

# Металлы с сильным рассеянием

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

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

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

# Транспорт в жидких металлах

(Теория Займана)

*Рассеивающий потенциал*

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

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

*Матричный элемент перехода*

$$\int \Psi_2^* V(\mathbf{r}) \Psi_1 d\mathbf{r} = \int e^{i(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2)\mathbf{r}} V(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = V(\mathbf{q}), \quad \mathbf{q} = \mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2$$

*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  $\mathbf{R}_{i0}$ , т.е. по всем  $\mathbf{R}_{i0}$ .*

Написав вместо суммы во внутренних скобках ее среднее  $\sum_{\mathbf{R}_i} e^{i\mathbf{q}\mathbf{R}_i}$   
и заменив суммирование по  $\mathbf{R}_{i0}$  умножением на  $N$ , получим

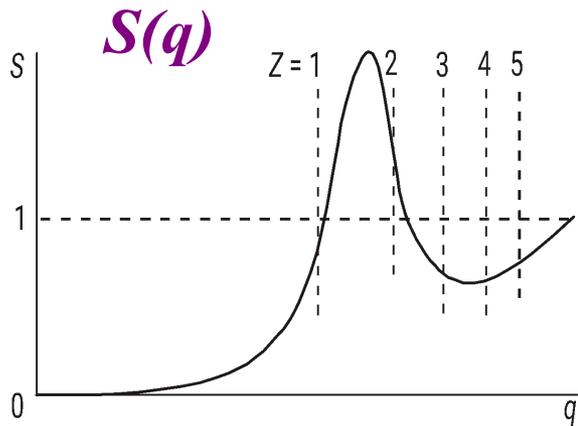
$$|\overline{V(\mathbf{q})}|^2 = |v(\mathbf{q})|^2 N \left( 1 + \sum_{\mathbf{R}_i} e^{i\mathbf{q}\mathbf{R}_i} \right) = |v(\mathbf{q})|^2 NS(q)$$

Наконец, структурный фактор  $S(q)$  можно вычислить, заменив в усредненной сумме суммирование интегрированием.

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

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

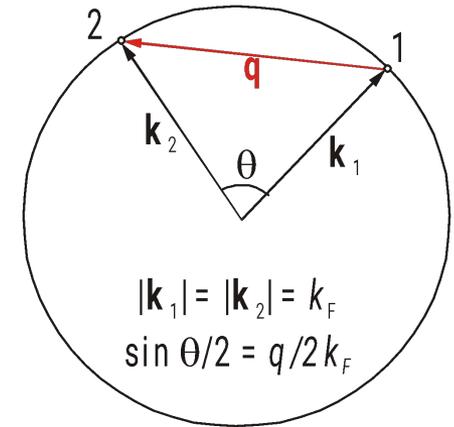
$Q(r)$  называется парной корреляционной функцией.



