

Сегодня воскресенье,
26 ноября 2017 г.

Раздел 7

Зонная теория твердых тел

Лекция 7/3

Электропроводность металлов

Лекция 7/3

Электропроводность металлов

1. Классическая теория
электропроводности металлов
2. Квантовая теория
электропроводности металлов
3. Сверхпроводимость

1. Классическая теория электропроводности металлов

Металлы – хорошие проводники электрического тока. Носителями электрического тока в металлах являются свободные электроны.

Друде и Лоренцом была создана классическая электронная теория электропроводности металлов.

В ней металлы представляли собой твердые вещества, в узлах которых находятся положительные ионы, совершающие непрерывные колебания у положения равновесия.

Отрицательные электроны представляют собой практически свободные частицы – отрицательно заряженный электронный газ (в качестве модели использовалась модель идеального газа).

В отсутствие электрического поля электроны участвуют лишь в хаотическом $\langle v_k^2 \rangle = \frac{3}{2} v_{th}^2$ движении, сталкиваясь только с узлами кристаллической решетки.

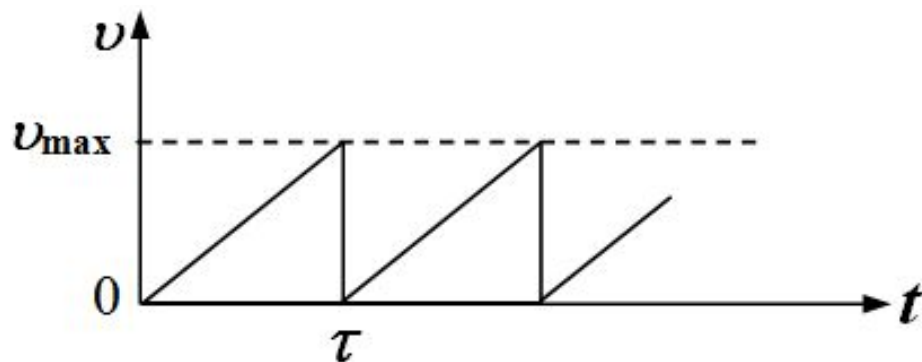
В электрическом поле электроны приобретают направленное движение против поля и двигаются с ускорением:

$$m_0 a = qE$$

$$v = v_0 + at = \frac{qE}{m_0} t$$

t меняется от 0 до τ (τ – время между двумя последовательными столкновениями электронов с узлами кристаллической решетки).

Тогда зависимость скорости электронов от времени имеет вид:



$$\tau = \frac{\langle \ell \rangle}{\langle v \rangle}, \quad \text{где } \langle \ell \rangle \text{ – средняя длина свободного пробега элек-}$$

тронов \equiv межузельное расстояние кристаллической решетки;
 $\langle v \rangle$ – средняя скорость теплового (хаотического) движения электронов.

Средняя скорость дрейфа электронов по полю (средняя скорость направленного движения) $\langle v_d \rangle$

$$\langle v_d \rangle = \frac{1}{2} v_{\max} = \frac{qE}{2m_0} \tau.$$

Плотность электрического тока в проводнике:

$$j = qn_e \langle v_d \rangle = \frac{q^2 n_e E}{2m_0} \tau = \frac{q^2 n_e}{2m_0} \cdot \frac{\langle \ell \rangle}{\langle v \rangle} E.$$

где n_e – концентрация электронов в проводнике;
 q – заряд электрона.

Учитывая $j = \sigma E = \frac{1}{\rho_e} E$, получим выражения для

удельной проводимости металлического проводника

$$\sigma = \frac{q^2 n_e}{2m_0} \cdot \frac{\langle \ell \rangle}{\langle v \rangle} ,$$

и его сопротивления

$$R \sim \frac{1}{\sigma} = \frac{2m_0 \langle v \rangle}{q^2 n_e \langle \ell \rangle}$$

Разные металлы имеют:

- 1) различные концентрации носителей заряда n_e .
- 2) разное строение кристаллической решетки и $\langle l \rangle$.
- 3) разную скорость теплового движения электронов $\langle v \rangle$.

