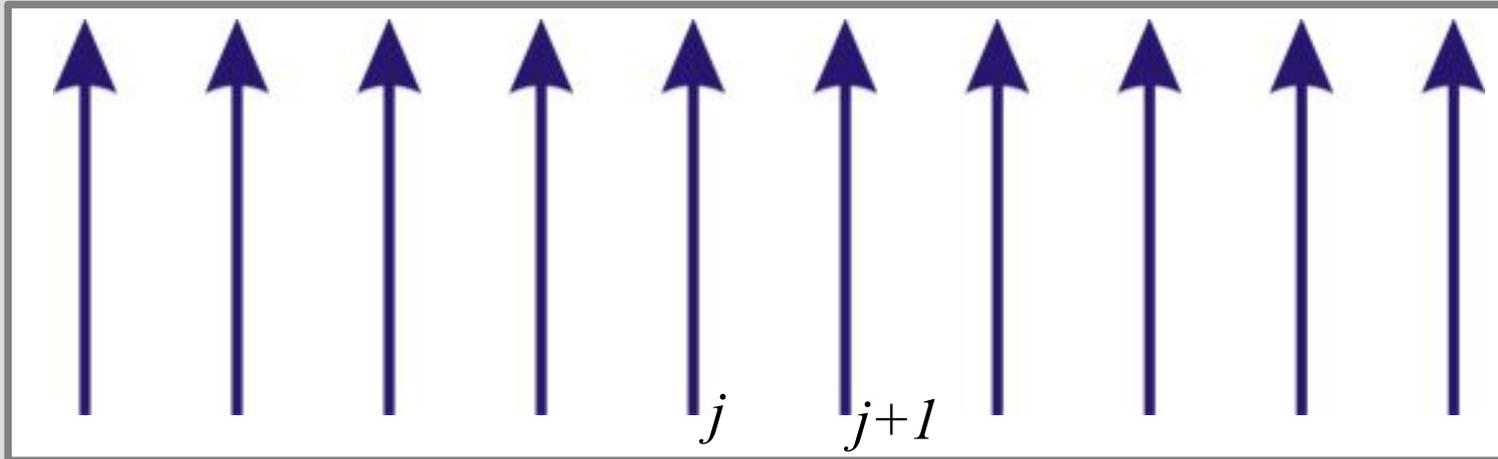


# Квантовая макрофизика.

## Лекция 14: Разное...



# Задача 1. Квантовое рассмотрение задачи о насыщении антиферромагнетика в большом поле.

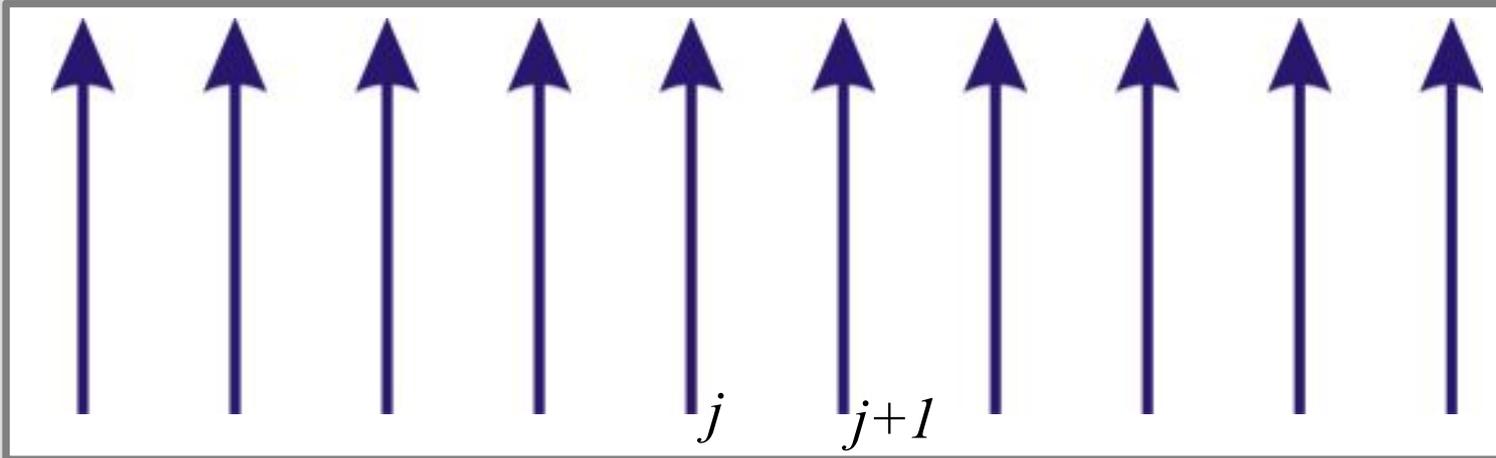


$$S = 1/2$$

$$\hat{H} = J \sum_j \hat{\vec{S}}_j \hat{\vec{S}}_{j+1} - 2\mu_B B \sum_j \hat{S}_{Z,j}$$

$$\psi_0 = |\dots ++++++ \dots\rangle$$

# Задача 1. Квантовое рассмотрение задачи о насыщении антиферромагнетика в большом поле.



$$S = 1/2$$

$$\hat{H} = J \sum_j \hat{\vec{S}}_j \hat{\vec{S}}_{j+1} - 2\mu_B B \sum_j \hat{S}_{Z,j}$$

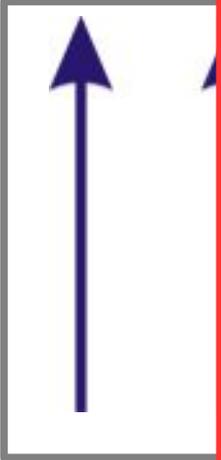
$$\psi_0 = |\dots ++++++ \dots \rangle$$

$$\psi_n = |\dots ++++++ - ++++++ \dots \rangle$$

$$\psi(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum e^{ikR_n} \psi_n$$

# Задача 1. Квантовое рассмотрение задачи о насыщении антиферромагнетика

в большой цепи



$$\hat{H} \psi(k) = \left[ J \sum \left( S_j^z S_{j+1}^z + \frac{S_j^+ S_{j+1}^- + S_j^- S_{j+1}^+}{2} \right) - 2\mu_B B \sum S_j^z \right] \psi(k) =$$

$$= \left( N_{\text{связей}} J \frac{1}{4} - 2 \times 2 \times J \times \frac{1}{4} \right) \psi(k) + \frac{J}{2} (e^{ika} + e^{-ika}) \psi(k) -$$

$$- 2\mu_B B \left( \frac{N_{\text{спинов}}}{2} - 1 \right) \psi(k)$$

$$S = 1/2$$

$$\hat{H} = J \sum_j \hat{\vec{S}}_j \hat{\vec{S}}_{j+1} - 2\mu_B B \sum_j \hat{S}_{z,j}$$

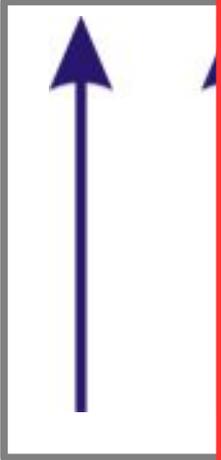
$$\psi_0 = |\dots ++++++ \dots\rangle$$

$$\psi_n = |\dots +++++-++++ \dots\rangle$$

$$\psi(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum e^{ikR_n} \psi_n$$

# Задача 1. Квантовое рассмотрение задачи о насыщении антиферромагнетика

в большой цепи



$$\hat{H} \psi(k) = \left[ J \sum \left( S_j^z S_{j+1}^z + \frac{S_j^+ S_{j+1}^- + S_j^- S_{j+1}^+}{2} \right) - 2\mu_B B \sum S_j^z \right] \psi(k) =$$

$$= \left( N_{\text{связей}} J \frac{1}{4} - 2 \times 2 \times J \times \frac{1}{4} \right) \psi(k) + \frac{J}{2} (e^{ika} + e^{-ika}) \psi(k) -$$

$$- 2\mu_B B \left( \frac{N_{\text{спинов}}}{2} - 1 \right) \psi(k)$$

$$S = 1/2$$

$$\hat{H} = J \sum_j \hat{S}_j \hat{S}_{j+1} - 2$$

$$E = E_0 + J \cos(ak) - J + 2\mu_B B$$

$$\varepsilon = J \cos(ak) - J + 2\mu_B B$$

$$\psi_0 = |\dots ++++++ \dots \rangle$$

$$\psi_n = |\dots ++++++ - ++++++ \dots \rangle$$

$$\psi(k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum e^{ikR_n} \psi_n$$

