Металлы с сильным рассеянием

$$\sigma = \frac{ne^2 l}{\hbar k_F}$$

$k_F l > 1$ – **принцип Иоффе-Регеля,** $k_F = (3\pi^2 n)^{1/3}$

$$\left.\begin{aligned} \sigma &= A\frac{e^2}{\hbar} n^{1/3}(k_F l) \\ n^{-1/3} &\approx 3\,\text{Å} \end{aligned}\right\} \rho_{max} \sim (100 \div 1000)\,\mu\Omega\cdot\text{cm}$$

Транспорт в жидких металлах
(*Теория Займана*)

Рассеивающий потенциал

$$V(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{R}_i} v(\mathbf{r} - \mathbf{R}_i),$$

$$V(\mathbf{q}) = \sum_{\mathbf{R}_i} \int e^{i\mathbf{qr}} v(\mathbf{r} - \mathbf{R}_i) d\mathbf{r} = \sum_{\mathbf{R}_i} e^{i\mathbf{qR}_i} \int e^{i\mathbf{qr}} v(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = v(\mathbf{q}) \sum_{\mathbf{R}_i} e^{i\mathbf{qR}_i}$$

Матричный элемент перехода

$$\int \psi_2^* V(\mathbf{r}) \psi_1 d\mathbf{r} = \int e^{i(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2)\mathbf{r}} V(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = V(\mathbf{q}), \qquad \mathbf{q} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$$

Квадрат матричного элемента

$$|V(\mathbf{q})|^2 = |v(\mathbf{q})|^2 \sum_{\mathbf{R}_i, \mathbf{R}_j} e^{i\mathbf{q}(\mathbf{R}_i - \mathbf{R}_j)} = |v(\mathbf{q})|^2 \left(N + \sum_{\mathbf{R}_{i0}} \left(\sum_{\mathbf{R}_j \neq \mathbf{R}_{i0}} e^{i\mathbf{q}(\mathbf{R}_{i0} - \mathbf{R}_j)} \right) \right)$$

Сумму во внутренних скобках можно усреднить по всем возможным конфигурациям вокруг фиксированного атома в точке R_{i0}, т.е. по всем R_{i0}.

Написав вместо суммы во внутренних скобках ее среднее $\overline{\sum_{\mathbf{R}_i} e^{i\mathbf{q}\mathbf{R}_i}}$

и заменив суммирование по $\boldsymbol{R_{i0}}$ ***умножением на*** $\boldsymbol{N}$***, получим***

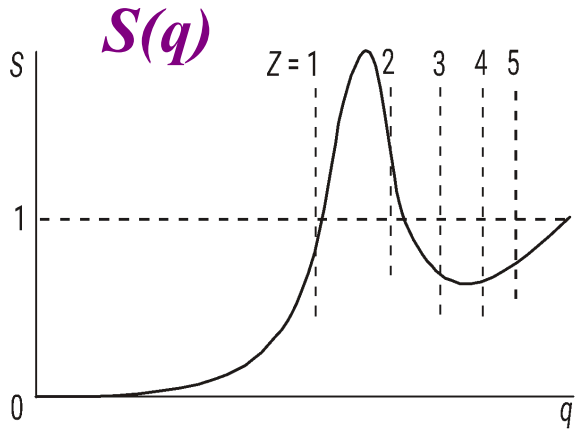
$$\overline{\left|V(\mathbf{q})\right|^2} = \left|v(\mathbf{q})\right|^2 N\left(1+\overline{\sum_{\mathbf{R}_i} e^{i\mathbf{q}\mathbf{R}_i}}\right) = \left|v(\mathbf{q})\right|^2 NS(q)$$

Наконец, структурный фактор $\boldsymbol{S(q)}$ ***можно вычислить, заменив в усредненной сумме суммирование интегрированием.***

$$S(q) = 1+\overline{\sum_{\mathbf{R}_i} e^{i\mathbf{q}\mathbf{R}_i}} = 1+N\int e^{i\mathbf{q}\mathbf{r}}Q(r)d^3r =$$

$$= 1+2\pi N\iint e^{iqr\cos\vartheta}\sin\vartheta d\vartheta Q(r)r^2dr = 1+4\pi N\int_0^\infty Q(r)\frac{\sin qr}{qr}r^2dr$$

