама-Леонтовича(МЛ). Ее примеры:
 - зарядовый канал при неидеальной экранировке
 - открытие спинового канала магнитным полем

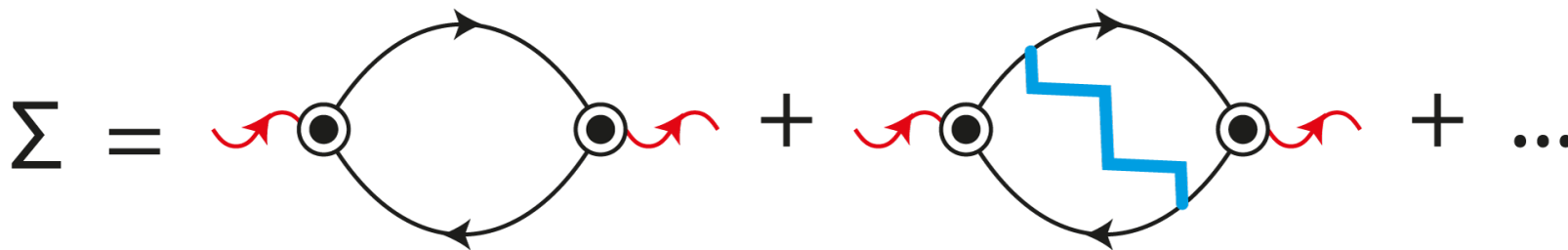
Поток тепла + поглощение ультразвука

$$D^R = \frac{1}{\rho_m(\omega^2 - s^2q^2) - \Sigma^R},$$

$$\Sigma^R = \Sigma^R(\omega, \mathbf{e}_q, T_{el})$$

Обратное время жизни фонона:

$$\tau_{ph}^{-1} = \frac{1}{\rho_m \omega} [\text{Im} \Sigma^R(\omega, q)]_{\omega=sq} = \tau_{ph}^{-1}(\omega, \mathbf{e}_q, T_{el})$$



Поток тепла + поглощение ультразвука

Кинетическое уравнение
в Келдышевском формализме:

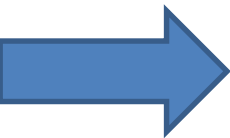
$$\tau_{ph}^{-1} = \frac{1}{\rho_m \omega} [\text{Im} \Sigma^R(\omega, q)]_{\omega=sq}$$

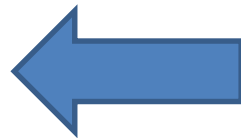
$$[D_0^{-1}, F] = \Sigma^K - \Sigma^R \circ F - F \circ \Sigma^A, \quad F = \coth(\omega/2T)$$

В предположении квазиравновесности релаксации температуры,
 $\tau_{e-ph}^{-1} \gg \tau_{el-el}^{-1}$, имеем $\Sigma^K = F(\omega, T_{el})(\Sigma^R - \Sigma^A)$

$$\partial_t B(\omega, T_{ph}(t)) = \frac{B(\omega, T_{el}) - B(\omega, T_{ph})}{\tau_{ph}(\omega, T_{el})}$$

$$\int_0^{\infty} (\nu_{ph}(\omega) d\omega) \omega [\dots] \quad \mathcal{J}$$



$$\mathcal{J} = \int_0^{\infty} (\nu_{ph}(\omega) d\omega) \frac{\omega}{\tau_{ph}(\omega, T_{el})} [B(\omega, T_{el}) - B(\omega, T_{ph})]$$


Возможно явно выделить входящий и исходящий потоки:

$$\mathcal{J}(T_{el}, T_{ph}) = J_+(T_{el}) - J_-(T_{ph}, T_{el})$$

$$J_+(T_{el}) = \int_0^{\infty} (\nu_{ph}(\omega) d\omega) \frac{\omega}{\tau_{ph}(\omega, T_{el})} B(\omega, T_{el}), \quad \tau_{ph}^{-1} \sim T^\beta, \quad J(T_{el}) \propto T_{el}^{4+\beta}$$

$$J_-(T_{ph}, T_{el}) = \int_0^{\infty} (\nu_{ph}(\omega) d\omega) \frac{\omega}{\tau_{ph}(\omega, T_{el})} B(\omega, T_{ph})$$

