

NATIONAL RESEARCH
UNIVERSITY

Майнор "Мир глазами физиков" 2017-2019

Осень 2017

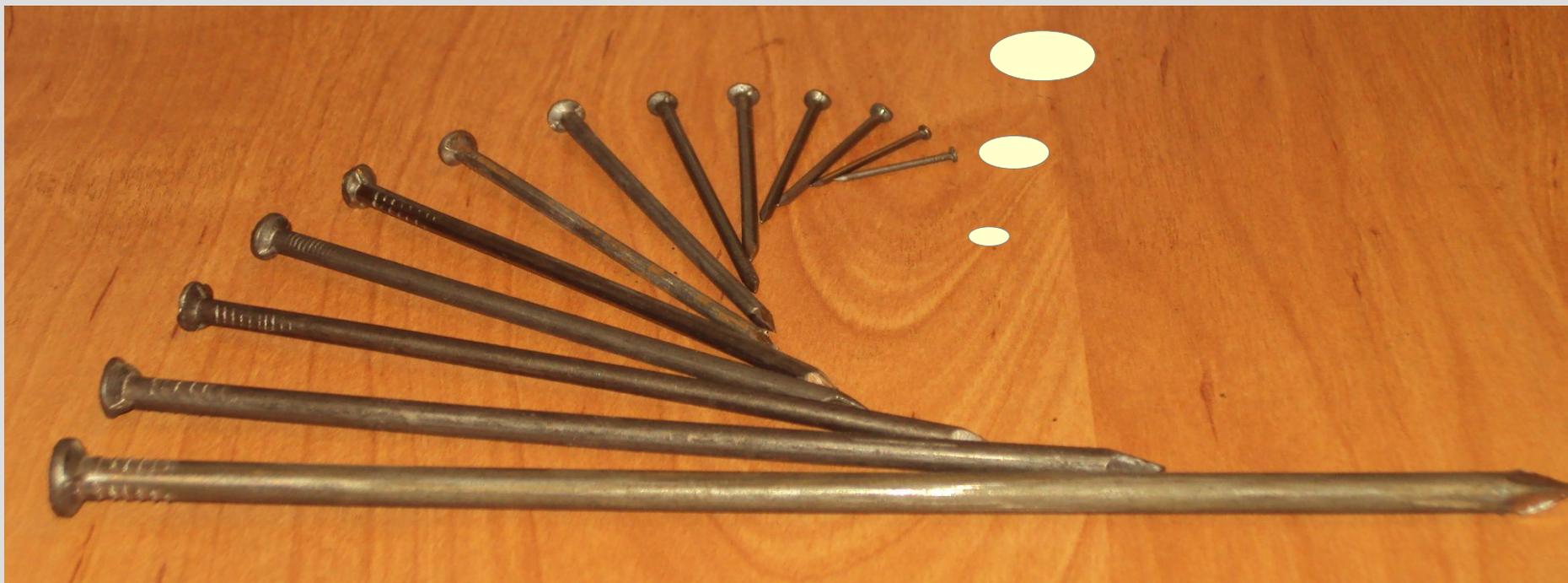
Квантовая физика 'для чайников'

Лекция 10:

Макроскопические квантовые
явления I: ферми-газ, сверхтекучесть,
сверхпроводимость

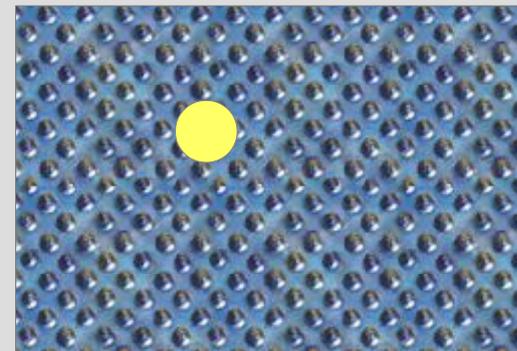
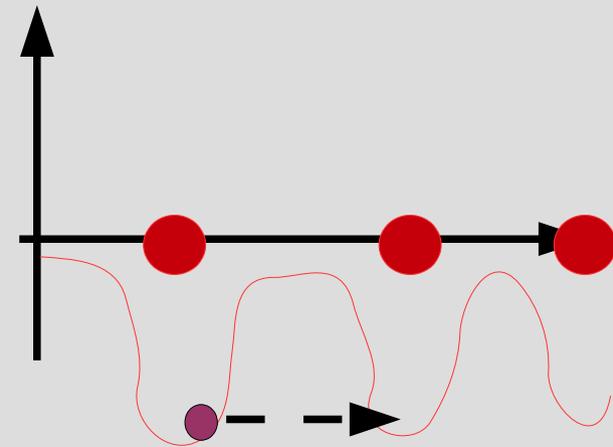
О металлах...

квантовый объект?

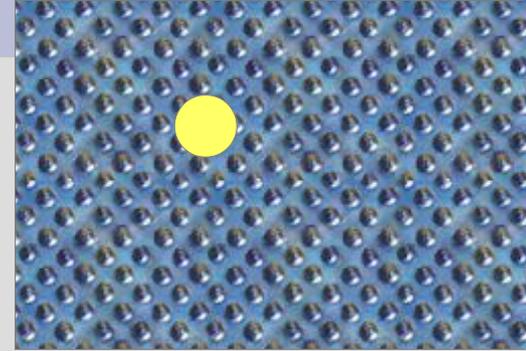


Квантовое поведение электронов в металле

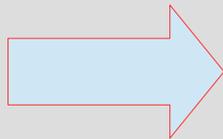
- $T=0$ (для простоты, потом проверим насколько это важно)
- Электроны – ферми-частицы! В одном *квантовом состоянии* не более одного электрона
- Проводимость металла связана с тем, что в нем есть “свободные” электроны
- Какие квантовые числа задают состояние свободного электрона в металле?