$\boldsymbol{Q(r)}$ ***называется парной корреляционной функцией.***

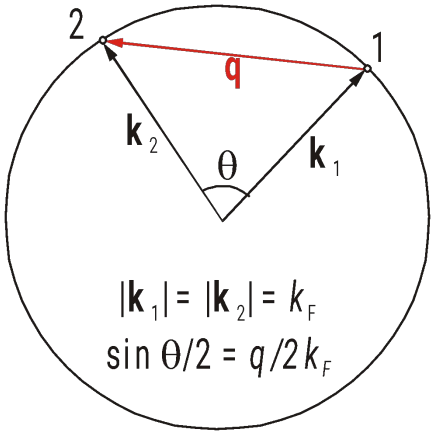


Металл	Валент-ность	ρ, μΩ cm	$d\ln\rho/d\ln T$
Li	1	25	0.6
Na	1	10	0.85
K	1	13	0.76
Rb	1	22	0.70
Ce	1	37	0.69
Zn	2	13	−0.24
Cd	2	37	−0.22
Hg	2	34	−0.10
Ga	3	26	0.14
In	3	33	0.16

Вычисление проводимости

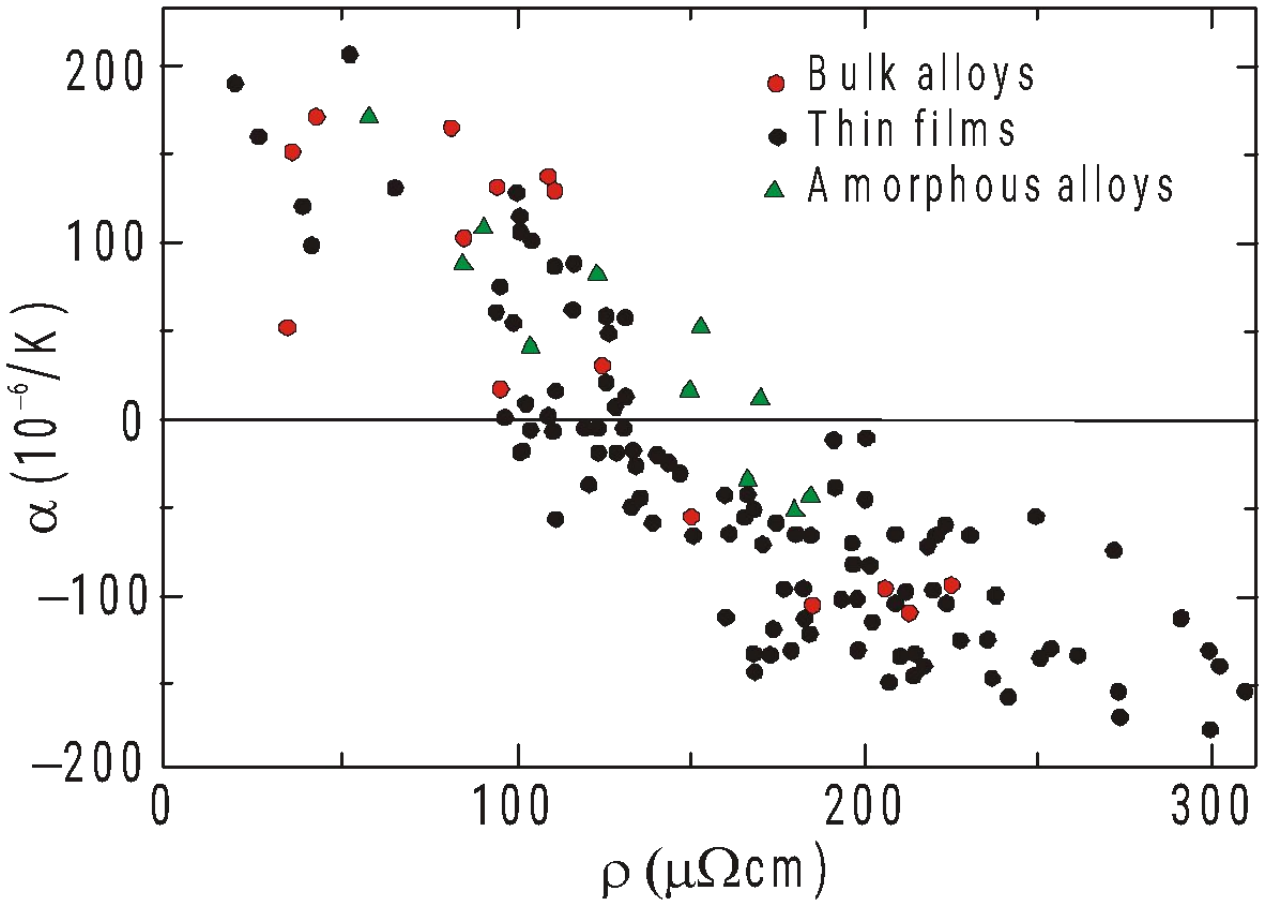
$$1/l \propto \int_0^{\pi} \overline{|V(q)|^2}(1-\cos\vartheta)\sin\vartheta d\vartheta \propto$$