Следовательно классическая теория

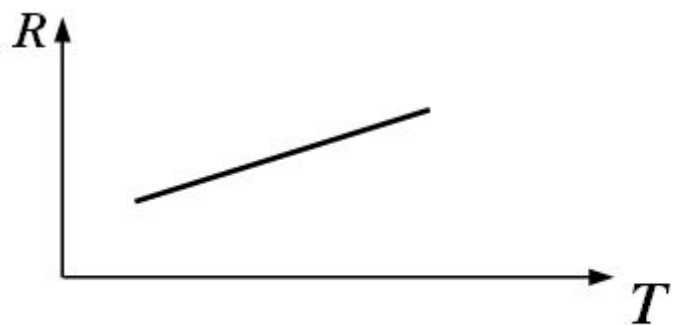
электропроводности металлов объясняет:

- 1) *разное сопротивление различных металлов.*
- 2) *зависимость сопротивления от температуры*

$$R \sim \langle v \rangle \sim \sqrt{T}.$$

Проблемы классической теории:

- 1) Использование модели идеального электронного газа приводит к результату, что молярная теплоемкость металлов должна была быть равна $4,5R_{\text{газ}}$ ($R_{\text{газ}}=8,31$), что противоречило эксперименту.
- 2) Опыт показывает, что сопротивление $R \sim T$, а не \sqrt{T} .



$$R = R_0 (1 + \alpha T),$$

где $\alpha = \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$ – температурный коэффициент сопротивления металла.

2. Квантовая теория электропроводности металлов

На электроны проводимости в металле действуют сложные, неподдающиеся точному описанию силы:

- силы притяжения к атомам металла;
- силы взаимодействия электронов между собой;
- силы, связанные с дефектами кристаллического строения металлов.

2. Квантовая теория электропроводности металлов

Для описания движения электрона во внешнем электрическом поле E вводят понятие эффективной массы электрона m^* ($m^* \neq m_e$), тогда:

$$F = m^* a \Rightarrow -eE = m^* a.$$

Эффективная масса не определяет ни инертные, ни гравитационные свойства электрона. Она лишь характеризует его взаимодействие с электрическим полем кристалла.

Закон Ома

$$j = \sigma E.$$

Проводимость металла:

$$\sigma = \frac{e^2 \varepsilon}{m^* \pi k T \nu},$$

где

ε – модуль упругости кристаллической решетки;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

ν – скорость поступательного движения электронов.

Под действием внешнего электрического поля электроны проводимости металла переходят с одного энергетического уровня на другой (от одного атома, к другому), эти переходы создают электрический ток.



Металл

Квантовая физика считает, что электроны при своем движении рассеиваются не на узлах кристаллической решетки, а на фононах, концентрация которых сильно зависит от температуры.

В области высоких температур $T \gg T_D$ все осцилляторы возбуждены вплоть до ω_{\max} , тогда с ростом температуры $n_f \sim T$ и

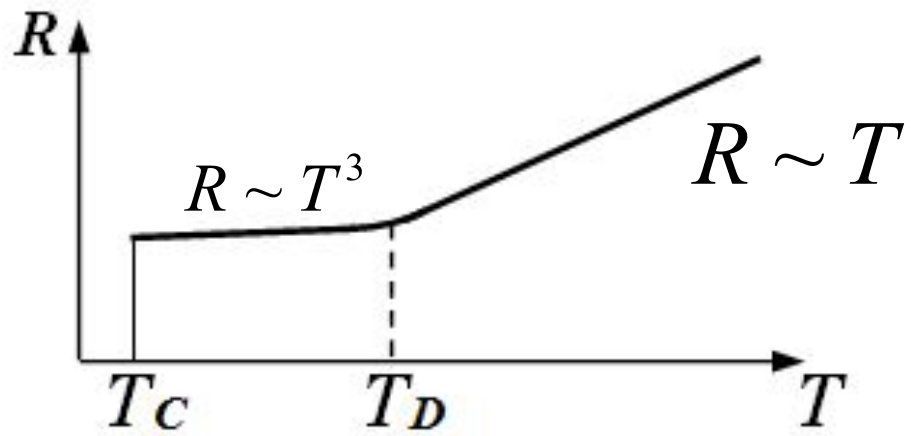
$$R \sim T,$$

что очень хорошо согласуется с экспериментом.