Импульсное пространство

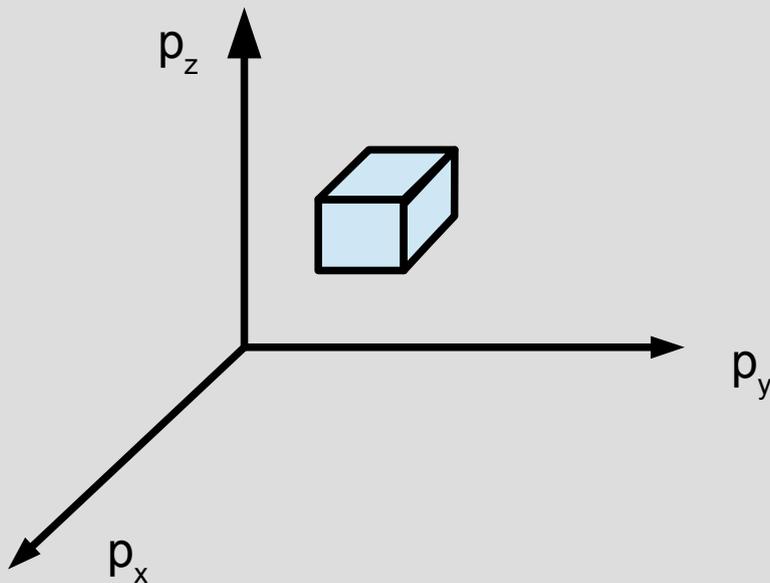


$$\Delta x = L_x$$
$$\Delta p_x \Delta x \simeq \hbar$$



Невозможно различить два электрона, импульсы которых отличаются менее чем

$$\Delta p_x = \frac{h}{L_x}$$

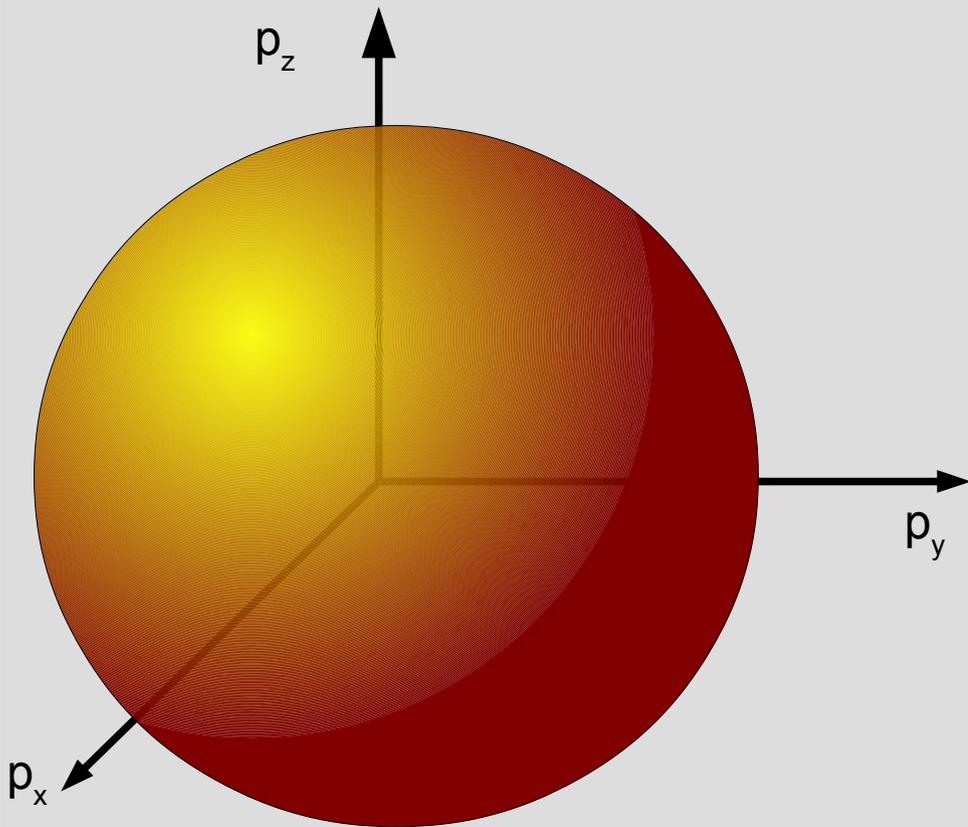


На одно уникальное состояние приходится объём импульсного пространства

$$\Delta p_x \cdot \Delta p_y \cdot \Delta p_z \simeq \frac{h^3}{L_x L_y L_z} = \frac{h^3}{V}$$