Квантовыми эффектами взаимодействия мы интересоваться не будем и ситуация упрощается:

$$J_- = J_-(T_{ph}), \quad J_-(T) = J_+(T) = J(T)$$

- I. Связь интенсивности поглощения ультразвука и электрон-фононного(ЭФ) теплообмена, справедливая при любой силе перегрева и электрон-электронного взаимодействия
- II. Релаксация типа Мандельштама-Леонтовича(МЛ). Ее примеры:
- зарядовый канал при неидеальной экранировке
 - открытие спинового канала магнитным полем

Релаксация типа МЛ

$$\begin{cases} \partial_t n^{(i)} + \operatorname{div} \mathbf{j}^{(i)} = 0, \\ \mathbf{j}^{(i)} = -D \nabla n^{(i)} - \kappa_i \mathbf{F}^{(i)}, \end{cases} \quad U^{(i)} = \int \mathcal{V}_0(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \sum_j \delta n^{(j)}(\mathbf{r}') + \Gamma^{(i)} \operatorname{div} \mathbf{u}$$

$$n^{(i)} = -\Pi^{(i)}(\omega, q) (\Phi^{(i)} - \Phi_C(\omega, q))$$

$$\Pi^{(i)}(\omega, q) = \frac{\kappa^{(i)} q^2}{-i\omega + D^{(i)} q^2}, \quad \Phi^C = \frac{V_0(q) \sum_i \Pi^{(i)} \Phi^{(i)}}{1 + V_0(q) \sum_i \Pi^{(i)}}$$

Релаксация типа МЛ

Затухание ультразвука можно выразить через диссипацию:

$$\tau_{ph}^{-1} = \frac{Q_t}{E_w}$$

$$Q_t = \frac{1}{2} \sum_i \Re (\mathbf{j}^{(i)} \cdot \mathbf{F}^{*(i)}), \quad E_w = \frac{\rho_m}{2} \omega^2 u_m^2$$

$$\tau_{ph}^{-1} = \frac{q^2}{\rho_m \omega} \sum_i \Gamma_s^{(i)} \text{Im} [\Pi^{(i)}] (\Gamma_s^{(i)})^*$$

$$(\Gamma_s = [\Phi^{(i)} - \Phi_C(\omega, q)] / \text{div} \mathbf{u})$$

Релаксация типа МЛ

Затухание ультразвука можно выразить через диссипацию:

$$\tau_{ph}^{-1} = \frac{Q_t}{E_w}$$

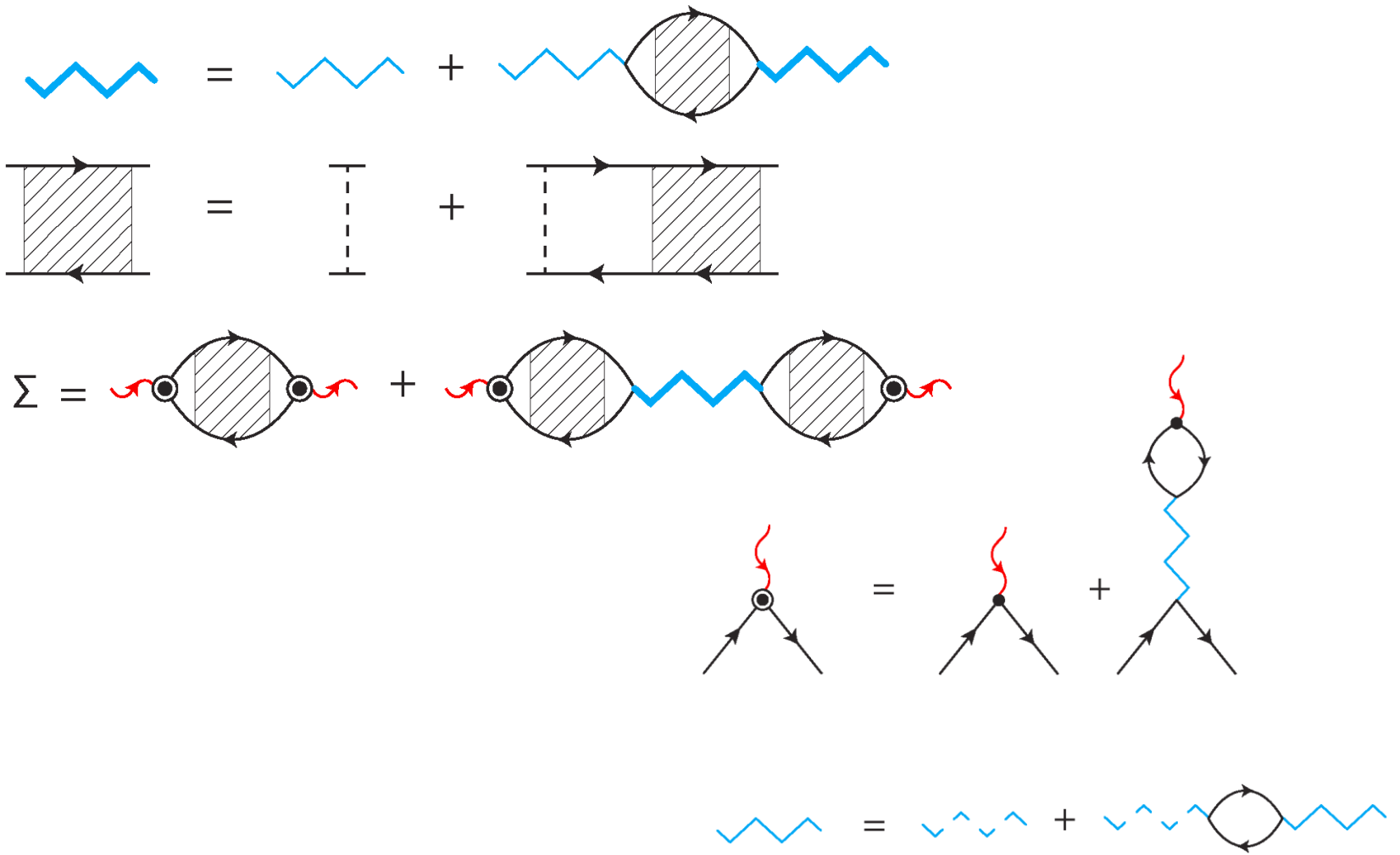
$$Q_t = \frac{1}{2} \sum_i \Re (\mathbf{j}^{(i)} \cdot \mathbf{F}^{*(i)}), \quad E_w = \frac{\rho_m}{2} \omega^2 u_m^2$$

$$\tau_{ph}^{-1} = \frac{q^2}{\rho_m \omega} \sum_i \Gamma_s^{(i)} \text{Im} [\Pi^{(i)}] (\Gamma_s^{(i)})^*$$

$$(\Gamma_s = [\Phi^{(i)} - \Phi_C(\omega, q)] / \text{div} \mathbf{u})$$

Затухание может быть интенсивным, если фононам удастся возбудить электронные диффузные моды

Релаксация типа МЛ



- I. Связь интенсивности поглощения ультразвука и электрон-фононного(ЭФ) теплообмена, справедливая при любой силе перегрева и электрон-электронного взаимодействия
- II. Релаксация типа Мандельштама-Леонтовича(МЛ). Ее примеры:
- зарядовый канал при неидеальной экранировке
 - открытие спинового канала магнитным полем