В области низких температур $T \ll T_D$ с ростом температуры происходит не только увеличение фононов с данной частотой, но и быстрый рост новых фононов.

$$R \sim n_f \sim T^3 \quad (W \sim T^4, \quad c_M \sim T^3),$$

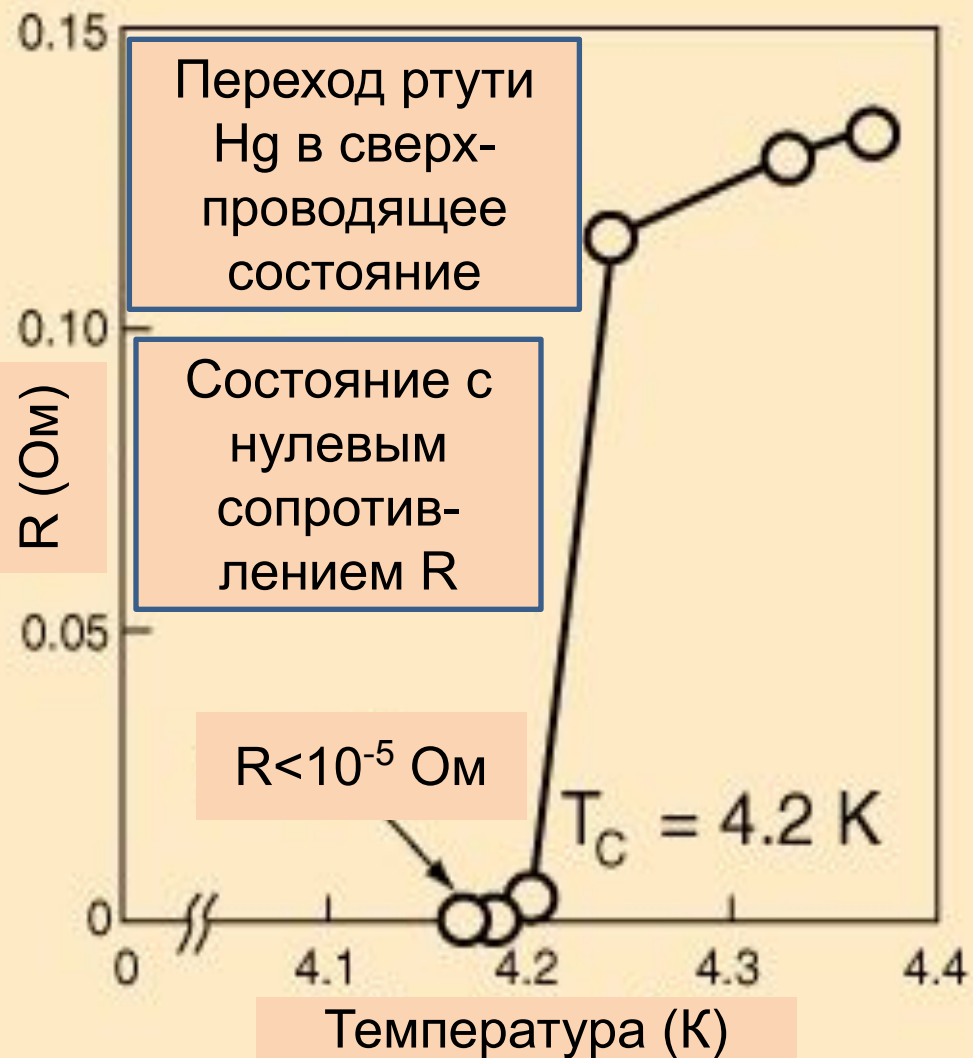
что также хорошо согласуется с экспериментом.



3. Сверхпроводимость



Камерлинг Оннес 1911 год.



Есть два рода частиц: фермионы и бозоны.

Фермионы – частицы с полуцелым значением спина ($s=1/2, 3/2\dots$). Они подчиняются принципу запрета Паули.

Подчиняются статистике Ферми-Дирака.

Пример: электрон, протон, нейтрон и частицы, составленные из нечетного числа фермионов и др.