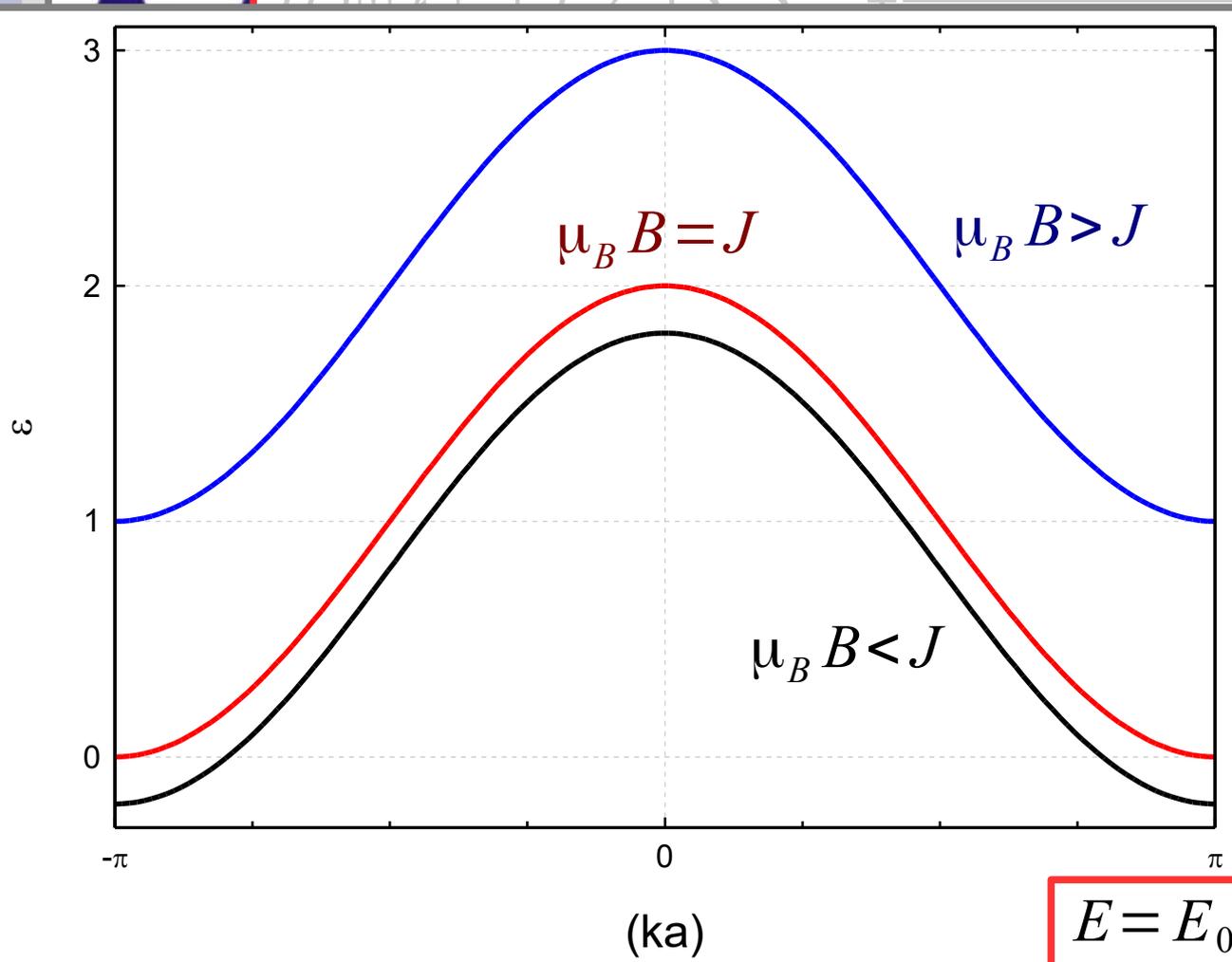
# Задача 1. Квантовое рассмотрение задачи о насыщении антиферромагнетика

в большом поле

$$\hat{H}_0 \psi(k) = \left[ J \sum (S_j^z S_{j+1}^z + \frac{S_j^+ S_{j+1}^- + S_j^- S_{j+1}^+}{2}) - 2\mu_B B \sum S_j^z \right] \psi(k) =$$

$$\frac{J}{2} (e^{ika} + e^{-ika}) \psi(k) -$$

$$\mu_B B \psi(k)$$

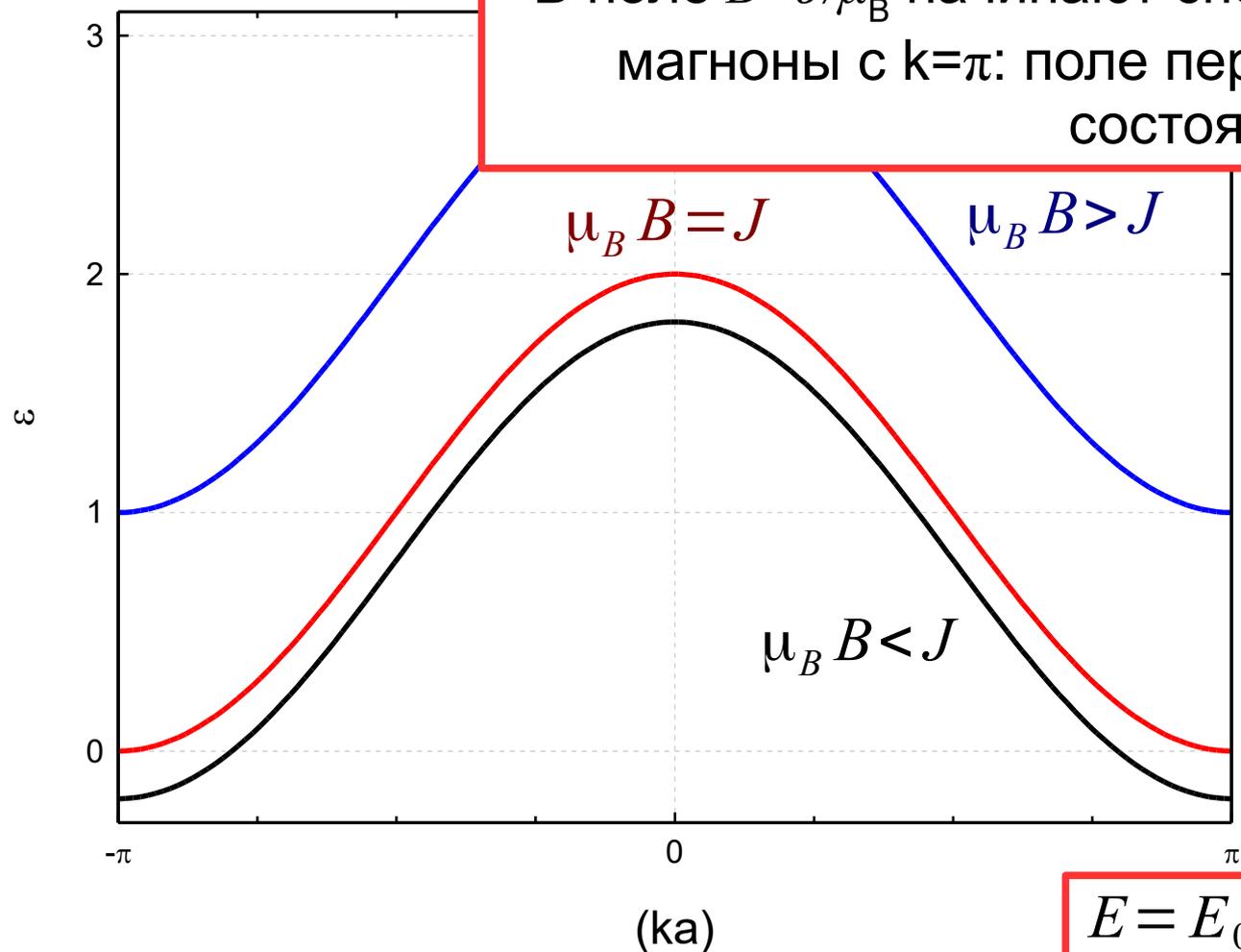


$$E = E_0 + J \cos(ak) - J + 2\mu_B B$$

$$\varepsilon = J \cos(ak) - J + 2\mu_B B$$

# Задача 1. Квантовое рассмотрение задачи о насыщении антиферромагнетика

В поле  $B = J/\mu_B$  начинают спонтанно образовываться магноны с  $k = \pi$ : поле перехода в насыщенное состояние.



$$E = E_0 + J \cos(ak) - J + 2\mu_B B$$

$$\varepsilon = J \cos(ak) - J + 2\mu_B B$$

# Часть 2. Магнитные поля в современной физике

# Магнитные поля в современной физике

В природе:

- поле Земли  $\sim 1$  Гс
- поле на Солнце  $\sim 5$  кГс
- магнитные поля в атоме
- .....
- поля для изменения атомных термов
- .....
- поля в некоторых звёздах (магнетар)  $\sim 10^{14}$  Гс



<https://en.wikipedia.org/wiki/Compass>



[www.noao.edu](http://www.noao.edu)

$$\sim \frac{\mu_B}{a^3} \sim 10^4 \text{ Гс}$$

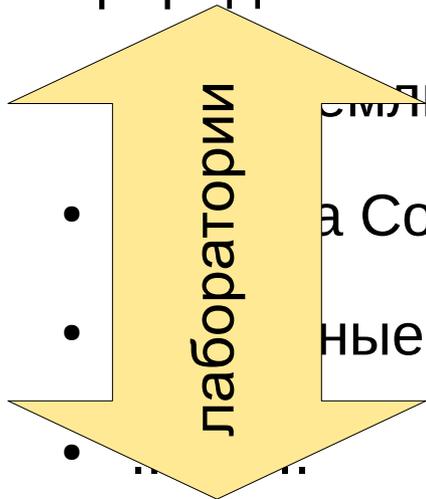
$$\sim \frac{1 \text{ эВ}}{\mu_B} \sim \frac{10^4 \times 10^{-16}}{10^{-20}} \sim 10^8 \text{ Гс} = 10 \text{ кТл}$$



<http://www.eso.org/public/images/eso1415a/>

# Магнитные поля в современной физике

В природе:



- поля Земли  $\sim 1$  Гс
- поля Солнца  $\sim 5$  кГс
- сильные поля в атоме
- .....
- поля для изменения атомных термов
- .....
- поля в некоторых звёздах (магнетар)  $\sim 10^{14}$  Гс



<https://en.wikipedia.org/wiki/Compass>



[www.noao.edu](http://www.noao.edu)

$$\sim \frac{\mu_B}{a^3} \sim 10^4 \text{ Гс}$$

$$\sim \frac{1 \text{ эВ}}{\mu_B} \sim \frac{10^4 \times 10^{-16}}{10^{-20}} \sim 10^8 \text{ Гс} = 10 \text{ кТл}$$



<http://www.eso.org/public/images/eso1415a/>

# Магнитные поля 1: до 2 Тл



резистивные водоохлаждаемые  
магниты с сердечником  
до 1.5-2 Тл  
вес около тонны  
мощность ~10 кВт