Заполнение состояний

$$E(\vec{p}) = \frac{p^2}{2m}$$



Размещаем N электронов

$$2 \frac{4\pi}{3} p_F^3 = N \frac{h^3}{V} = n h^3$$

$$p_F = h \sqrt[3]{\frac{3n}{8\pi}} = \hbar (3\pi^2 n)^{1/3}$$

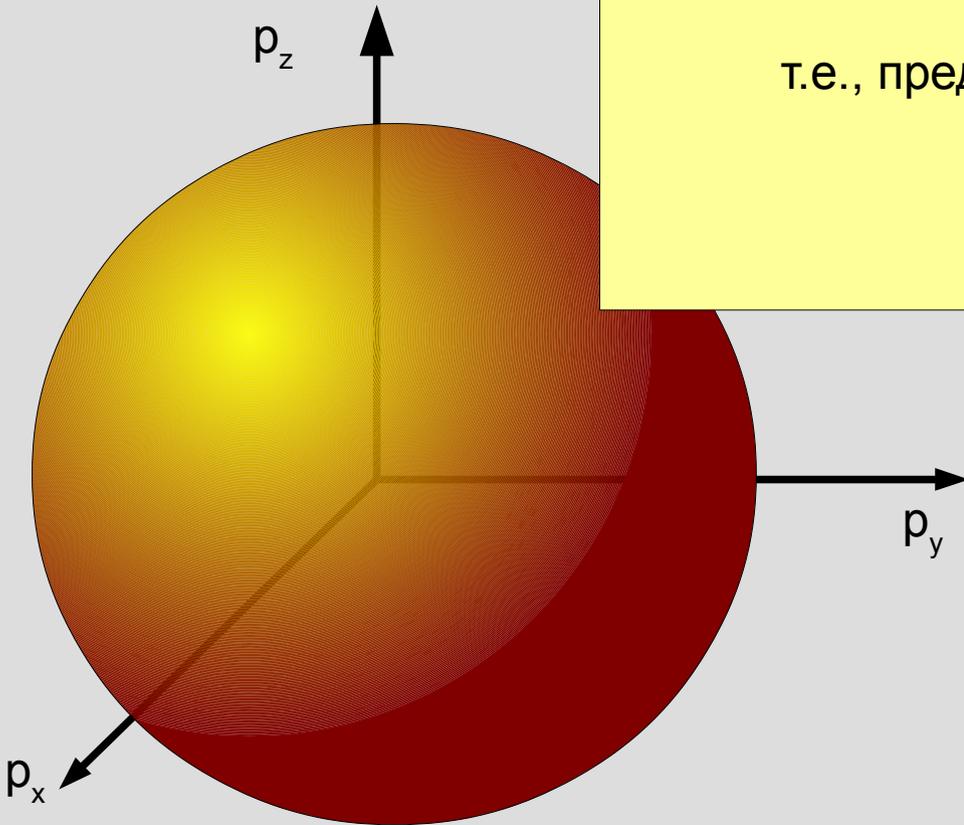
$$E_F = \frac{p_F^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{2/3}$$

Заполнение состояний

$$E(\vec{p}) = \frac{p^2}{2m}$$

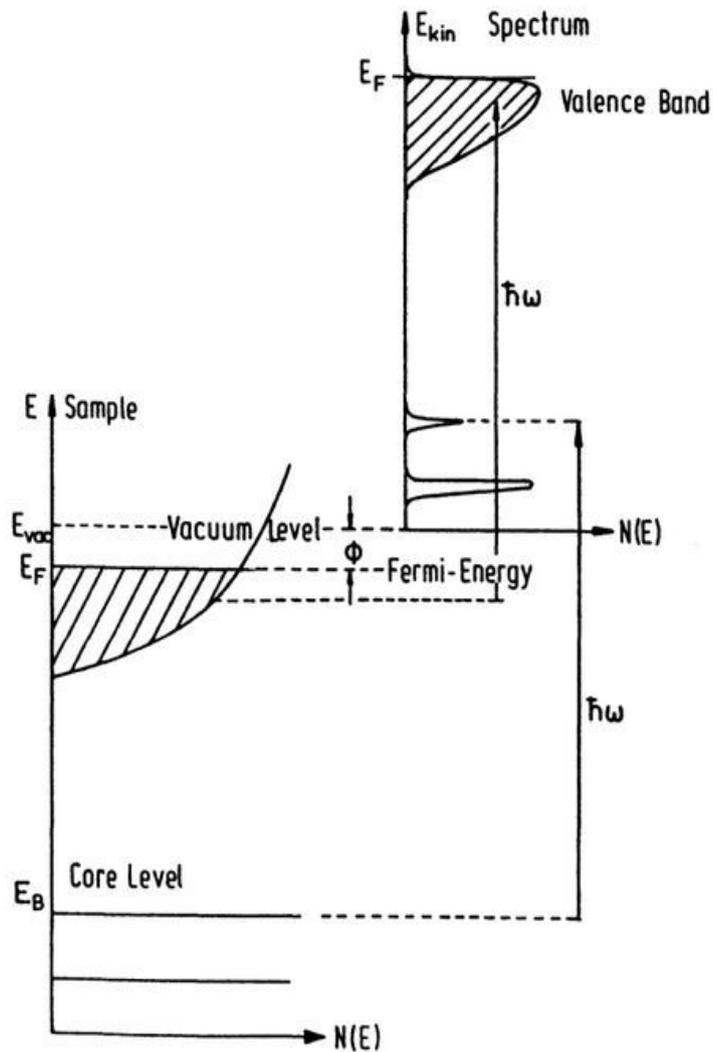
$$E_F \simeq \frac{10^{-68} \times 3 \times 100^{2/3} \times 10^{18}}{2 \times 10^{-30}} \text{ Дж} \simeq \\ \simeq 3 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \simeq 2 \text{ эВ} = 20,000 \text{ К}$$