## Вычисление проводимости

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

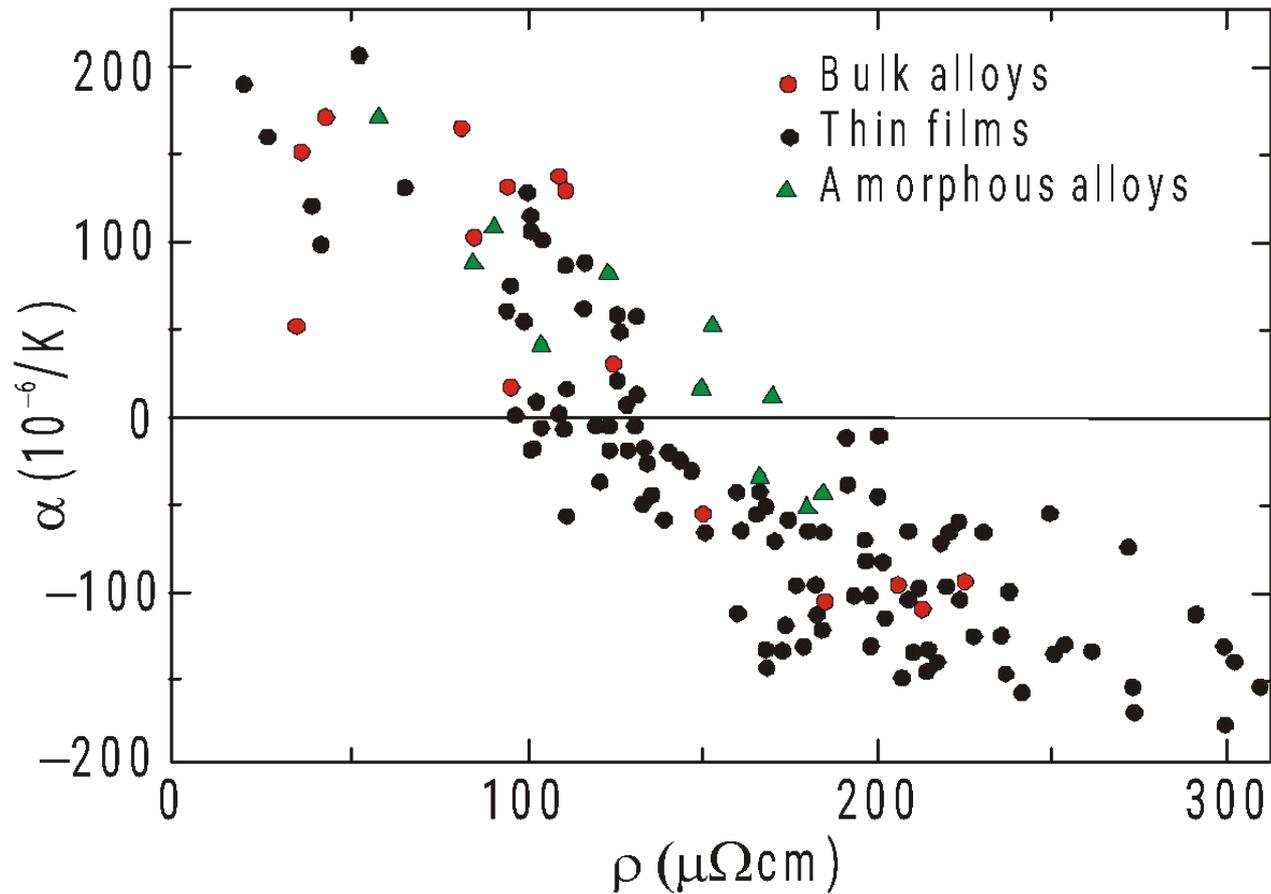
$$\propto \int_0^1 S(2k_F x) v^2 (2k_F x) x^3 dx, \quad x = q / 2k_F$$



*Интеграл  
определяется  
окрестностью  
верхнего предела  
благодаря  
множителю  $x^3$*

Металл	Валент- ность	$\rho$ , $\mu\Omega$ см	$d \ln \rho / d \ln T$
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

# Правило Мооя



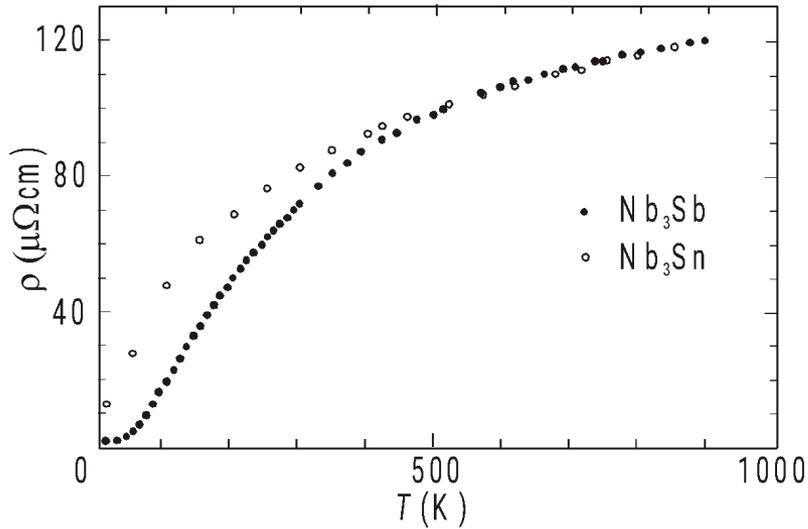
$\alpha$  —  
температурный  
коэффициент  
сопротивления