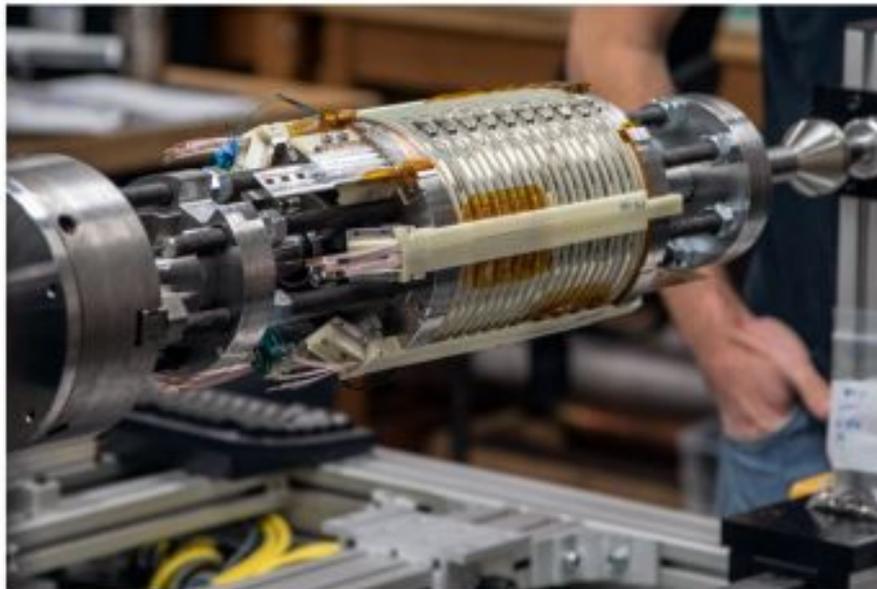
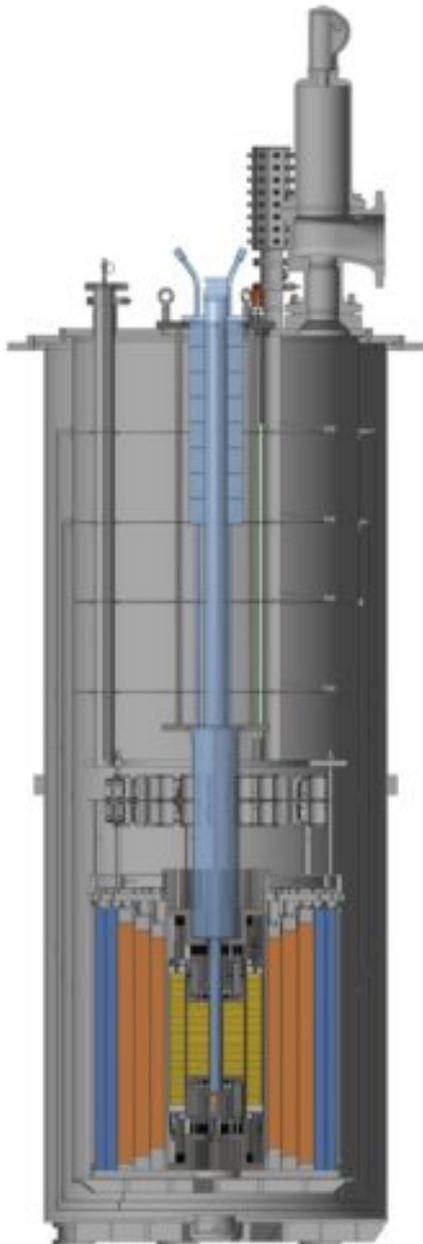
## Магнитные поля 2: 10-20 Тл

**СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ**

ограничено  $H_{c2}$   
(сверхпроводники II  
рода)  
требуют температур  
жидкого гелия



# Магнитные поля 2: рекордный СП-магнит



NHMFL, Талахаси,  
Флорида

Поле: 32Тл

# Магнитные поля 3: до 40 Тл

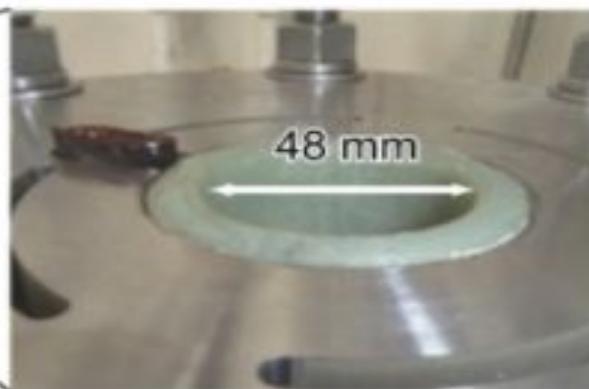
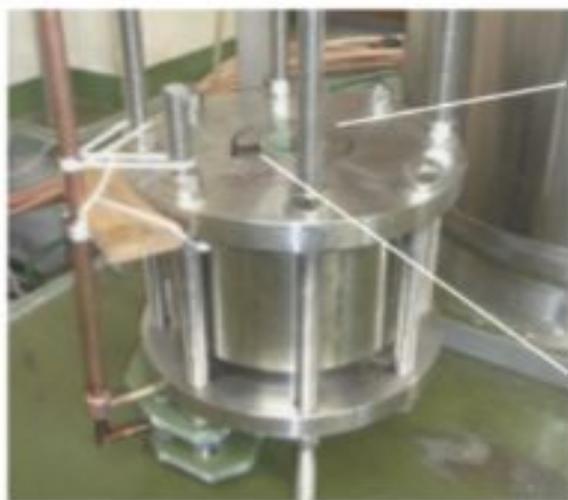
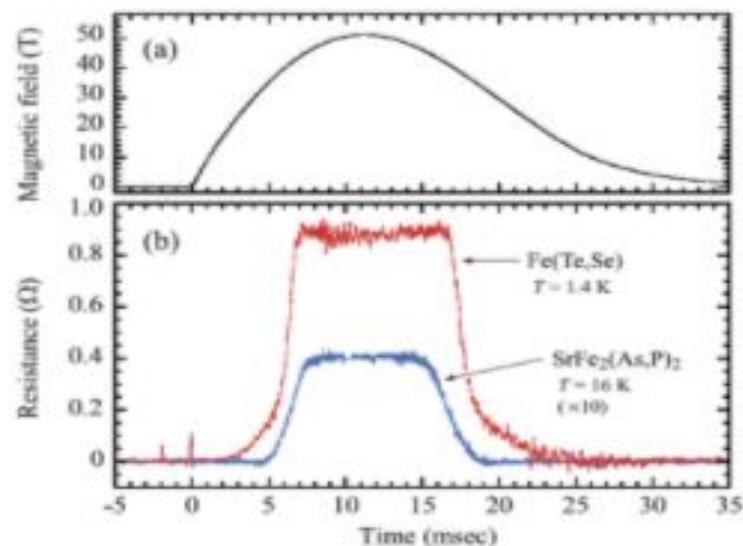
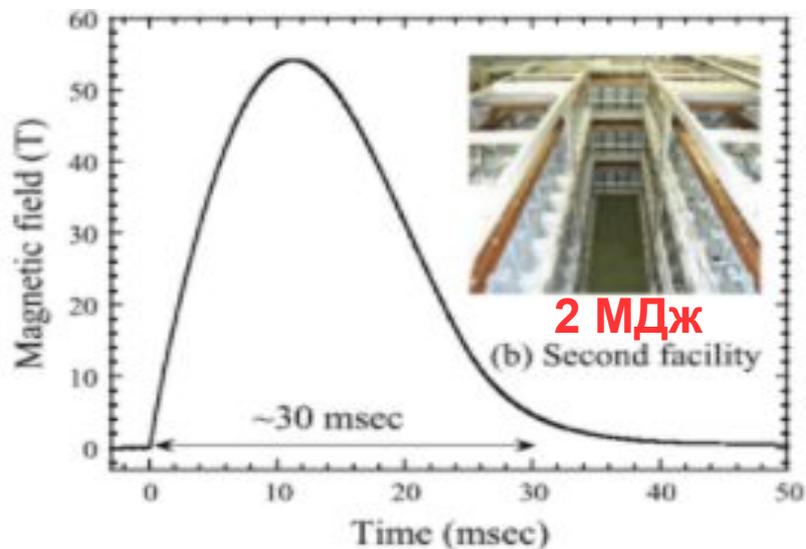
$$B = \mu_0 n I$$

$$W = I^2 \times R$$

35 Тл в области  
диаметром 30 мм,  
мощность 20 МВт



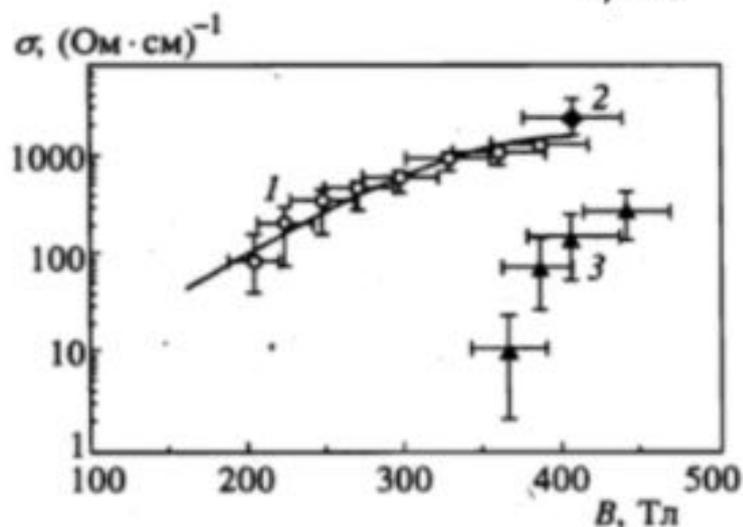
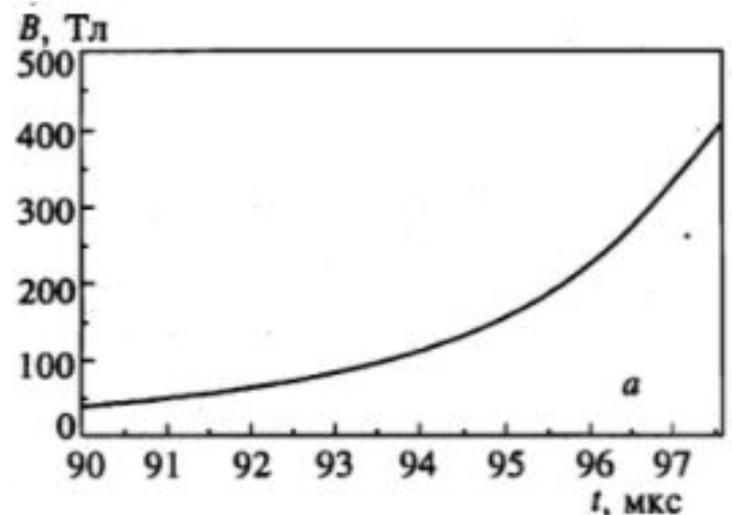
# Магнитные поля 4: Импульсные поля до 100 Тл