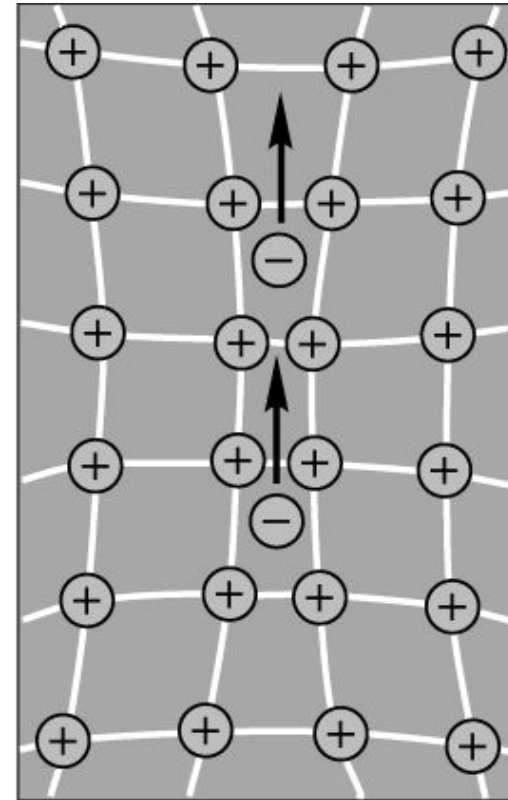
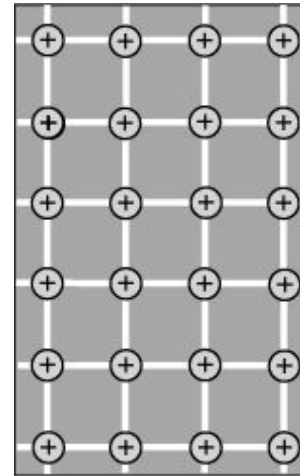
Бозоны – частицы с целым значением спина ($s=1, 2\dots$). Они **НЕ** подчиняются принципу запрета Паули.

Подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна.

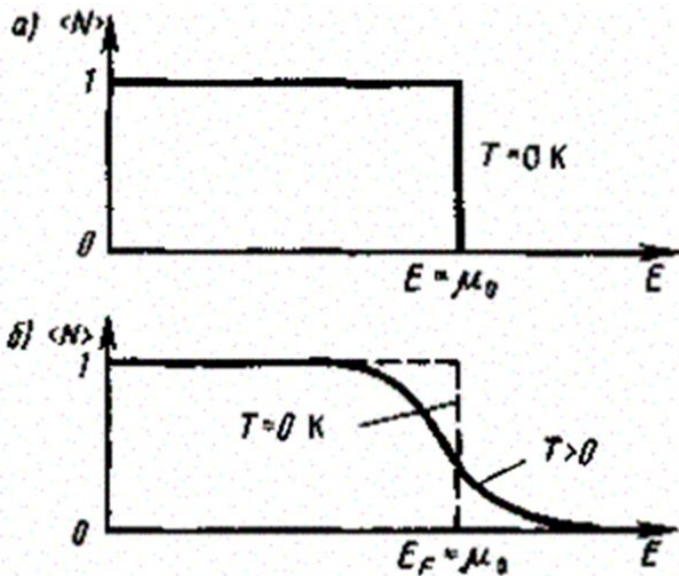
Пример: фотон, частицы, составленные из четного числа фермионов и др.

В металле при очень низких температурах между двумя электронами кроме кулоновского отталкивания может появиться слабое взаимное притяжение.

При этом они образуют **куперовскую пару**.
Размеры пары на **4 порядка** больше среднего межатомного расстояния.



Куперовская пара – бозон (спин $s=1/2-1/2=0$).
Она занимает самое нижнее из возможных энергетических состояний.