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

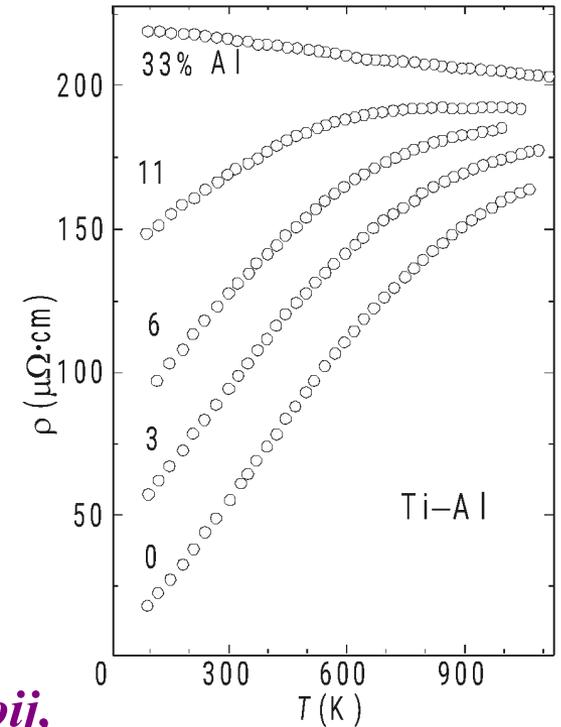
*J.H. Mooij, physica status solidi (a) 17, 521 (1973)*

# Насыщение сопротивления

в материалах с сильным электрон-фононным взаимодействием



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

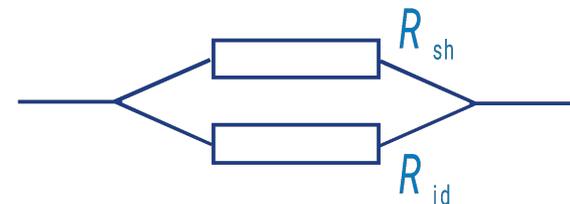


*J.H. Mooij,  
physica status solidi (a)  
17, 521 (1973)*

*Феноменологическая модель с*

*шунтирующим сопротивлением  $\rho_{sh}$*

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



# Насыщение сопротивления

(грубая, но очень наглядная модель)

M. Gurvitch,  
PRB 24, 7404 (1981)

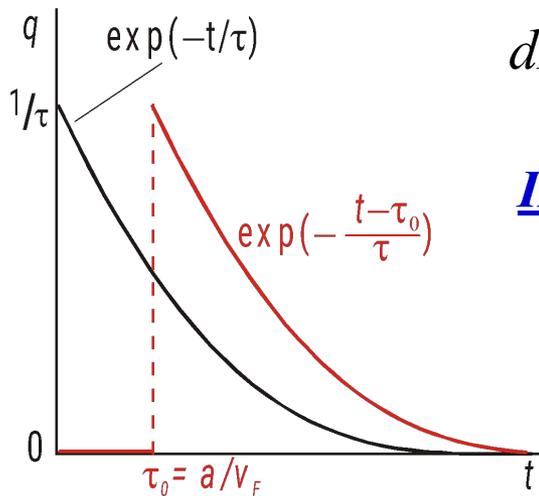
Обычно вероятность рассеяния электрона за время  $dt$  равна  $p dt = dt/\tau$ ,

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

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

Предположим, что между двумя актами рассеяния должно пройти минимальное время  $\tau_0$ .