# Магнитные поля 5: Взрывное сжатие до 1000 Тл и даже выше...

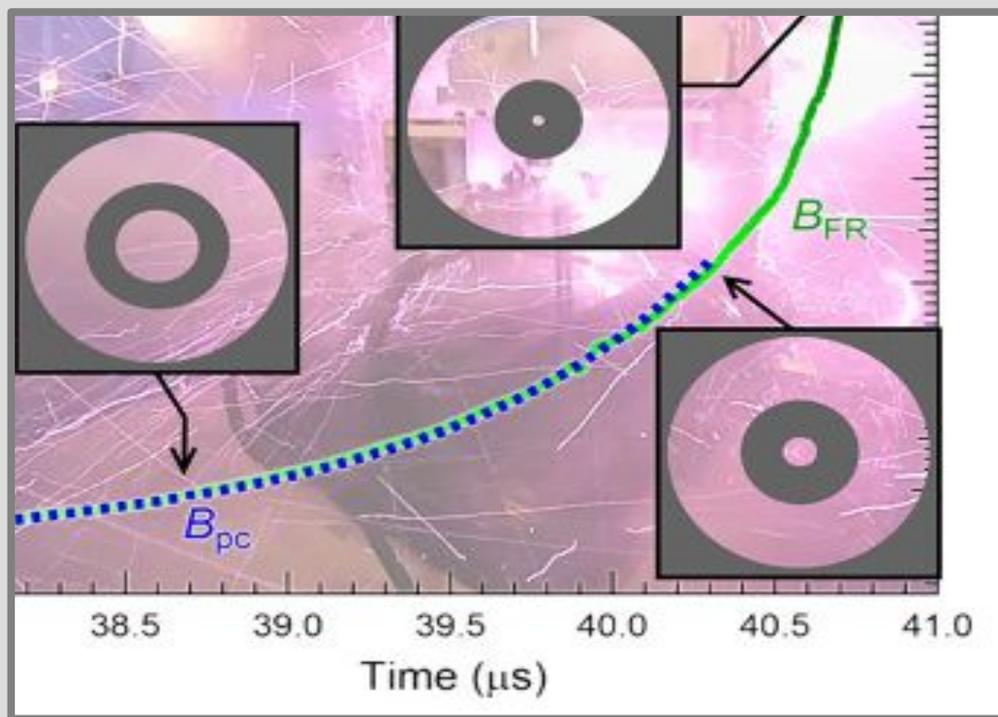


ВНИИЭФ (Саров)

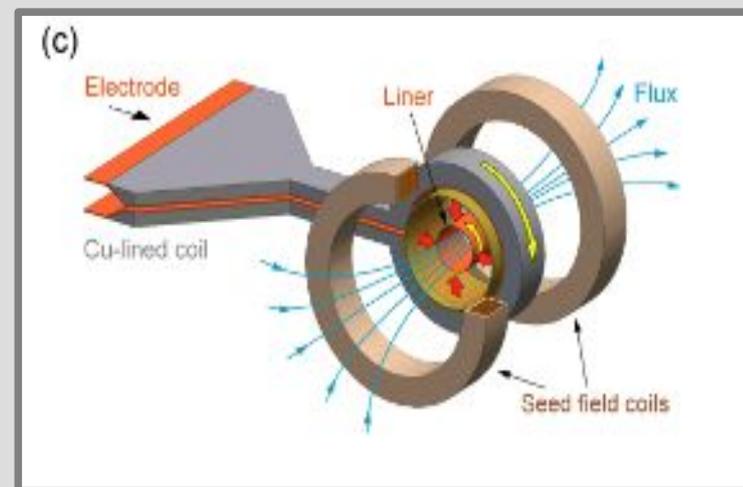


# Рекорд «комнатного» магнитного поля 2018

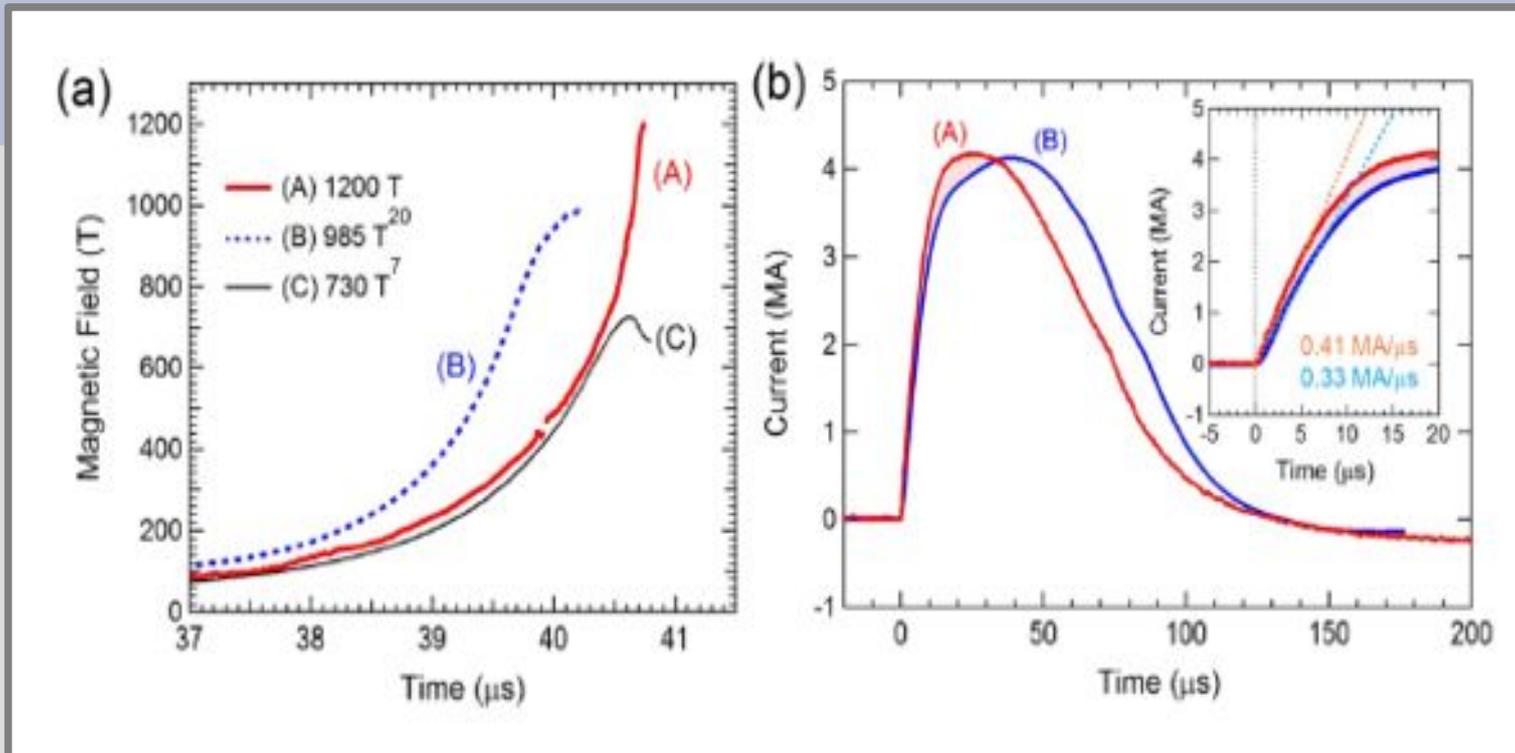
5 МДж, 4 МА, 5 км/сек =  
=1200 Тл



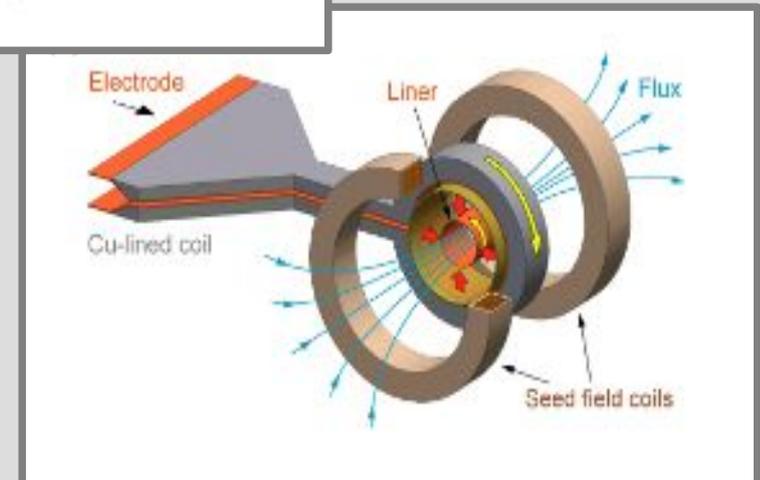
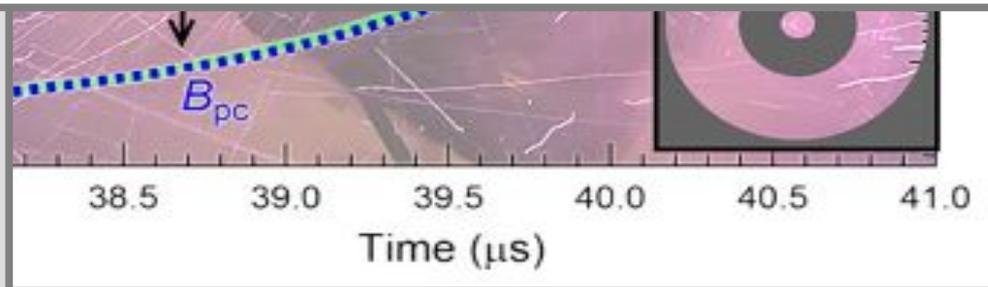
Review of Scientific Instruments 89, 095106  
(2018)