$$\propto \int_0^1 S(2k_F x)v^2(2k_F x)x^3 dx, \qquad x = q/2k_F$$



Интеграл определяется окрестностью верхнего предела благодаря множителю x^3

Правило Мооя



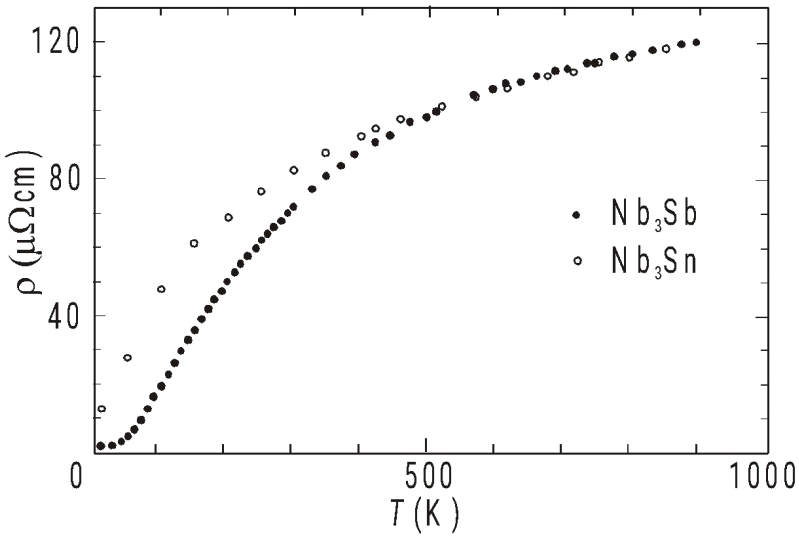
α – *температурный коэффициент сопротивления*

$$\alpha = \frac{1}{R}\left(dR/dT\right)$$

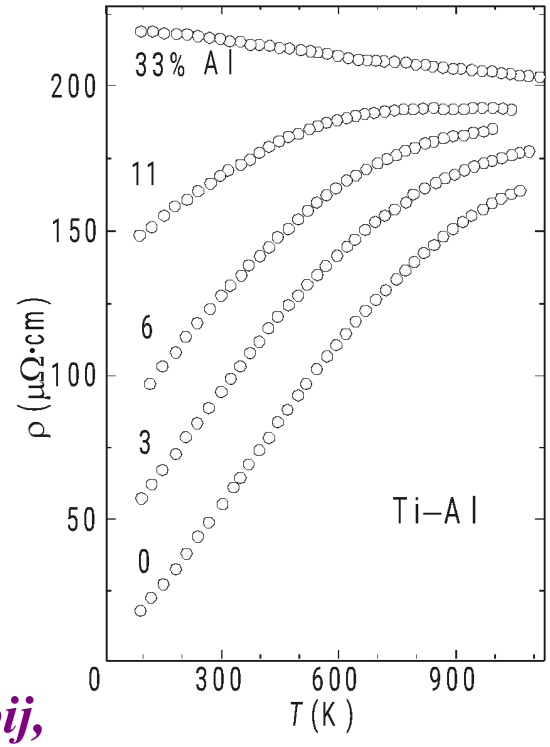
J.H. Mooij, physica status solidi (a) 17, 521 (1973)