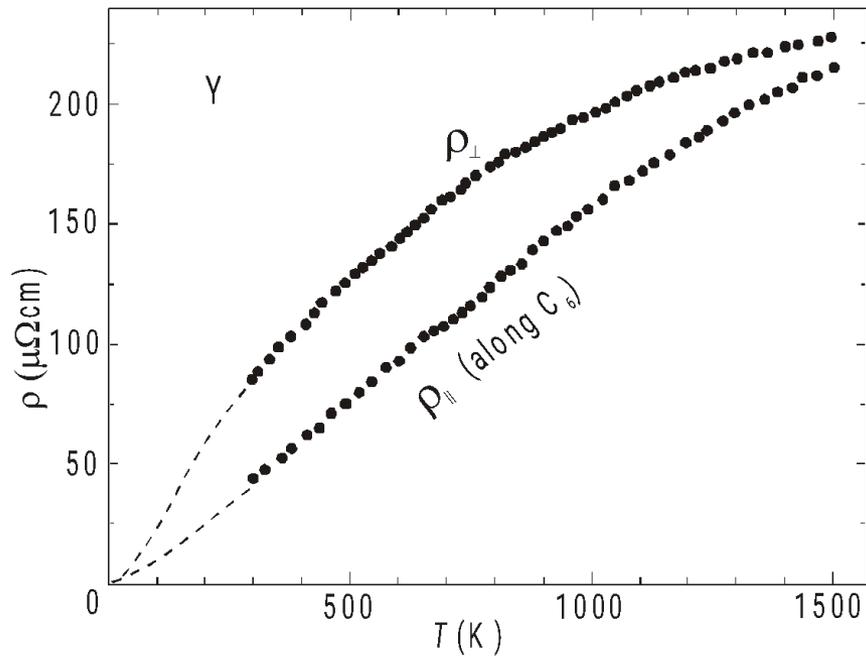
Усредним дрейфовую скорость, набранную электронами за время между столкновениями  $t$



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

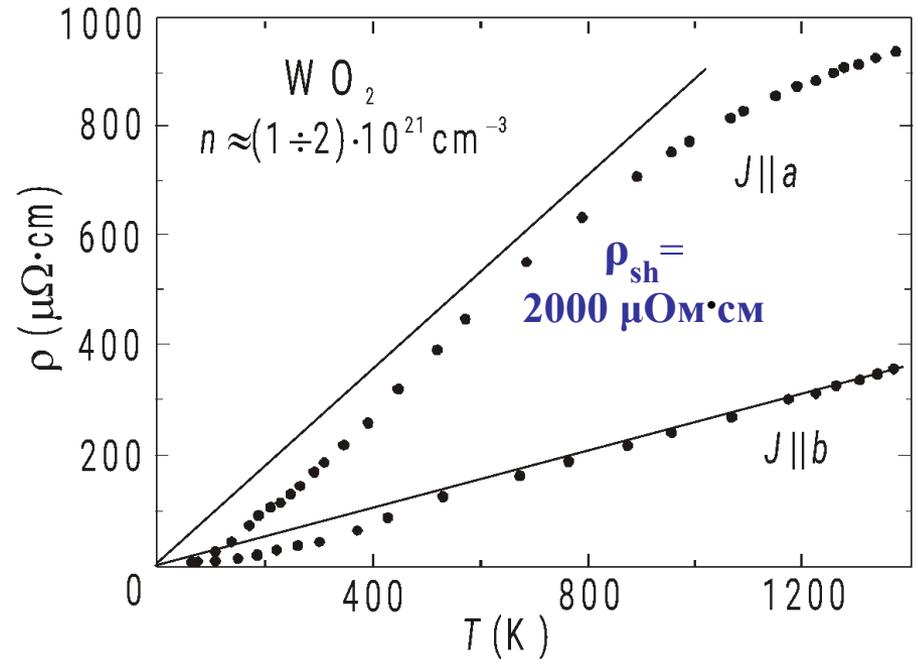
$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \longrightarrow \sigma = \frac{ne^2\tau}{m} + \frac{ne^2\tau_0}{m}$$