# Рекорд «комнатного» магнитного поля



, 5 км/сек =  
=1200 Тл



Review of Scientific Instruments 89, 095106  
(2018)

<https://spectrum.ieee.org/nanoclast/semiconductors/nanotechnology/magnetic-field-record-set-with-a-bang-1200-tesla>

## Часть 3. Металлы в магнитном поле.

# Магнетосопротивление (наивно)

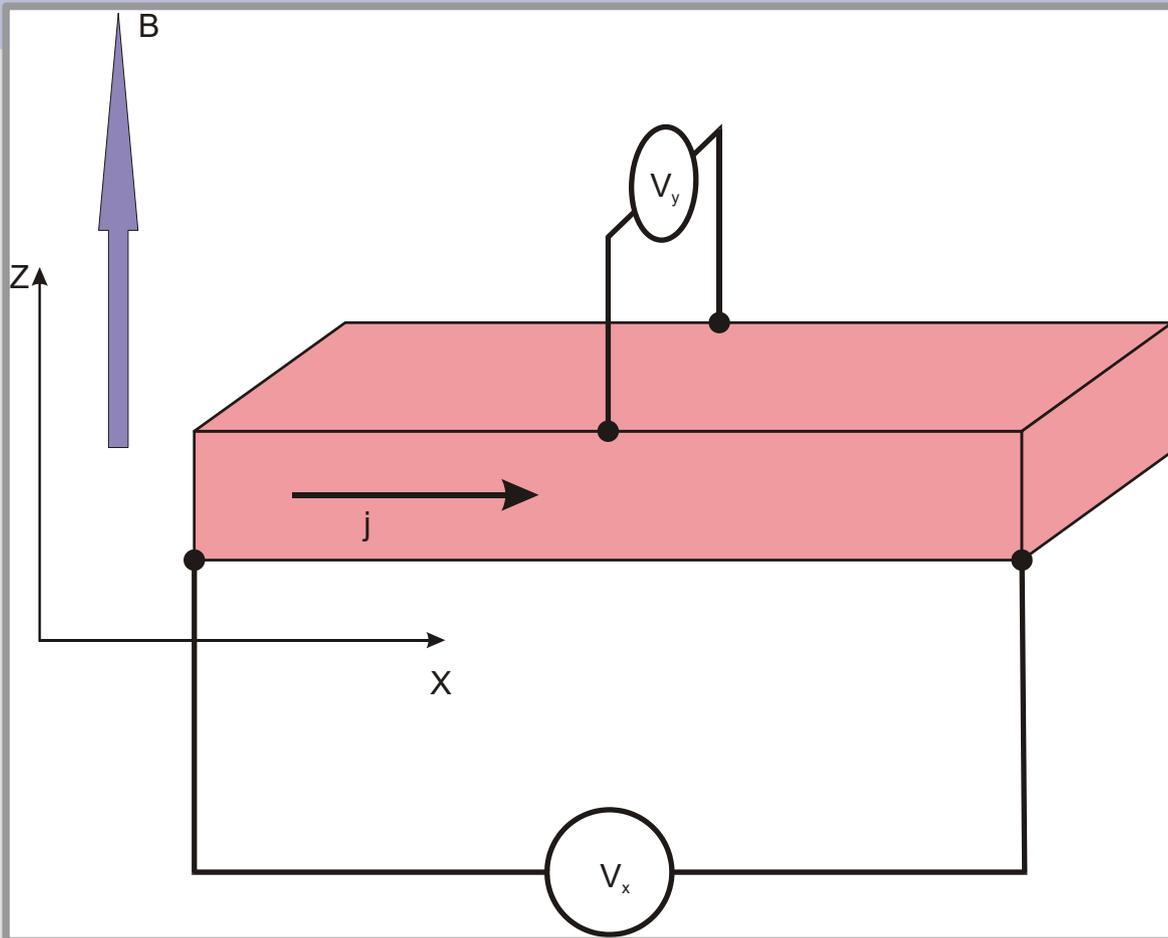


Схема опыта по измерению эффекта Холла.

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = q \vec{E} + \frac{q}{c} \vec{V} \times \vec{B}$$

$$\vec{V}_{op} = q \left( \vec{E} + \frac{1}{c} \vec{V}_{op} \times \vec{B} \right) \frac{\tau}{m}$$

$$\hat{\rho} = \frac{1}{\sigma_0} \begin{pmatrix} 1 & -\omega_c \tau \\ \omega_c \tau & 1 \end{pmatrix}$$