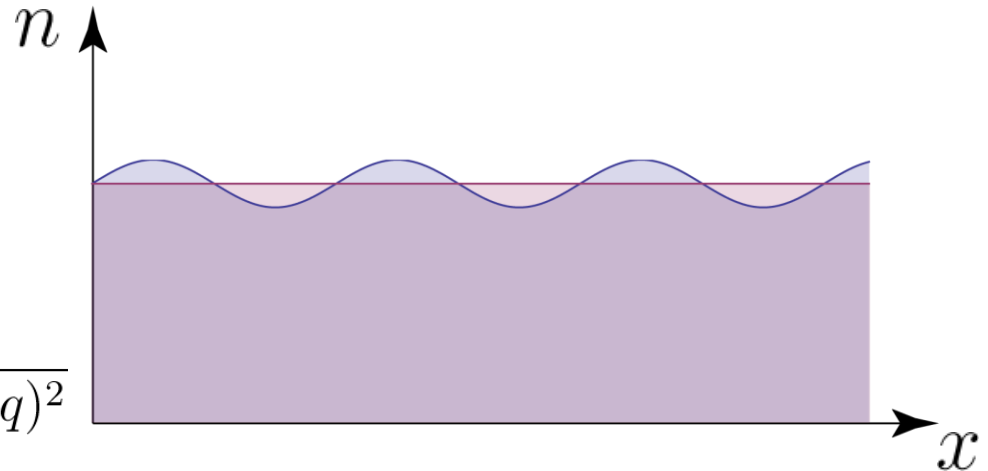
Релаксация типа МЛ. Слабый Кулон

Неидеальность экранировки разрешает флуктуации зарядовой плотности.

$$\Gamma_s = \Gamma - \frac{2V_0\Pi\Gamma}{1 + 2V_0\Pi}$$

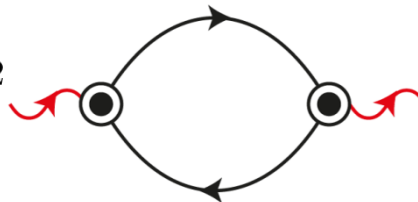
$$V_0(q) = 2\pi e^2/q\varepsilon(q)$$

$$\tau_{ph}^{-1} = \frac{\Gamma^2}{\rho_m} \frac{2\nu_0 Dq^2}{s^2 + (2\nu_0 V_0 + 1)^2 (Dq)^2}$$



$$\mathcal{F}(q, \theta) = \left(\frac{\tau_{ph}^{-1}}{(\tau_{ph}^{-1})^{(0)}} \right) = \frac{(\Gamma/p_F v_F)^2 \sin^2 \theta}{(s/v_F)^2 + g_{\square}^2 (e^2/\varepsilon(q \sin \theta) v_F)^2 \sin^2 \theta}$$

$$\frac{1}{\tau_{ph}^{(0)}(q)} = \frac{\nu_0 p_F^2}{2\rho_m} Dq^2 \sim \frac{m n_e}{\rho_m} Dq^2$$



Релаксация типа МЛ. Слабый Кулон

$$\mathcal{F}_{C_{2D}} = 1 + \frac{4}{g_{\square}^2} \left(\frac{\varepsilon v_F}{e^2} \right)^2 \left(\frac{\Gamma}{p_F v_F} \right)^2, \quad J_{C_{2D}} = \frac{1}{g_{\square}} \frac{2\pi^3 p_F^2}{63\hbar^6 \rho_m v_s^5} \left(\frac{\varepsilon \hbar v_F}{e^2} \right)^2 \left(\frac{\Gamma}{p_F v_F} \right)^2 T^6$$

$$V(q) = 2\pi e^2 / \varepsilon q (1 - e^{-qb}), \quad \mathcal{F}_{C_{2D+gate}} = 1 + \frac{4(\Gamma/p_F v_F)^2 \sin^2 \theta}{(s/v_F)^2 + (q^2 l^2)(4\pi \nu e^2 b / \varepsilon)^2 \sin^4 \theta},$$

$$\omega_{cross1} \sim s/b$$

$$\mathcal{F}_{C_{2D+gate}} = 1 + \frac{4(\Gamma/p_F v_F)^2 \sin^2 \theta}{(s/v_F)^2 + (q^2 l^2)(4\pi \nu e^2 b / \varepsilon)^2 \sin^4 \theta},$$

