

# Теория Сверхпроводимости. Феноменологическая теория.

Курин

Есть еще микроскопическая теория сверхпроводимости - она более полная, но и сложная. Будет во втором семестре.

## 1 Литература

Зачёт будет похож на экзамен. Есть учебное пособие: "Феноменологическая теория сверхпроводимости". Можно найти его на сайте кафедры наноструктур: <https://ipmras.ru/> → кафедра наноструктур и наноэлектроники → учебное пособие.

Ещё из литературы:

- Абрикосов "Теория нормальных металлов и сверхпроводников"
- Шмидт "Введение в сверхпроводимость"
- Типххам
- Де Жен
- Ландау, Лифшиц Т. IX
- Фейнман "Статистическая механика"

Сверхпроводимость - явление отсутствия сопротивления металлов при некоторой температуре.

Сопротивление это  $R = U/I$ . И оно как правило обусловлено рассеянием на фононах кристаллической решётки.

И ток течет без приложения напряжения бесконечно долго. Это открытие было совершено в 1911 году голландским физиком Кеммерлингом-Оннесом. Он достиг температуры жидкого  $He^4$  и обнаружил, что в четырёхзондовой схеме достигается нулевое сопротивление.

А выглядело это как трубка с ртутью в жидком гелии:

И это оказалось характерным для плохих полупроводников: Hg, Nb; а для хороших, типа Au, Ag, Cu - не наблюдается. И для сплавов был рекорд порядка 23K.

Можно нарисовать историю сверхпроводников как график критической температуры от времени:

Была открыта высокотемпературная сверхпроводимость сотрудниками ИВМ: Мюллером и Беднордом. Первый состав  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$  имел  $T_c \approx 40K$ . Потом был состав  $YBaCuO$  с критической температурой 90K,  $BiSrCaCuO$  с температурой 90-110K. Они так хороши, потому что их критическая температура превосходит температуру жидкого азота. А следующим этапом стали железные сверхпроводники ...  $FeAs$  с критической температурой порядка 55K.

Была теория Гинзбурга-Ландау, которая появилась в 30-х годах. А понимание (хотя бы качественное) появилось только в 1957 году - теория БКШ. Потом был открыт эффект Джозефсона в 1962 году.

А ещё была теория Абрикосова-Гинзбурга-Леветта в 2003 году. Эти явления тесно связаны со сверхтекучестью.

## 2 Основные экспериментальные факты и их следствия.

### 2.1 Электродинамика сверхпроводников.

Наблюдается

**эффект Мейсснера-Оксенфельда** . Происходит выталкивание магнитного поля из сверхпроводника:

Вспомним уравнения Максвелла:

$$\text{div } \vec{B} = 0; \quad (1)$$

$$\text{div } \vec{D} = 4\pi\rho; \quad (2)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\partial_t \vec{B}/c; \quad (3)$$

$$\text{rot } \vec{H} = \partial_t \vec{D} + \frac{4\pi}{c} \vec{j}; \quad (4)$$

Все эти уравнения писались в аналогии с деформациями твёрдого тела.

$$u_{ik} = \Lambda_{iklm} \sigma_{lm}; \quad (5)$$

В данном случае  $D$  - от слова displacement - смещение. Но сейчас мы все знаем, что есть микротекория всего этого. Будем рассматривать уравнение Шрёдингера:

$$\hat{H}\psi = \left( -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + \frac{\alpha}{r} \right) \psi = E\psi; \quad (6)$$

А не падает он на центр за счет соотношения неопределённости  $\Delta x \Delta p \sim \hbar$ . Размер ядра порядка  $10^{-13}$  см, а радиус Бора  $10^{-8}$  см. А между ядром и электроном - поле.

### 2.2 Двухвекторная форма уравнений Максвелла

На самом деле его сейчас пишут так:

$$\text{rot } \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} + \frac{1}{c} \partial_t \vec{E}; \quad (7)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{1}{c} \partial_t \vec{B}; \quad (8)$$

$$\text{div } \vec{E} = 4\pi\rho; \quad (9)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0; \quad (10)$$

Тогда получится соотношение типа:

$$\vec{B} = \langle \vec{b}_{mic} \rangle; \quad (11)$$

$$\vec{E} = \langle \vec{e}_{mic} \rangle; \quad (12)$$

А всякий сложный вектор получается из усреднения микрополей. Тогда и токи можно написать по-другому:

$$\vec{j} = \partial_t \vec{P} + \text{crot } \vec{M} + \vec{j}_{ex}; \quad (13)$$

И бывают микротоки. Они в квантовой механике пишутся как:

$$\vec{j} = -e \frac{e\hbar}{2m} (\psi^* \nabla \psi - \psi \nabla \psi^*); \quad (14)$$

И тогда мы можем написать:

$$\text{rot } \vec{B} = \frac{4\pi}{c} (\partial_t \vec{P} + \text{crot } \vec{M} + \vec{j}_{ex}) + \frac{1}{c} \partial_t \vec{E}; \quad (15)$$

А материальные соотношения:

$$\vec{D} = \vec{E} + 4\pi \vec{P}; \quad (16)$$

$$\vec{H} = \vec{B} - 4\pi \vec{M}; \quad (17)$$

В идеальной плазме поле оказывается замороженным. А здесь оно выталкивается  $B_i = 0$ . Это квантовая плазма по-сути. А какие из этого следствия?

- $B_{n,ex} = 0$  - поле не входит в сверхпроводник. Это следствие  $\text{div } \vec{B} = 0$ .
- $\vec{B}_{\tau,ex} - \vec{B}_{\tau,in} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}_\tau$