Насыщение сопротивления

в материалах с сильным электрон-фононным взаимодействием



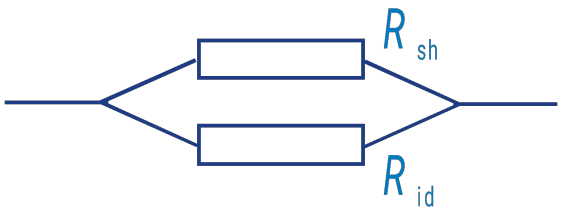
Z. Fisk, G. Webb,
PRL 36, 1084 (1976)



J.H. Mooij,
physica status solidi (a)
17, 521 (1973)

Феноменологическая модель с шунтирующим сопротивлением $\boldsymbol{\rho_{sh}}$

$$\rho^{-1} = \rho_{id}^{-1} + \rho_{sh}^{-1}$$



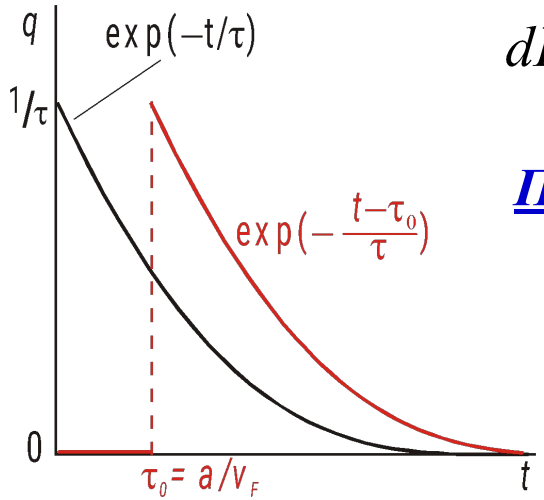
Насыщение сопротивления

(грубая, но очень наглядная модель)

M. Gurvitch,
PRB 24, 7404 (1981)

Обычно вероятность рассеяния электрона за время dt ***равна*** $pdt = dt/\tau$,

вероятность того, что акт рассеяния произойдет в момент времени t, ***равна***



$$dP = qdt = \frac{1}{\tau}\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)dt,$$

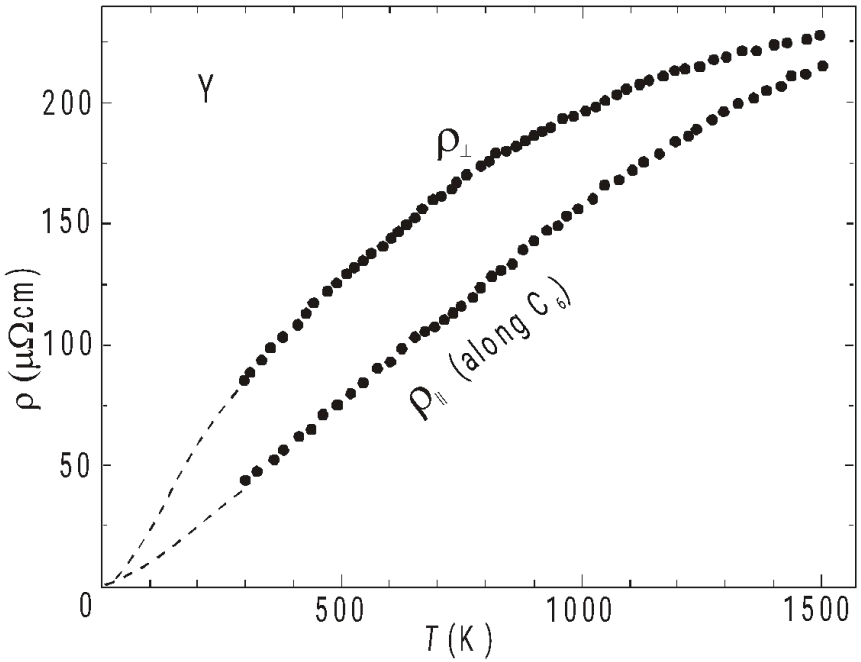
Предположим, что между двумя актами рассеяния должно пройти минимальное время τ_0 .