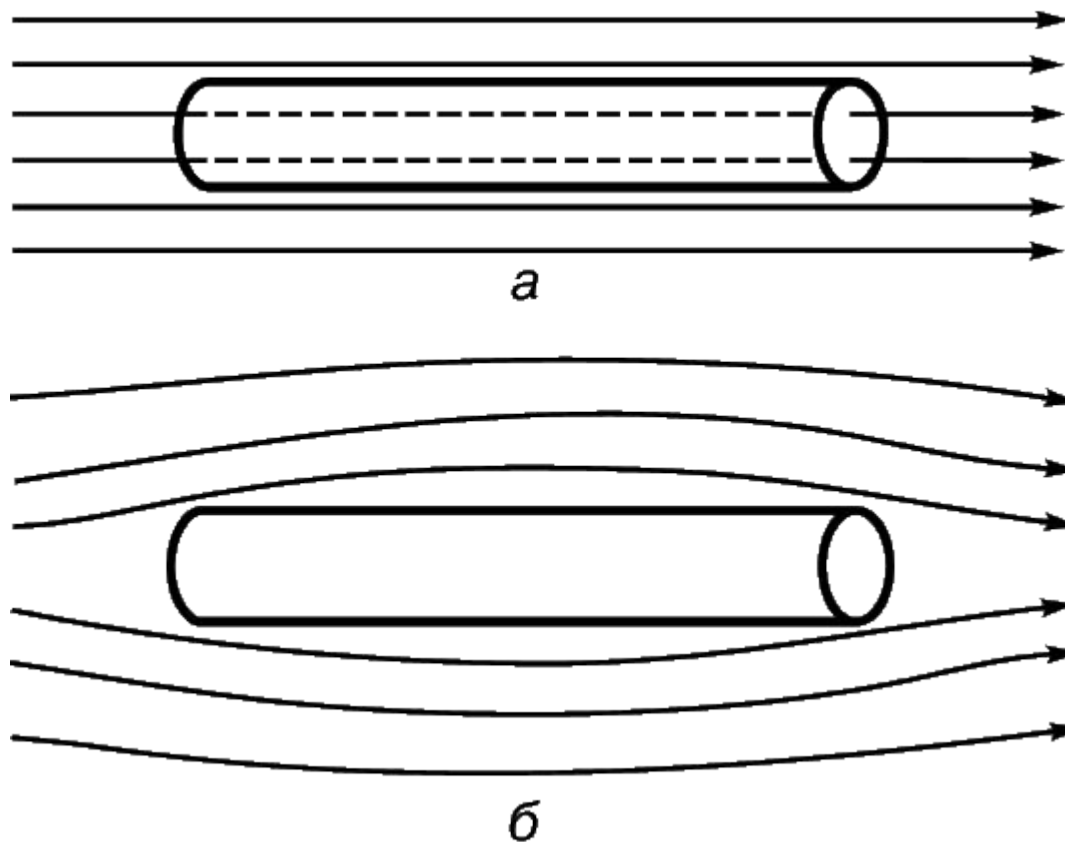


Для того, чтобы разорвать куперовскую пару нужна энергия $\sim 2E_F$.

СП разрушается если:

- через СП течет большой ток;
- СП помещен в сильное магнитное поле.

Эффект Мейснера: магнитное поле выталкивается из сверхпроводника (стрелки – линии магнитной индукции).



Эффект Джозефсона: туннелирование куперовских пар через тонкий диэлектрик.



Стационарный эффект Джозефсона: при пропускании через контакт СП-диэлектрик-СП тока, величина которого не превышает критическую, падение напряжения на контакте отсутствует.

Существует семейство материалов (сверхпроводящих керамик), которые проявляют сверхпроводящие свойства при температурах кипения жидкого азота (77,4 К) и выше (70 К – 153 К).

Сверхпроводник	T_c , К
$\text{La}_{2-x}\text{M}_x\text{CuO}_4^*$	38
$\text{M}'\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}^{**}$	93
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$	70
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_2\text{O}_8$	90
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$	110
$\text{TlBa}_2\text{CaCu}_2\text{O}_7$	91
$\text{TlBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_2$	116
$\text{TlBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{11}$	122
$\text{TlBa}_2\text{Ca}_4\text{Cu}_5\text{O}_{13}$	120
$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_6$	80
$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$	110
$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$	128
$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{12}$	102
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$	90
$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$	153

* $\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}; x = 0,15$. ** $\text{M}' = \text{K}, \text{PЗЭ}$.