т.е., предположение о $T=0$ совершенно не ограничивает



$$E_F = \frac{p_F^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{2/3}$$

Связь с фотоэффектом



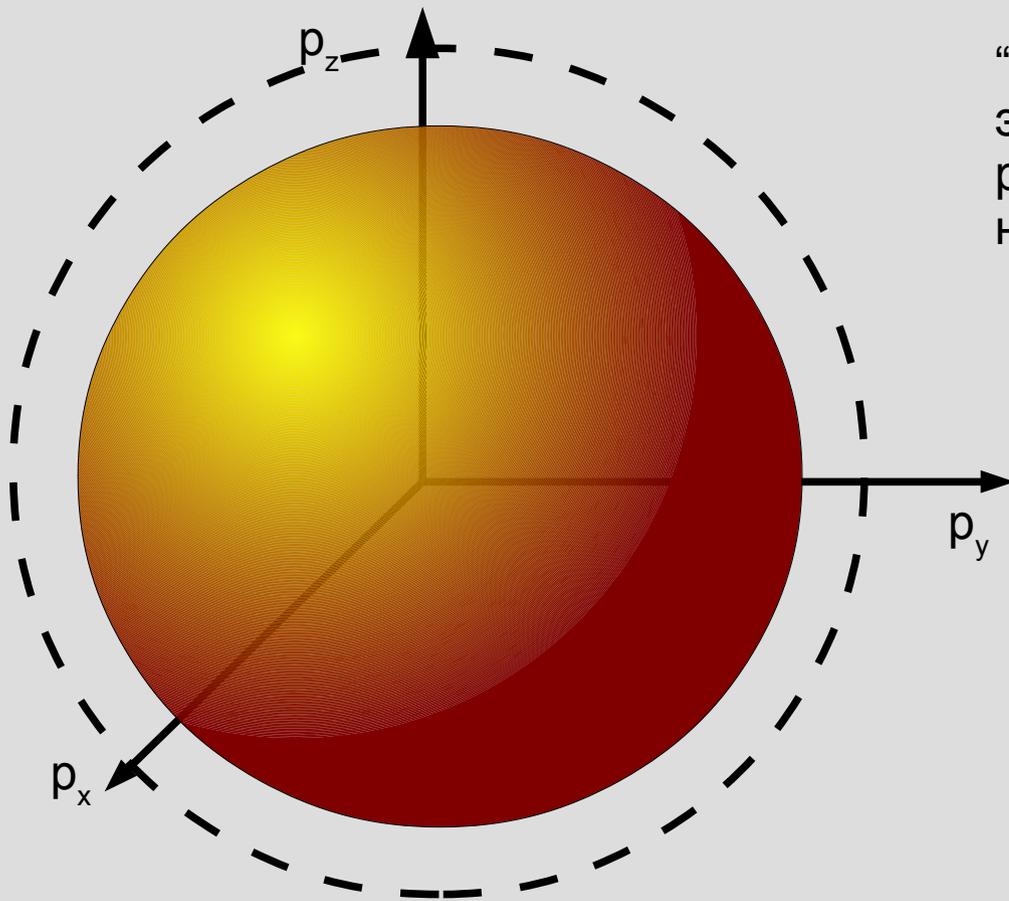
Энергия реально наблюдаемых фотоэлектронов распределена от максимума (фотоэмиссия с поверхности Ферми) до некоторого минимума (фотоэмиссия электронов “с нулевым импульсом”).

Это позволяет измерить энергию Ферми независимо.

Теплоёмкость электронного газа

Хорошие металлы (медь, золото) имеют при комнатной температуре теплоёмкость описываемую законом Дюлонга и Пти: $3R$ на моль

“Одноатомный газ свободных электронов” должен по теореме о равномерном распределении добавить ещё $3/2R$, но этого не наблюдается – почему?

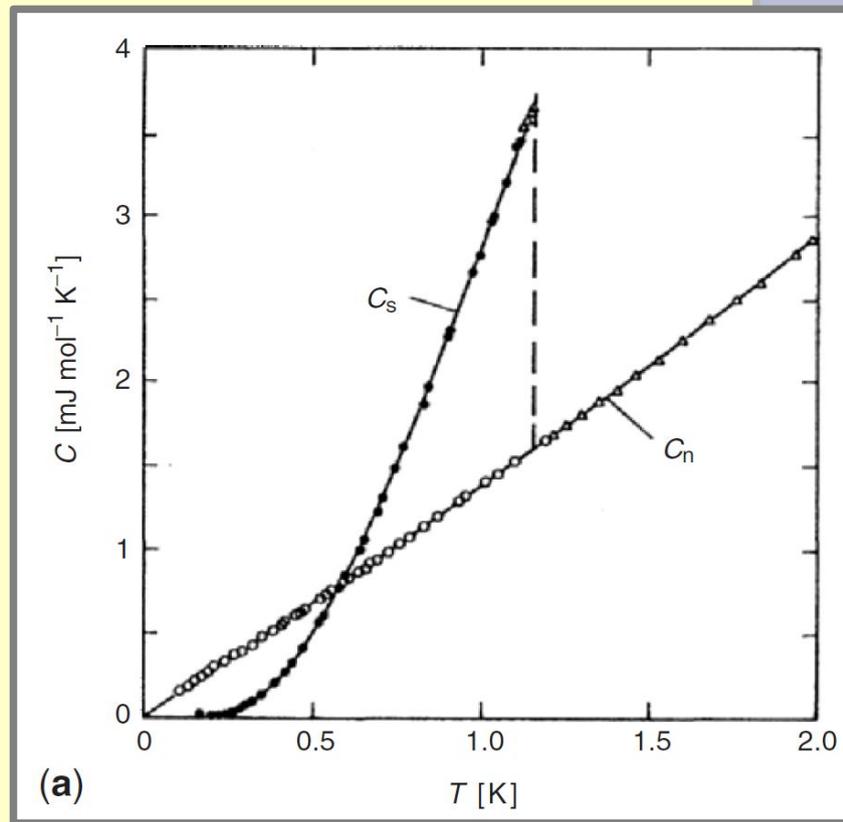


Из-за запрета Паули в тепловом движении участвуют только электроны вблизи поверхности Ферми, а их мало!

$$\frac{\delta p}{p_F} = \frac{1}{2} \frac{\delta E}{E_F} = \frac{1}{2} \frac{k_B T}{E_F}$$

$$\frac{\delta N}{N} \simeq \frac{4\pi p_F^2 \delta p}{\frac{4}{3}\pi p_F^3} = 3 \frac{\delta p}{p_F}$$