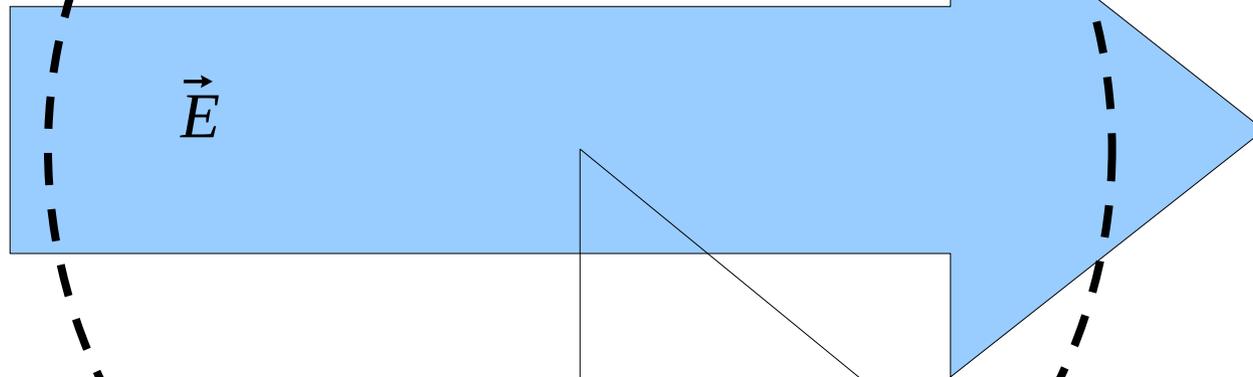
$$\sigma_0 = \frac{ne^2 \tau}{m}$$

$$\omega_c = \frac{eB}{mc}$$

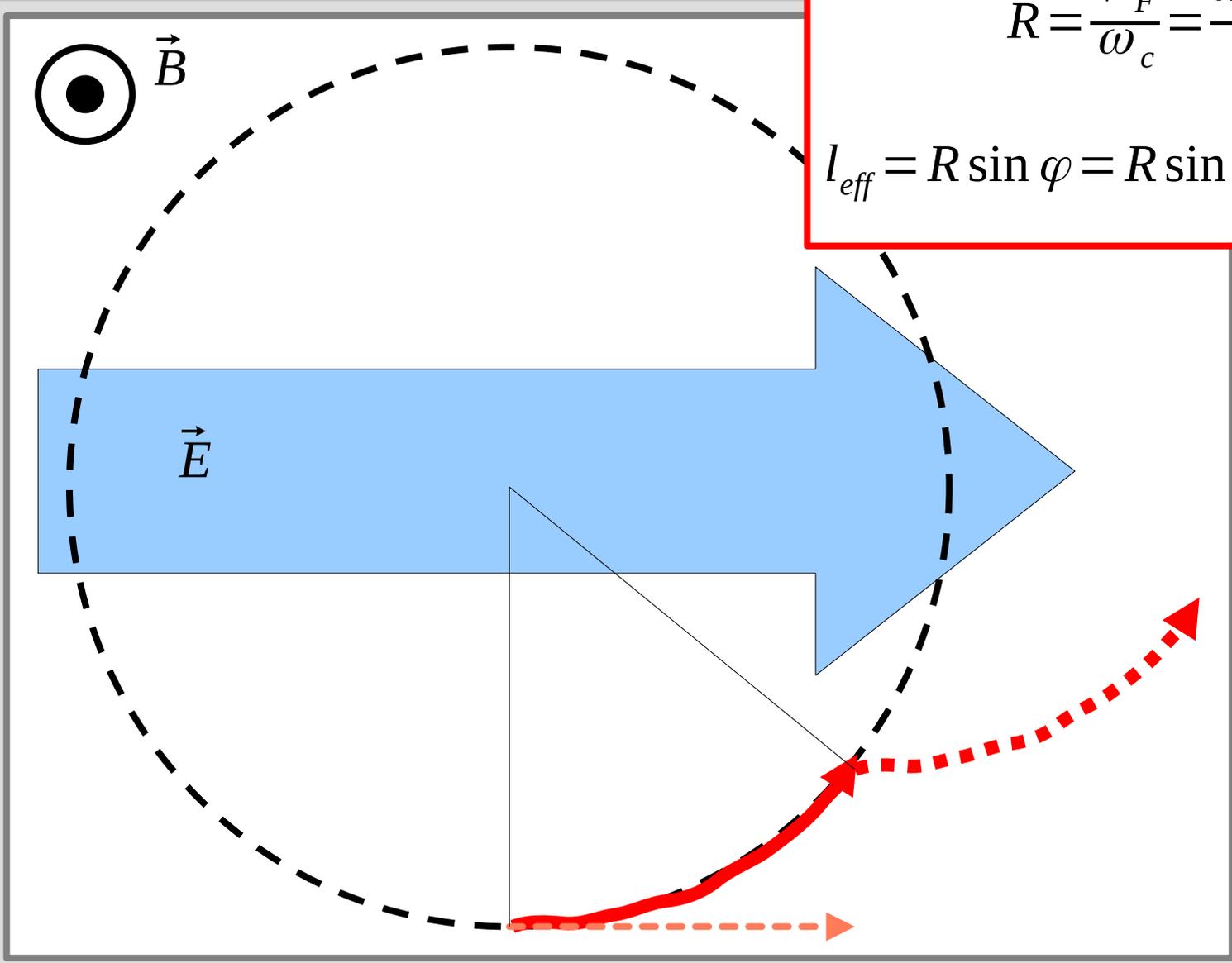
# Перенормировка длины пробега



$\vec{B}$



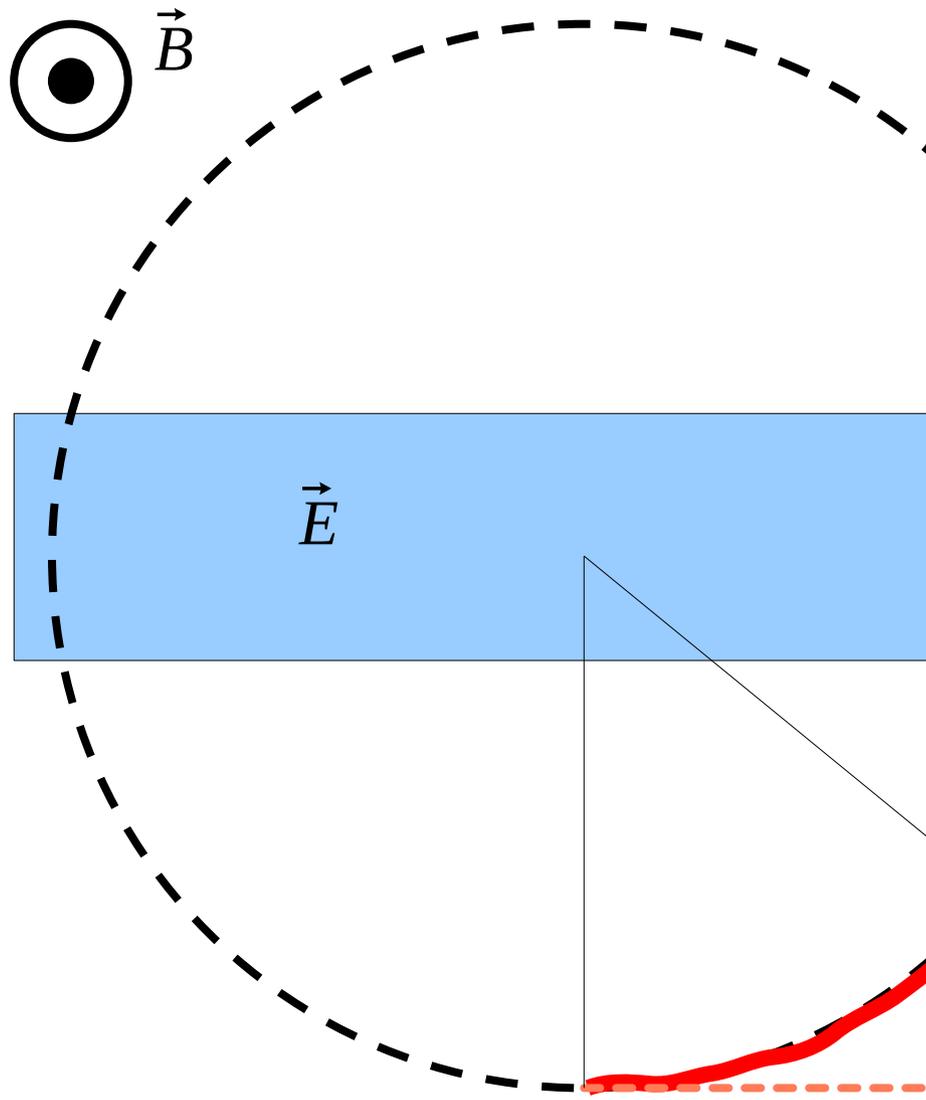
$\vec{E}$



$$R = \frac{V_F}{\omega_c} = \frac{mcV_F}{eB} \gg l$$

$$l_{eff} = R \sin \varphi = R \sin \frac{l}{R} = l \left( 1 - \frac{1}{6} \left( \frac{l}{R} \right)^2 \right)$$

# Перенормировка длины пробега



$$R = \frac{V_F}{\omega_c} = \frac{m c V_F}{e B} \gg l$$

$$l_{eff} = R \sin \varphi = R \sin \frac{l}{R} = l \left( 1 - \frac{1}{6} \left( \frac{l}{R} \right)^2 \right)$$

$$\sigma = \frac{n e^2 l_{eff}}{\rho_F} = \sigma_0 \left( 1 - \frac{1}{6} \left( \frac{e l_0}{c \rho_F} \right)^2 B^2 \right)$$

обычно - увеличение  $\rho_{xx}$

# Циклотронное движение при $l \gg R$

$$\hbar \frac{d\vec{k}}{dt} = -e \vec{E}$$

$$\hbar \frac{d\vec{k}}{dt} = -\frac{e}{c} [\vec{V}_{sp} \times \vec{B}]$$

# Циклотронное движение при $l \gg R$

$$\hbar \frac{d\vec{k}}{dt} = -e \vec{E}$$

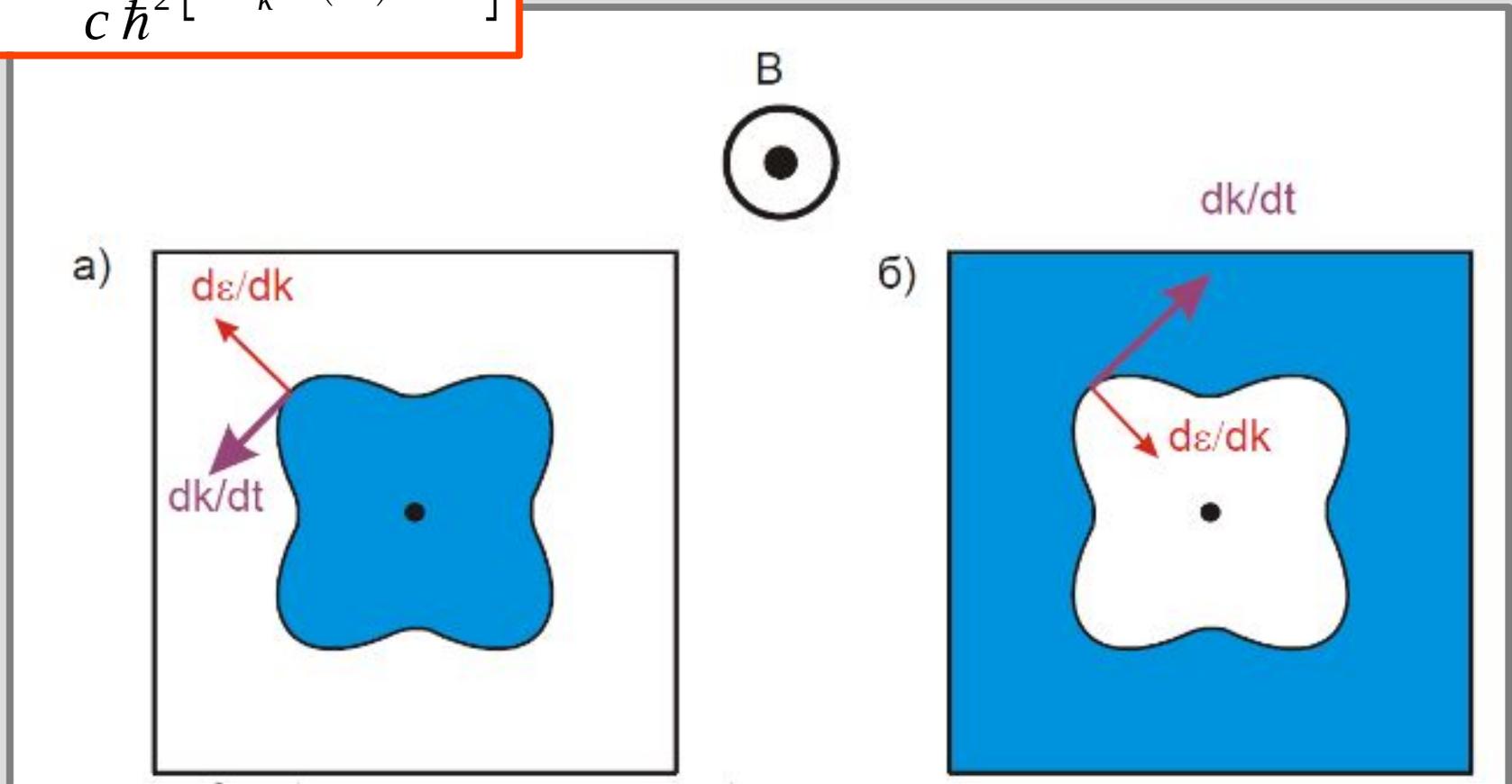
$$\hbar \frac{d\vec{k}}{dt} = -\frac{e}{c} [\vec{V}_{sp} \times \vec{B}]$$

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = -\frac{e}{c\hbar^2} [\vec{\nabla}_{\vec{k}} \varepsilon(\vec{k}) \times \vec{B}]$$

движение по изоэнергетическим  
поверхностям в  $k$ -пространстве!