$$J_{C_{2D+gate}} = \frac{1}{g_{\square}} \frac{\pi p_F^4}{240\hbar^6 \rho_m v_s^3 k_F^2 b^2} \left(\frac{\varepsilon \hbar v_F}{e^2} \right)^2 \left(\frac{\Gamma}{p_F v_F} \right)^2 T^4 \ln \frac{T}{T_C^{(1)}}$$

$$\omega_{cross2} \sim \frac{1}{p_F l} \frac{1}{p_F b} \left(\frac{s}{v_F} \right)^2 \left(\frac{\varepsilon v_F}{e^2} \right) E_F$$

$$\mathcal{F}_{C_{2D+gate}} = 1 + 4 \frac{v_F^2}{s^2} \left(\frac{\Gamma}{p_F v_F} \right)^2 \sin^2 \theta, \quad J_{C_{2D+gate}} = g_{\square} \frac{2\pi^3 \Gamma^2}{63\hbar^6 \rho_m v_s^7} T^6$$

$$J_0 = g_{\square} \frac{2\pi^3 p_F^2}{189\hbar^6 \rho_m v_{s,t}^5} T^6$$

- I. Связь интенсивности поглощения ультразвука и электрон-фононного(ЭФ) теплообмена, справедливая при любой силе перегрева и электрон-электронного взаимодействия
- II. Релаксация типа Мандельштама-Леонтовича(МЛ). Ее примеры:
- зарядовый канал при неидеальной экранировке
 - открытие спинового канала магнитным полем

Релаксация типа МЛ. Зееман(...)

МП включает в игру флуктуации «спиновой» плотности

$$\hat{\Gamma}_{bare} = \begin{pmatrix} \Gamma_1 & \\ & \Gamma_2 \end{pmatrix}$$

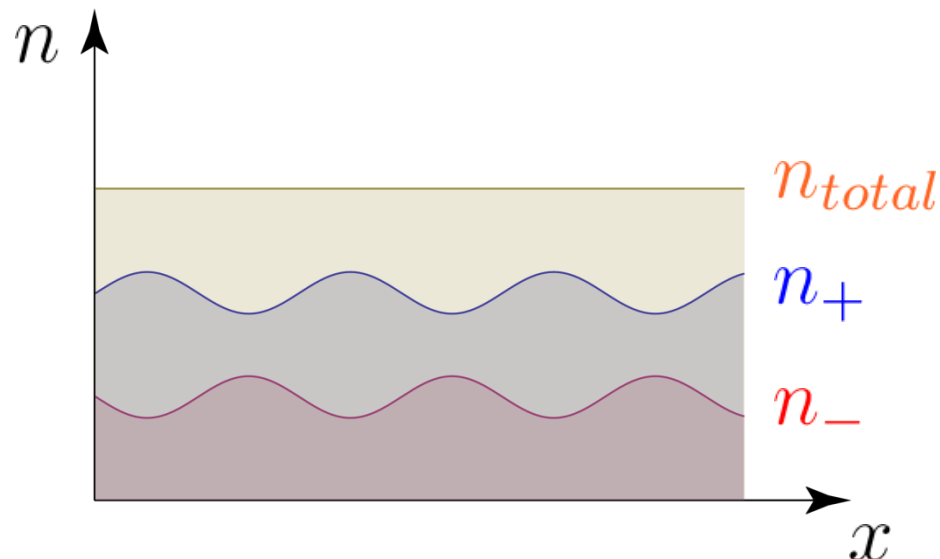
$$\Gamma = \Gamma_0 + \frac{1}{2} \langle p_\alpha v_\alpha \rangle$$

$$\Gamma_1 - \Gamma_2 = \mu H$$

$$\nu_* = (\nu_1^{-1} + \nu_2^{-1})^{-1}$$

$$D_* = \nu_*^{-1} ((\nu_1 D_1)^{-1} + (\nu_2 D_2)^{-1})^{-1}$$

$$\mathcal{F}_{MB}(q, \theta) = 1 + 4 \left(\frac{\Gamma_1 - \Gamma_2}{p_F v_F} \right)^2 \frac{\nu_* D_*}{\nu_1 D_1 + \nu_2 D_2} \frac{v_F^2 \sin^2 \theta}{s^2 + (D_* q)^2 \sin^4 \theta}$$