$$C \simeq \frac{3}{2} R \times \frac{k_B T}{E_F}$$



(a) F.Pobell, Matter and Methods at Low Temperatures, 2007

НЕЮТ
НОМ

3/2R,

В

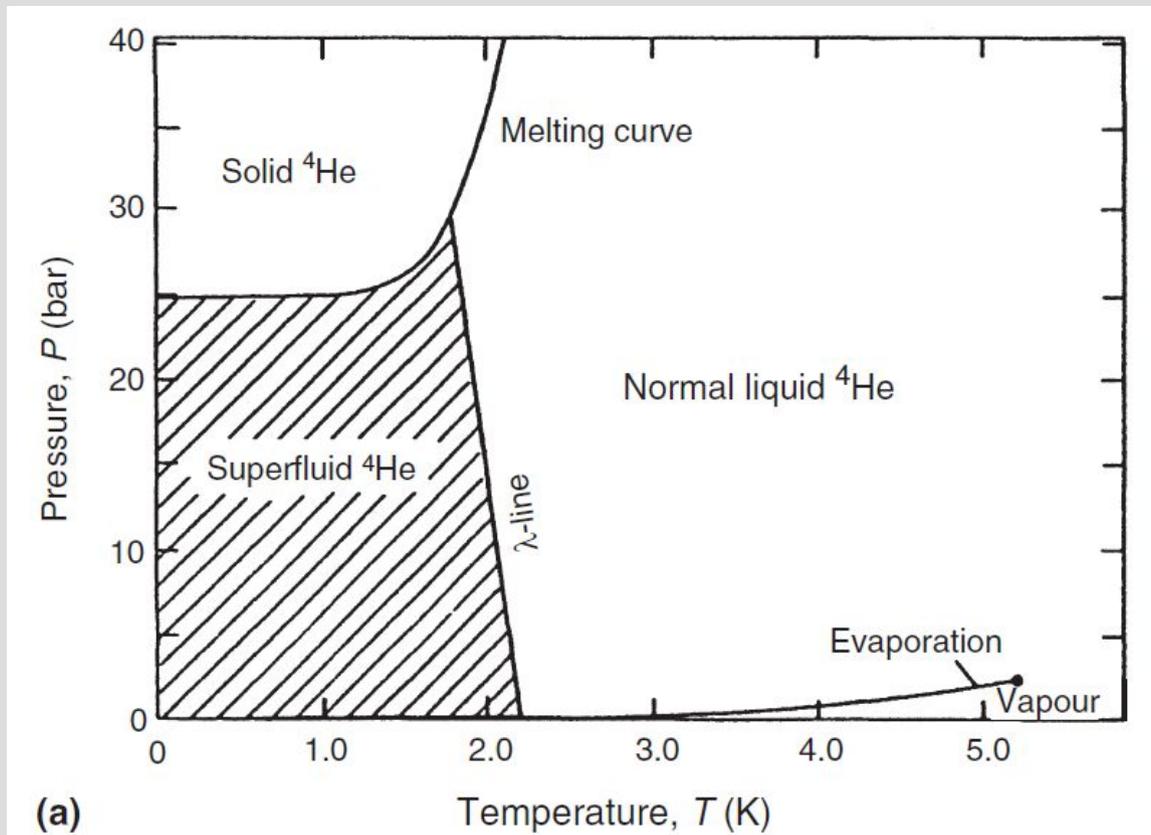
ТЕПЛОВОМ ДВИЖЕНИИ
УЧАСТВУЮТ ТОЛЬКО
ЭЛЕКТРОНЫ ВБЛИЗИ
ПОВЕРХНОСТИ ФЕРМИ, А ИХ
МАЛО!

p_y

p_x

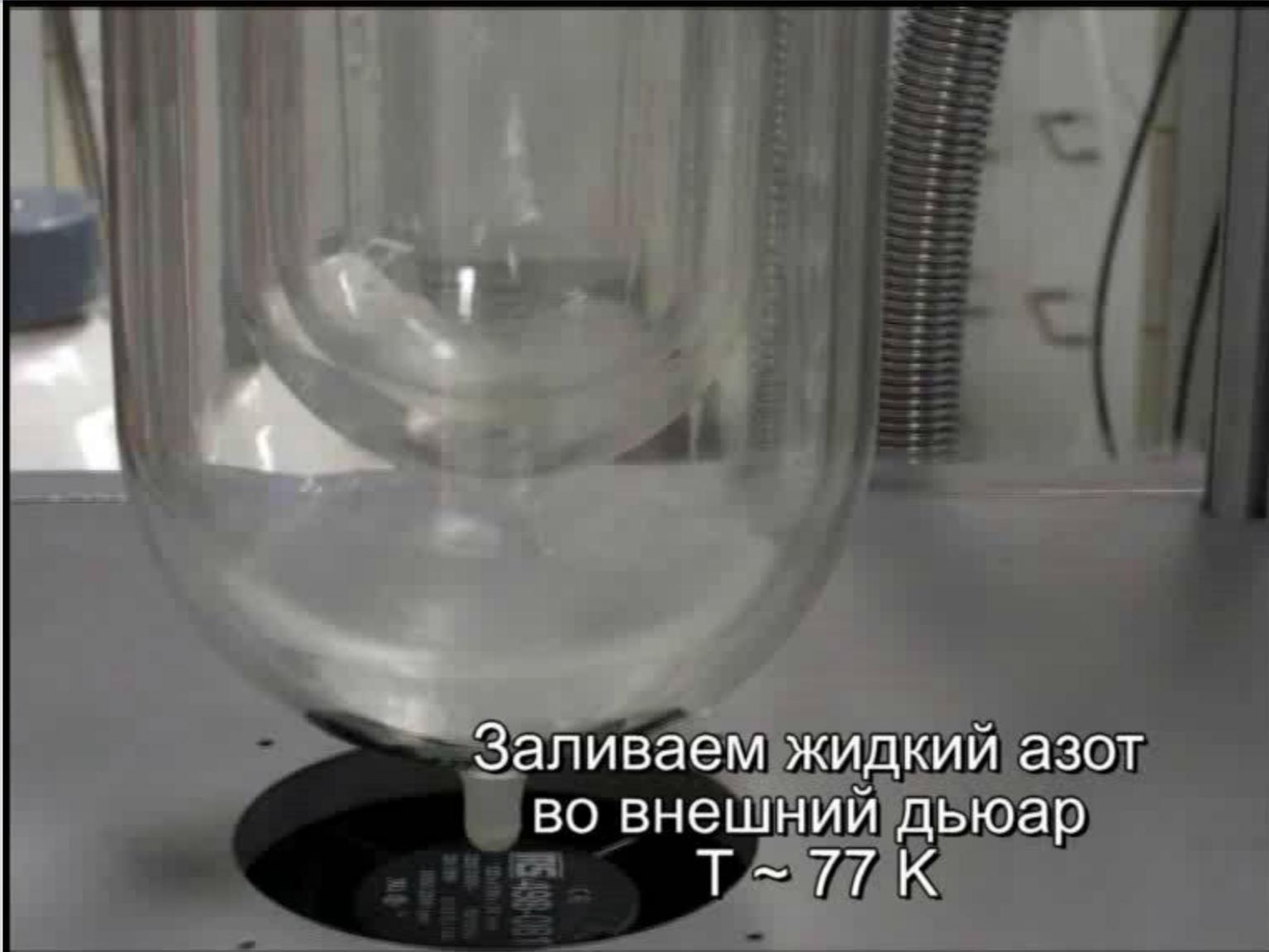
Сверхтекучесть

П.Л.Капица (1978),
Л.Д.Ландау (1962)