# Циклотронное движение при $l \gg R$

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = -\frac{e}{c\hbar^2} \left[ \vec{\nabla}_{\vec{k}} \varepsilon(\vec{k}) \times \vec{B} \right]$$



# Период циклотронного движения

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = -\frac{e}{c\hbar^2} \left[ \vec{\nabla}_{\vec{k}} \varepsilon(\vec{k}) \times \vec{B} \right]$$

В  $k$ -пространстве электрон движется по некоторому сечению поверхности Ферми, перпендикулярному магнитному полю

# Период циклотронного движения

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = -\frac{e}{c\hbar^2} \left[ \vec{\nabla}_{\vec{k}} \varepsilon(\vec{k}) \times \vec{B} \right]$$

В k-пространстве электрон движется по некоторому сечению поверхности Ферми, перпендикулярному магнитному полю

$$\delta \vec{S} = \frac{1}{2} \left[ \vec{k}_{\perp} \times \frac{d\vec{k}}{dt} \right] \delta t = -\frac{e}{2\hbar^2 c} \left[ \vec{k}_{\perp} \times \left[ \vec{\nabla}_{\vec{k}} \varepsilon(\vec{k}) \times \vec{B} \right] \right] \delta t$$

# Период циклотронного движения

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = -\frac{e}{c\hbar^2} \left[ \vec{\nabla}_{\vec{k}} \varepsilon(\vec{k}) \times \vec{B} \right]$$

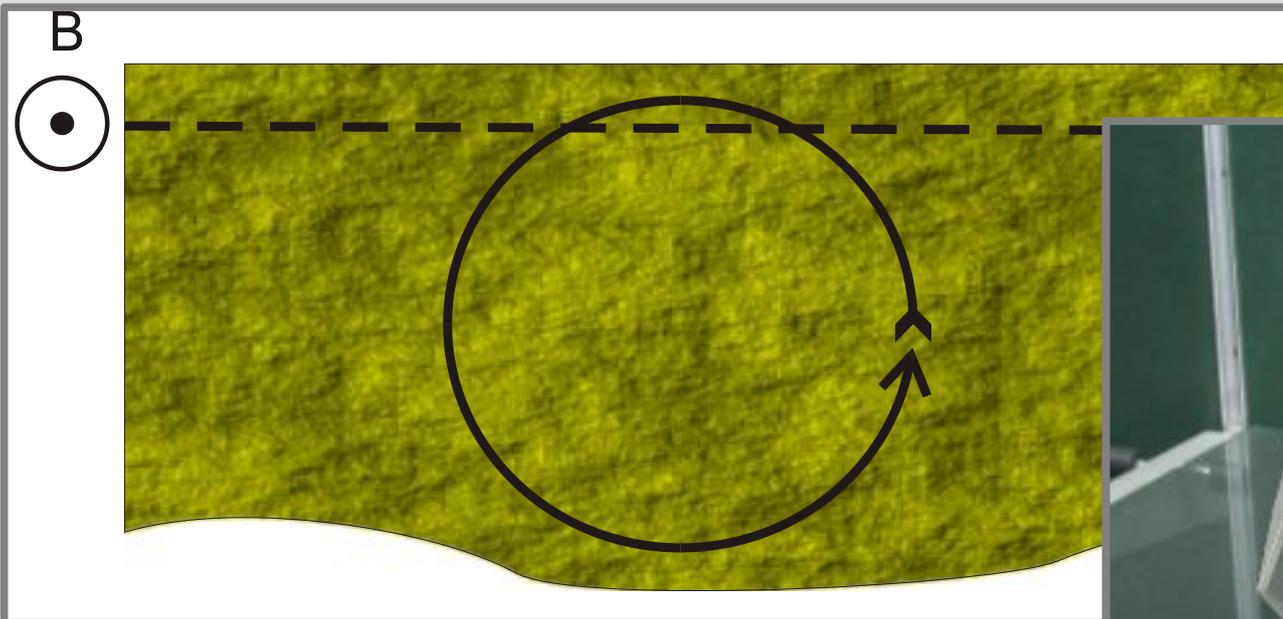
В  $k$ -пространстве электрон движется по некоторому сечению поверхности Ферми, перпендикулярному магнитному полю

$$\delta \vec{S} = \frac{1}{2} \left[ \vec{k}_{\perp} \times \frac{d\vec{k}}{dt} \right] \delta t = -\frac{e}{2\hbar^2 c} \left[ \vec{k}_{\perp} \times \left[ \vec{\nabla}_{\vec{k}} \varepsilon(\vec{k}) \times \vec{B} \right] \right] \delta t$$

$$T = \frac{2\hbar^2 c}{eB} \left| \oint \frac{\delta S}{(\vec{k}_{\perp} \cdot \vec{\nabla}_{\vec{k}} \varepsilon(\vec{k}))} \right| = \frac{\hbar^2 c}{eB} \left[ \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \right]_{\varepsilon = \varepsilon_F}$$

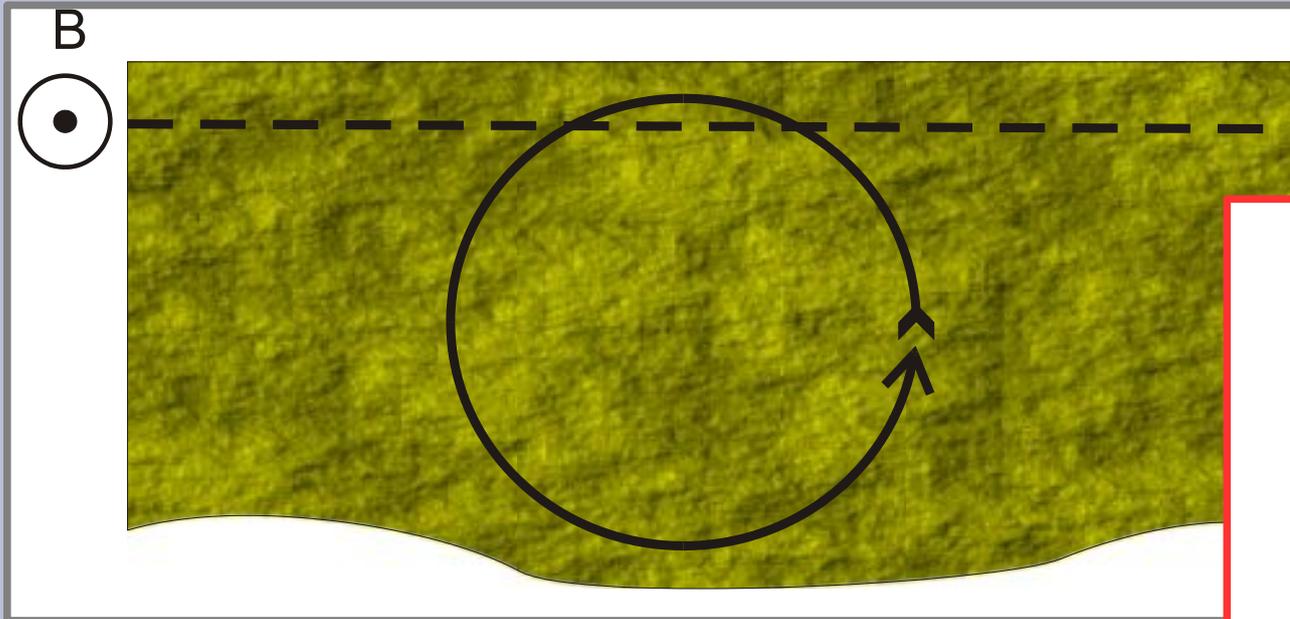
# Циклотронный резонанс

$$T = \frac{2\hbar^2 c}{eB} \left| \oint \frac{\delta S}{(\vec{k}_\perp \cdot \vec{\nabla}_{\vec{k}} \varepsilon(\vec{k}))} \right| = \frac{\hbar^2 c}{eB} \left[ \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \right]_{\varepsilon = \varepsilon_F} = 2\pi \frac{m_c c}{eB}$$



# Часть 4. Осцилляторные эффекты в квантующем магнитном поле.

# Циклотронные уровни в модели свободных электронов.



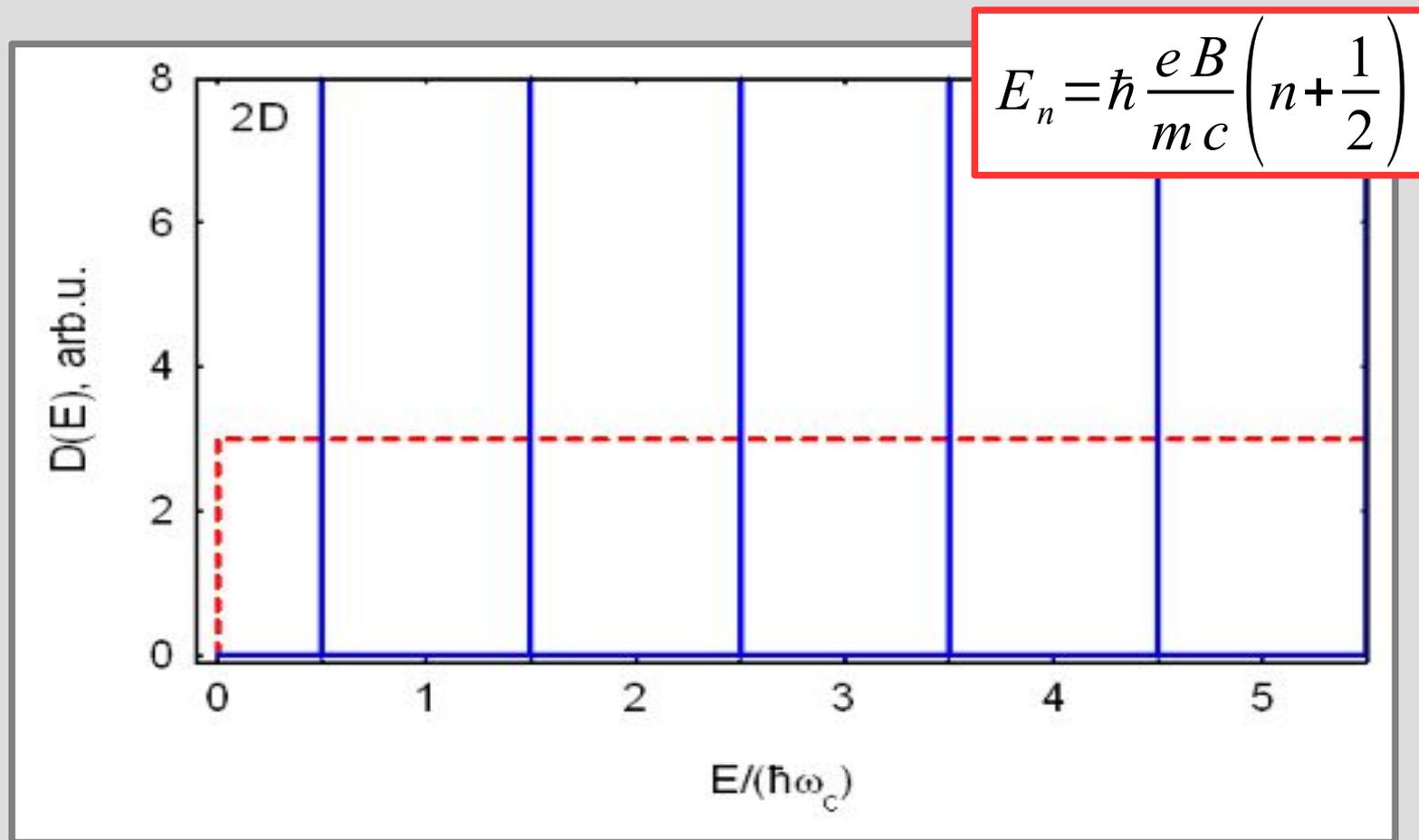
$$m \omega^2 R = \frac{e}{c} \omega R B$$