Релаксация типа МЛ. Зеeman(...)

$$\mathcal{F}_H(q) = 1 + \frac{v_F^2 h^2 \sin^2 \theta}{s^2 + (Dq)^2 \sin^4 \theta}$$

InSb:

$$n = 10^{11} \text{ cm}^{-2}, m = 0.014 m_0,$$

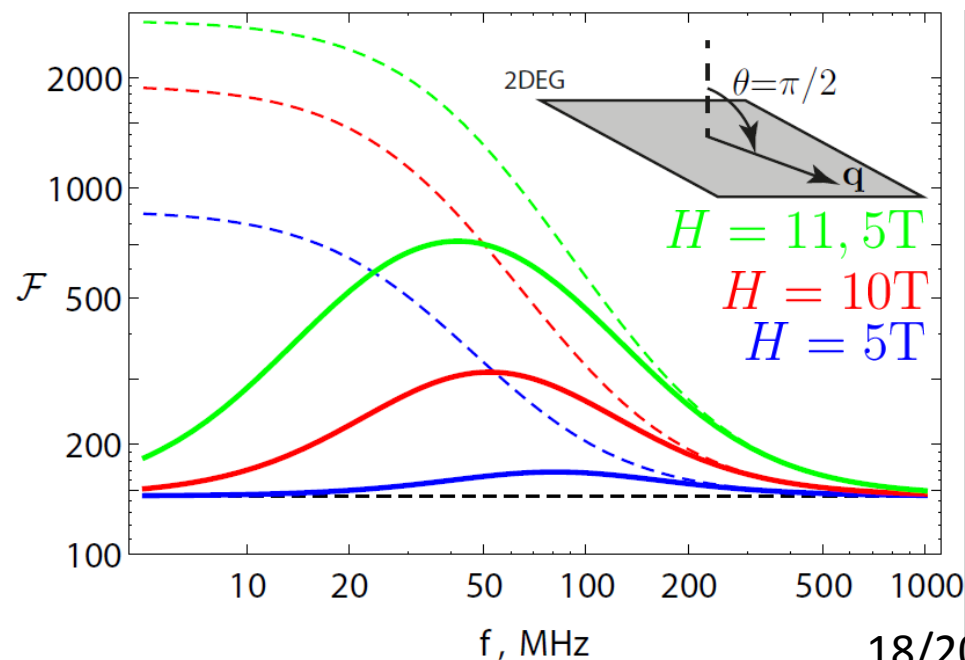
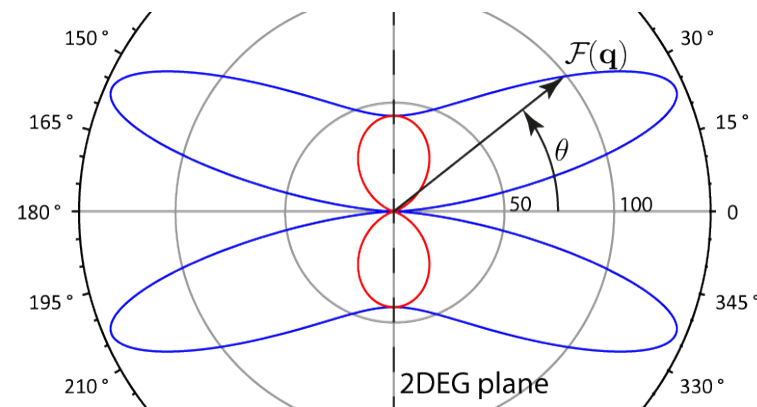
$$g_H \approx 50, \Delta_{SO} \approx 0.1 \text{ meV}$$