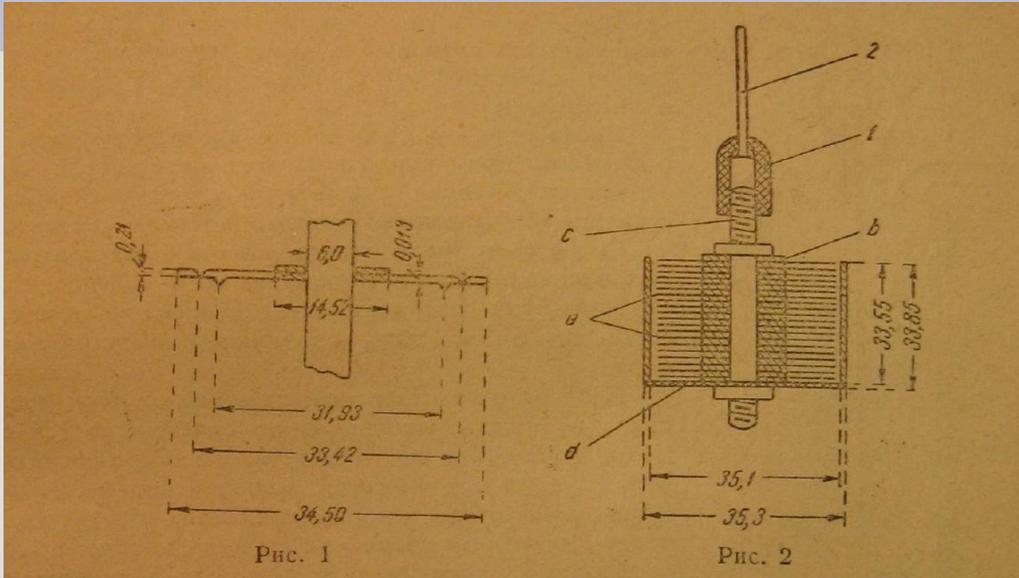


Фазовая диаграмма гелия-4. На вставке: кривые кипения гелия-4 и гелия-3 при давлении ниже 1 бар. На кривой кипения λ-точка гелия-4 соответствует давлению около 38 мм. ртутного столба.

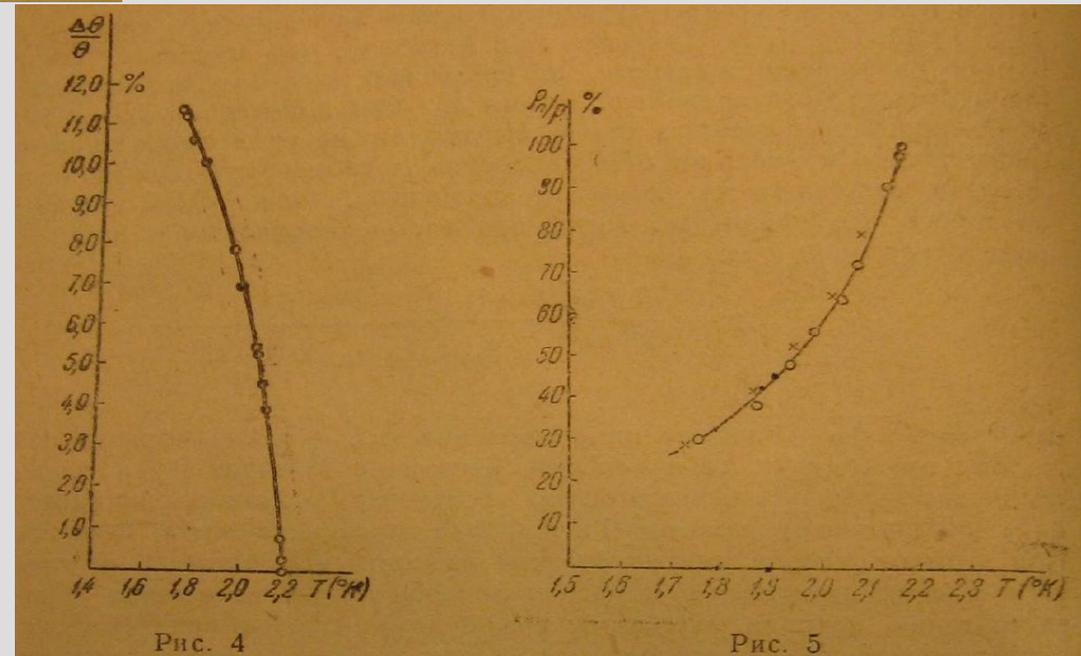
Эксперимент 1



Эксперимент 2



Андроникашвили Э.Л., Непосредственное наблюдение двух видов движения в гелии II., ЖЭТФ, 16, 780 (1946)



Эксперимент 3



Эксперимент 4



Важность бозе-статистики гелия-4

Макроскопическое недиссипативное движение жидкости, сверхтекучее движение не переносит тепла

Это движение есть свойство основного состояния квантовой жидкости, в котором оказывается большое число атомов.