Усредним дрейфовую скорость, набранную электронами за время между столкновениями t

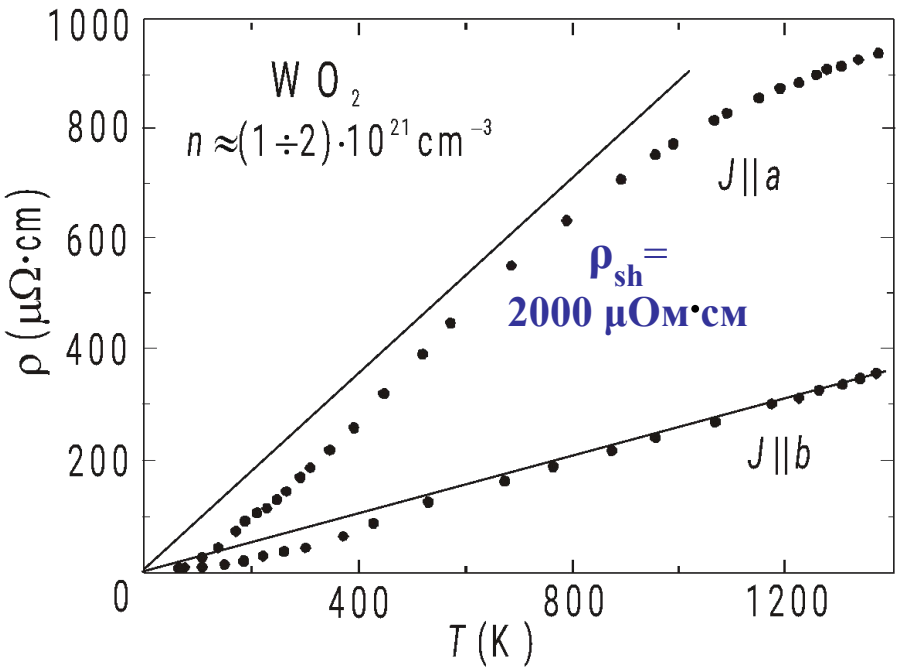
$$\langle v_{dr}\rangle = \frac{eE}{m}\langle t\rangle = \frac{eE}{m}\int_0^\infty tqdt = \frac{eE}{m}\int_{\tau_0}^\infty \frac{t}{\tau}\exp\left(-\frac{t-\tau_0}{\tau}\right)dt = \frac{eE}{m}(\tau+\tau_0)$$

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \longrightarrow \sigma = \frac{ne^2\tau}{m} + \frac{ne^2\tau_0}{m}$$