# Анизотрия насыщения сопротивления



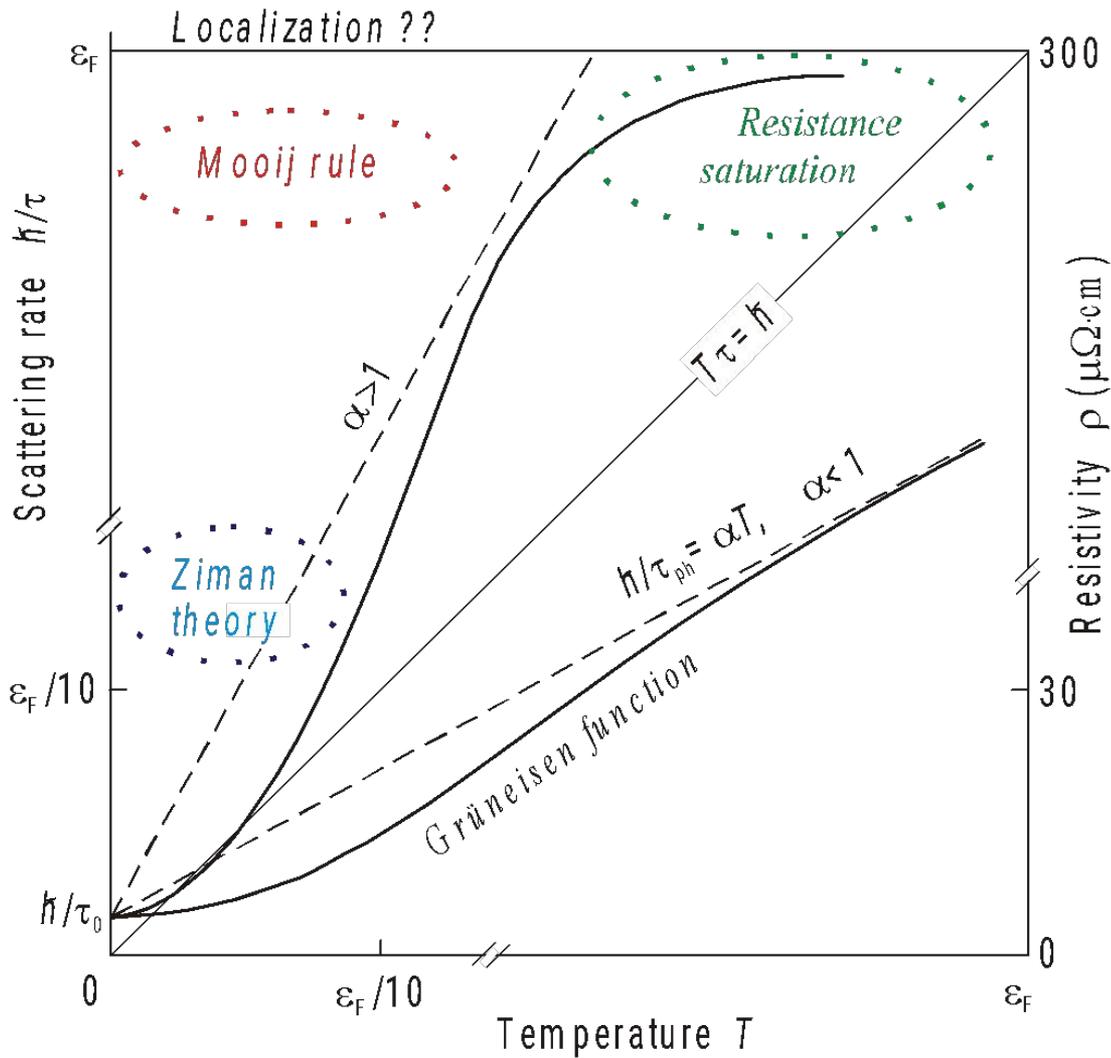
*В.Е. Зиновьев,  
А.Л. Соколов,  
П.В. Гельд и др.,  
ФТТ 17, 3617 (1975)*

*Уменьшение концентрации  $n$   
приводит к большему значению  $\rho_{\text{sh}}$*



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

# Выводы ...



	$\alpha$ (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?)