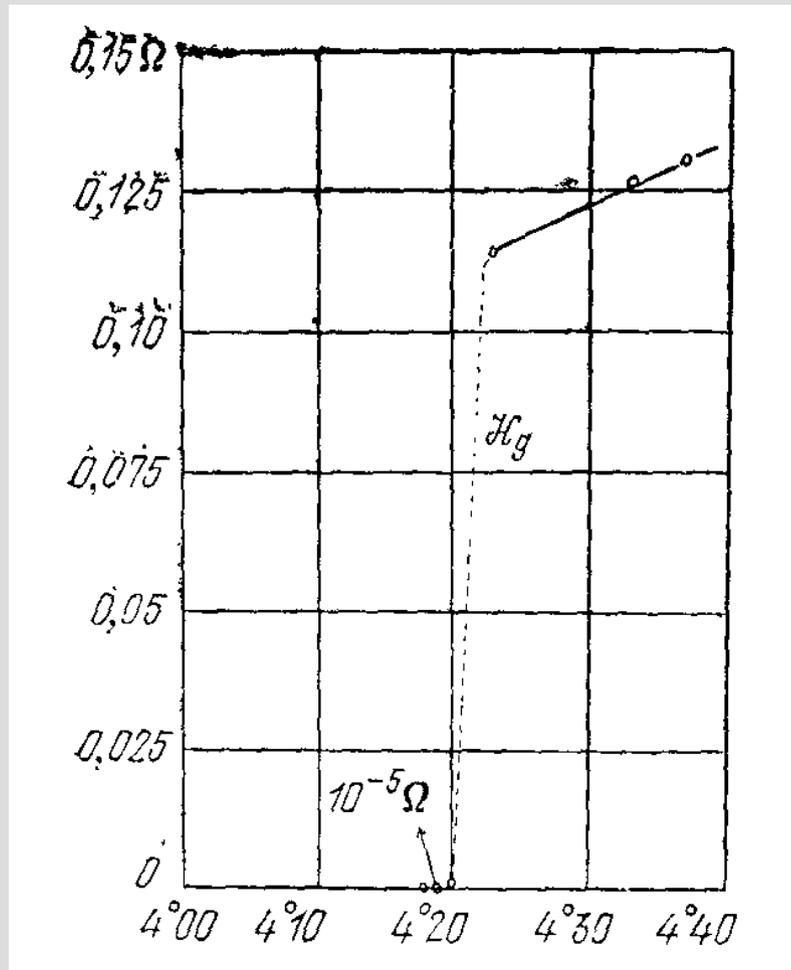
Это возможно только благодаря бозе-статистике гелия-3.

Сверхпроводимость



Камерлинг Оннес (1913),
Бардин, Купер, Шриффер (1972),
Мюллер, Беднорц (1987)
Гинзбург, Абрикосов (2003)

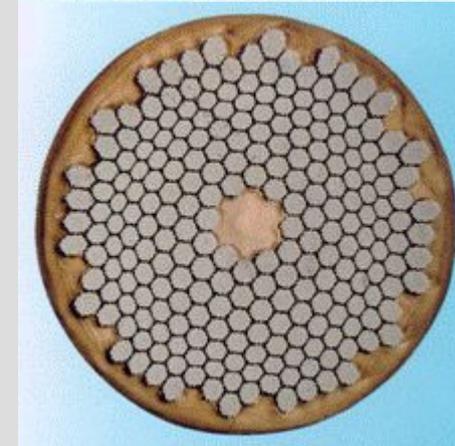
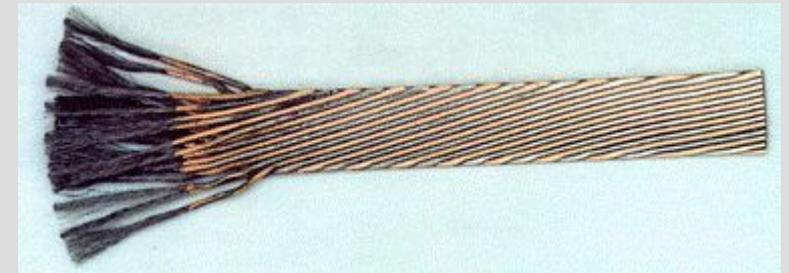
сверхтекучесть гелия-3:
Ошеров, Ричардсон, Ли (1996)
Леггет (2003)



Применение



<http://en.wikipedia.org/wiki/Superconductor>



CERN, LHC Machine Outreach: Super conducting cable, 2015, <http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/components/cable.htm>



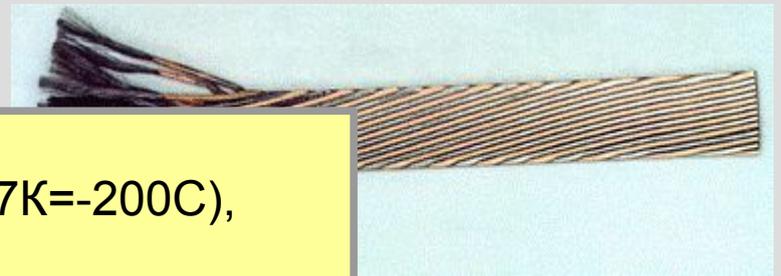
<http://investinet.ru>

Применение



Требуется охлаждение до хотя бы азотных ($77\text{K}=-200\text{C}$), а чаще гелиевых ($4\text{K}=-270\text{C}$) температур

Сверхпроводимость разрушается током и магнитным полем



<http://en.wikipedia.org/wiki/Superconductor>



<http://investinet.ru>

CERN, LHC Machine Outreach: Super conducting cable, 2015, <http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/components/cable.htm>

Понятие о куперовских парах

Похоже на сверхтекучесть – но электроны являются ферми-частицами!!!

Выход: объединить электроны в пары (эффективное притяжение при посредничестве положительного ионного остова кристалла). Пары оказываются бозе-частицами и могут “сверхтечь”.

Носитель заряда в сверхпроводнике имеет заряд $2e$!!!
(подтверждено многими опытами)

Разваливание пар при ударе о дефекты качественно объясняет существование критической плотности тока, когда энергия связи окажется меньше кинетической энергии.