Анизотрия насыщения сопротивления



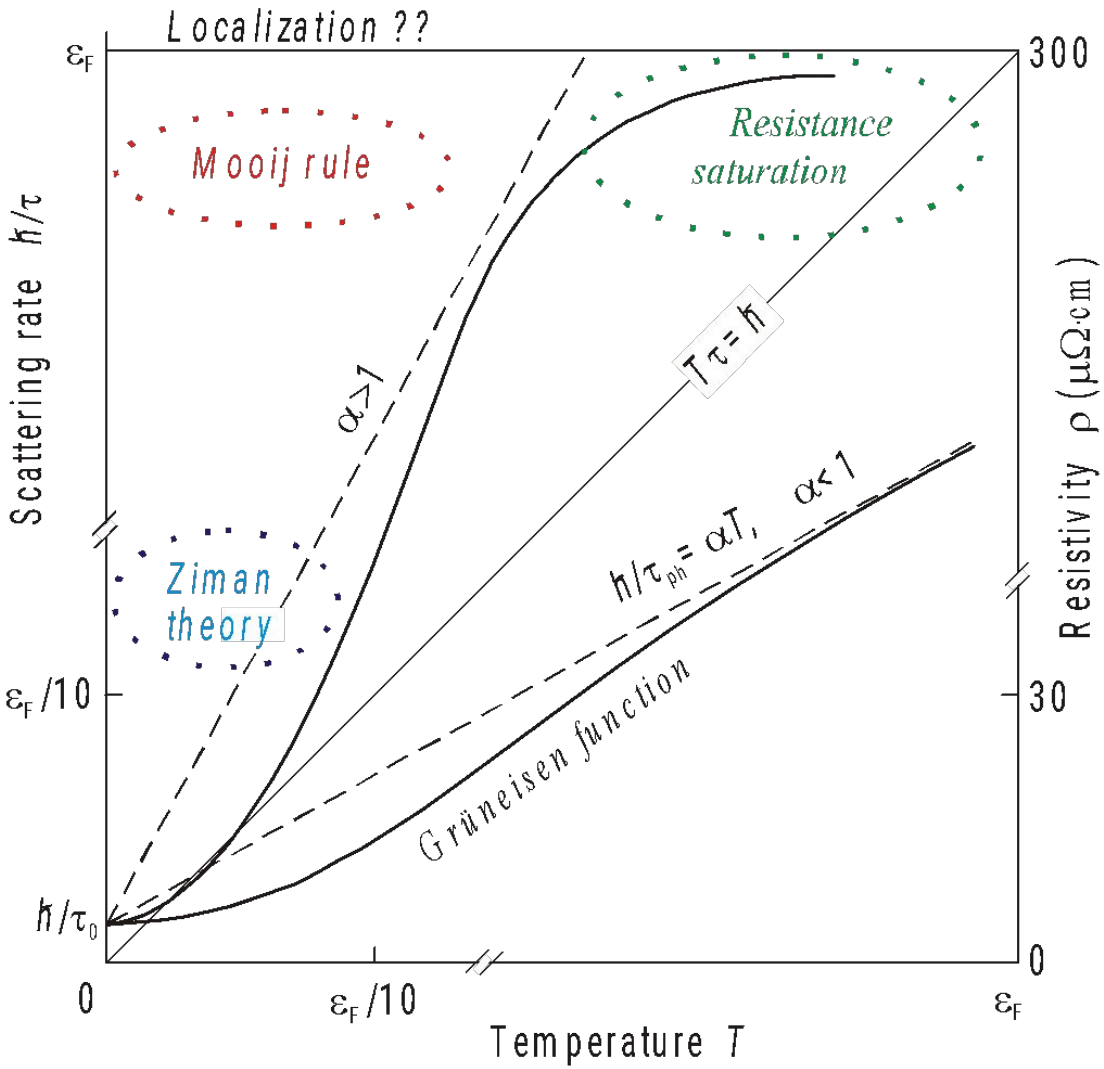
Уменьшение концентрации n приводит к большему значению ρ_{sh}



В.Е. Зиновьев,
А.Л. Соколов,
П.В. Гельд и др.,
ФТТ 17, 3617 (1975)

В.Ф.Гантмахер, Г.И. Кулеско, В.М. Теплинский,
ЖЭТФ 90, 1421 (1986)

Выводы ...



	α (экспер.)
K	1.75
Cu	1.35
Al	0.4
Sn	0.07
W	0.2
Pb	0.1
Ag	1.5

... и планы *(Что делать, чтобы добиться локализации ?)*