$$s = 6 \times 10^5 \text{ cm/s},$$

$$\varepsilon_s = (1 + 3.9)/2 \text{ (SiO}_2\text{)}$$

$$p_F l \approx 50$$

$$f = 500 \text{ MHz}$$



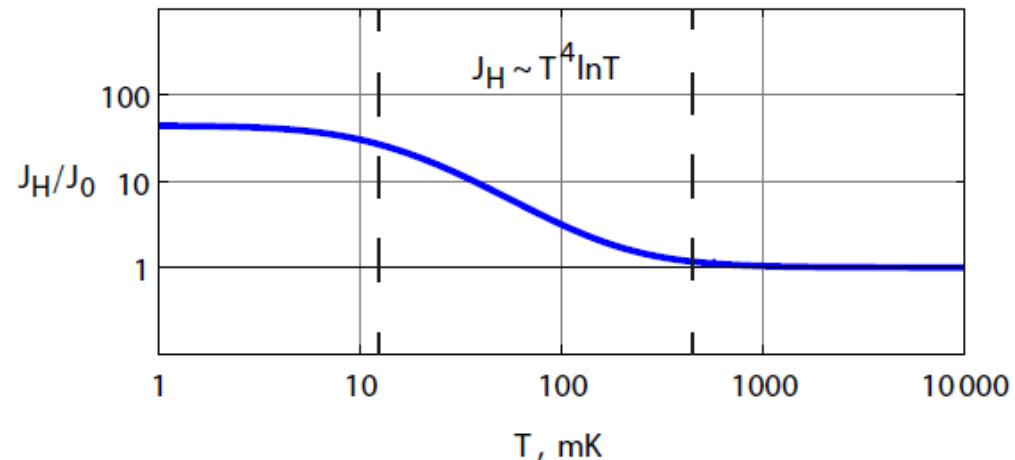
Релаксация типа МЛ. Зееман(...)

$$J_H = g_{\square} \frac{\pi^3 p_F^2 v_F^2 h^2}{126 \hbar^6 \rho_m v_s^7} A_1 T^6, \quad T \ll T_H^{(1)} = \hbar v_s^2 / D$$

$$J_H = \frac{1}{g_{\square}} \frac{\pi p_F^4 h^2}{120 \hbar^6 \rho_m v_s^3} \left(A_2 + \gamma_{\perp}^2 \ln T / T_H^{(1)} \right) T^4$$

$$A_2 = \frac{4}{3} (1 + \gamma_{\parallel}) (1 + \gamma_{\parallel} + \gamma_{\perp}) + \left(\frac{90}{\pi^4} \zeta'(4) - \frac{5 + 6\gamma}{6} \right)$$

FIG. S6: Temperature dependence of electron-phonon heat flow enhanced by the spin-diffusion. Plotted is the ratio of the spin-diffusion part $J_H(T)$ and the local part Eq.(51). In the wide temperature region $T_H^{(1)} < T < T_H^{(2)}$, where $T_H^{(1)} \sim 20$ mK, $T_H^{(2)} \sim 500$ mK, the outgoing heat flow $J_H(T) \propto T^4 \ln(T/T_H^{(1)})$. The parameters of the 2D system were: electron density $n = 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, electron effective mass $m = 0.1 m_0$, (m_0 is the free electron mass), the Fermi momentum $1/k_F = 12$ nm, the Fermi energy $E_F = 2.4$ meV, the Lande g -factor $g = 5$, the spin-orbit band splitting $\Delta_R = 0.002 E_F$ (corresponding to the Dresselhaus splitting in InP at the corresponding density); the anisotropy parameters in Eq.(47) are $\gamma_{\parallel} = 0$, $\gamma_{\perp} = 1$. The magnetic field $H = 8$ T corresponds to $h = 0.5$.



Выводы

1. Показана связь энергетической релаксации и времени жизни фонона. Допустимы как существенный перегрев так и сильные e-e взаимодействия.
2. Электрон-фононный теплообмен и поглощение ультразвука могут быть значительно усилены:
 - Диффузное усиление типа МЛ. Частные случаи:
 - Зарядовый канал при слабом Кулоновском взаимодействии.
 - Возбуждение асимметричных мод электронной плотности. Спиновая плотность при Зеемановском расщеплении магнитным (обменным) полем.
Сильный эффект магнитного поля в немагнитной среде!
 - Характерная X-образная угловая зависимость поглощения ультразвука.