Эксперимент 1



Эксперимент 2



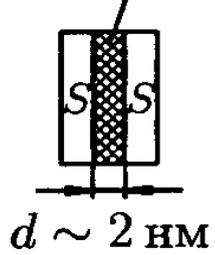
Эксперимент 3



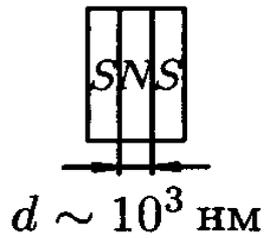
Эффект Джозефсона



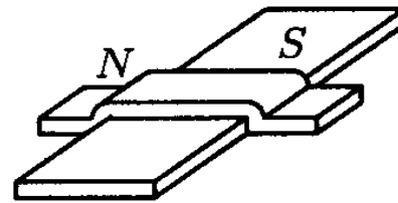
Изолятор



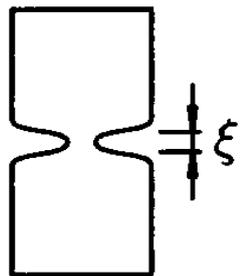
а)



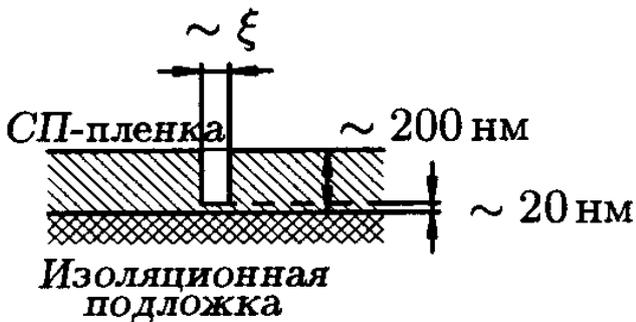
б)



в)



г)

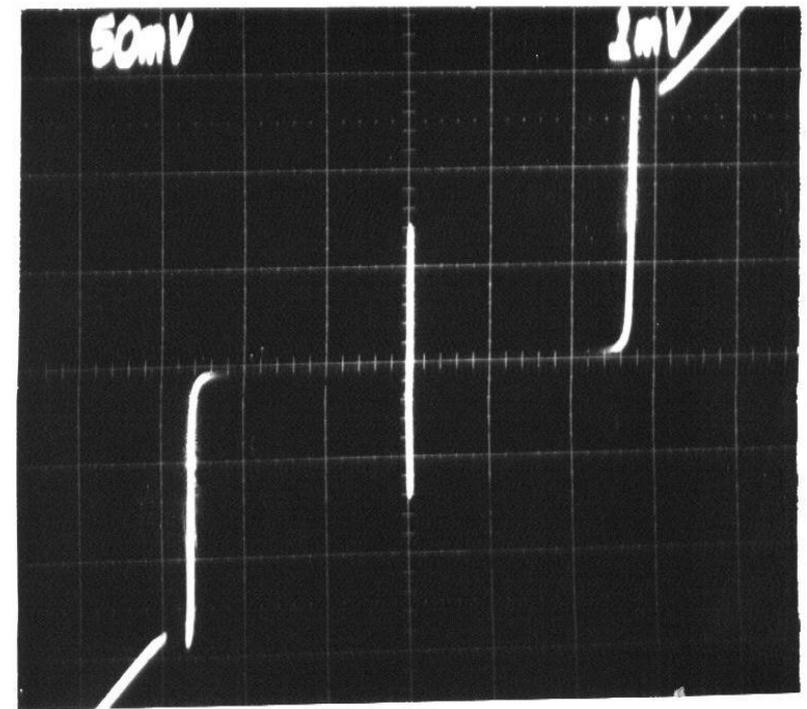


д)



е)

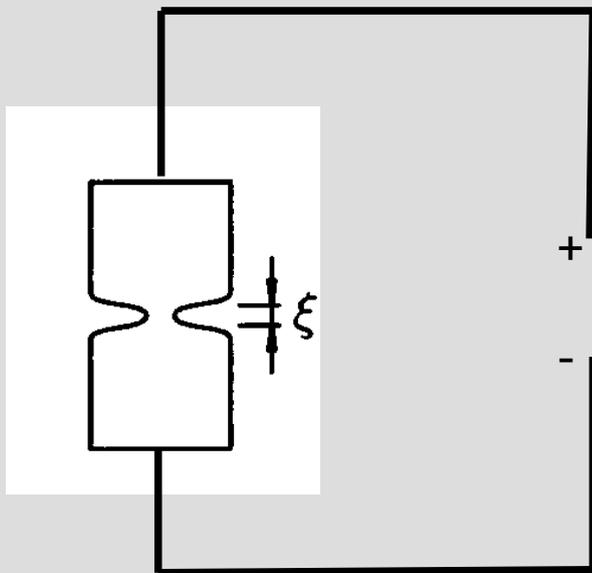
Джозефсон
(1973)



Шмидт В.В., Введение в физику сверхпроводников, 2000

Осциллограмма вольт-амперной характеристики джозефсоновского контакта. Шкала по горизонтали 1 мВ, по вертикали 50 мкА.

Нестационарный эффект Джозефсона



При переходе через туннельный барьер куперовская пара должна избавиться от “лишней” энергии $2eU$.

Переход излучает на частоте $\omega \approx \frac{2eU}{\hbar}$

Частота измеряется очень точно – эффект Джозефсона используется как стандарт вольты

Задачи домашнего задания

Задача 1.

Плотность жидкого гелия равна 0.12 г/см^3 . В приближении идеального газа оценить температуру при которой длина волны де Бройля атома гелия становится сравнима с расстоянием между атомами. Сравнить ответ с температурой перехода в сверхтекучее состояния (2.2K).

Задача 2.

К туннельному контакту двух сверхпроводников (сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник) приложено напряжение 1 мВ . Найдите частоту излучаемых электромагнитных волн при протекании джозефсоновского туннельного тока через такой контакт.