$$\omega_c = \frac{e B}{m c}$$

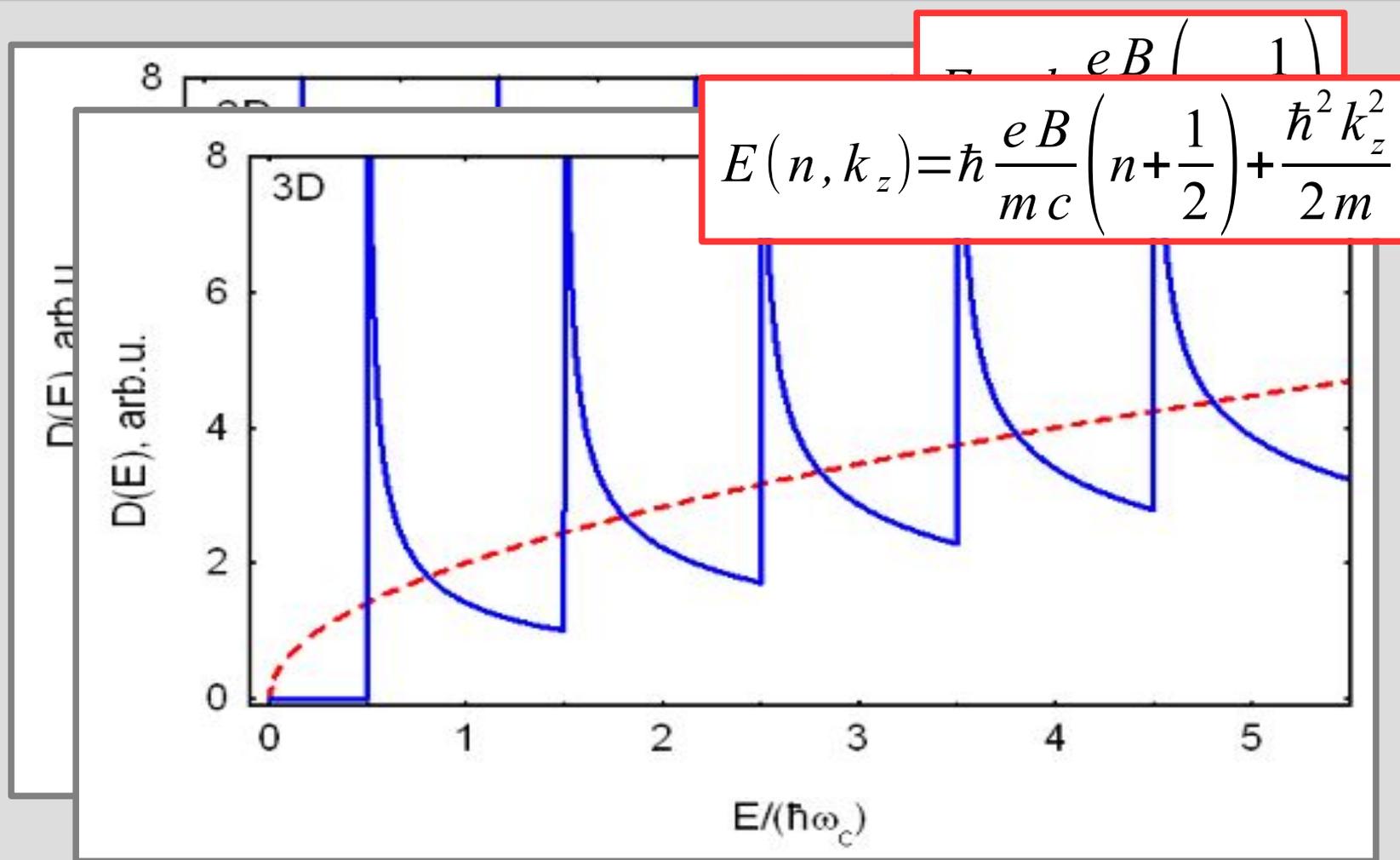
$$l \gg R, \quad T \ll \hbar \omega_c$$

В поле 10Тл «циклотронный квант энергии» для свободного электрона 13К

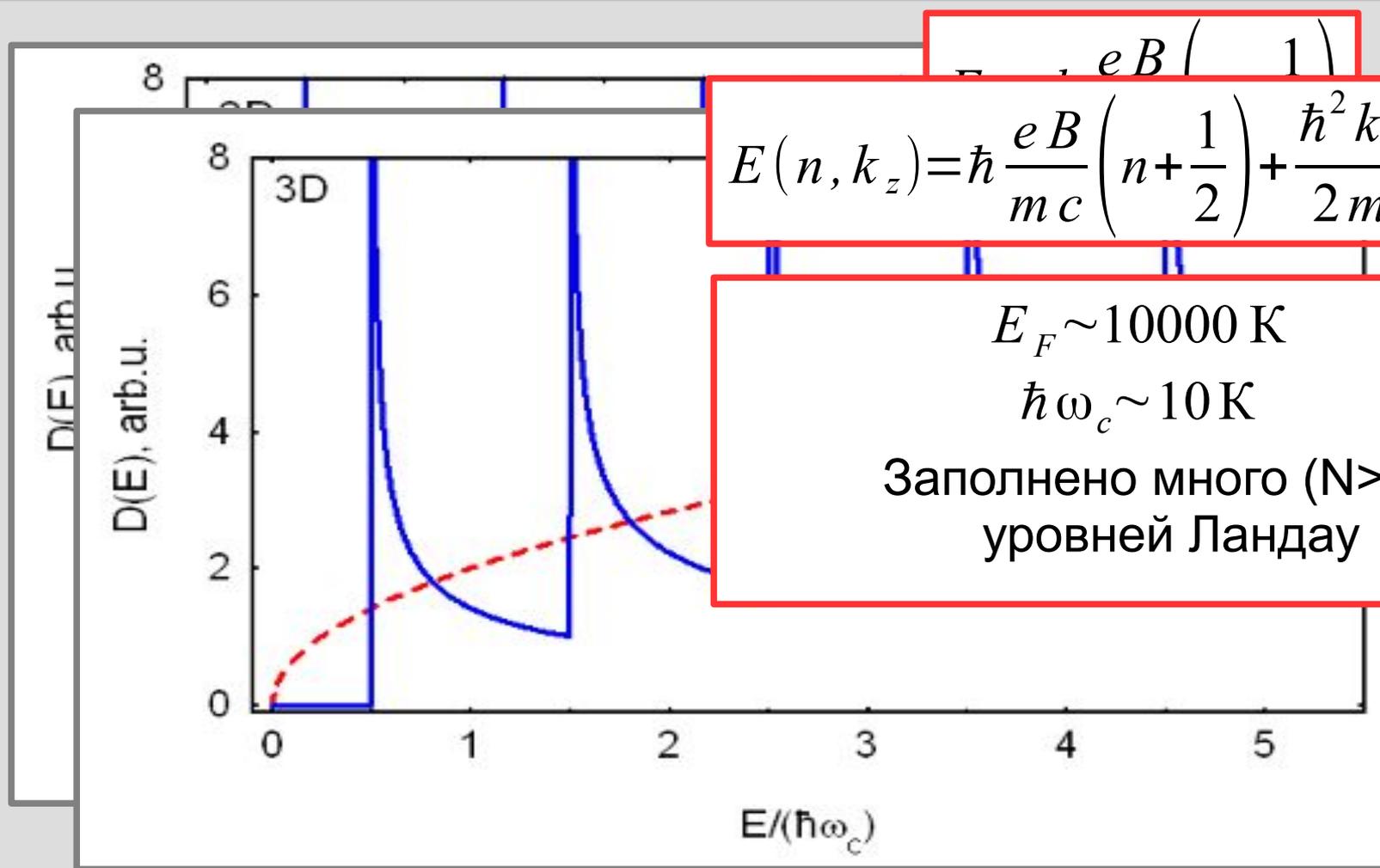
# Плотность состояний в квантующем поле: 2D.



# Плотность состояний в квантующем поле: 3D.



# Плотность состояний в квантующем поле: 3D.



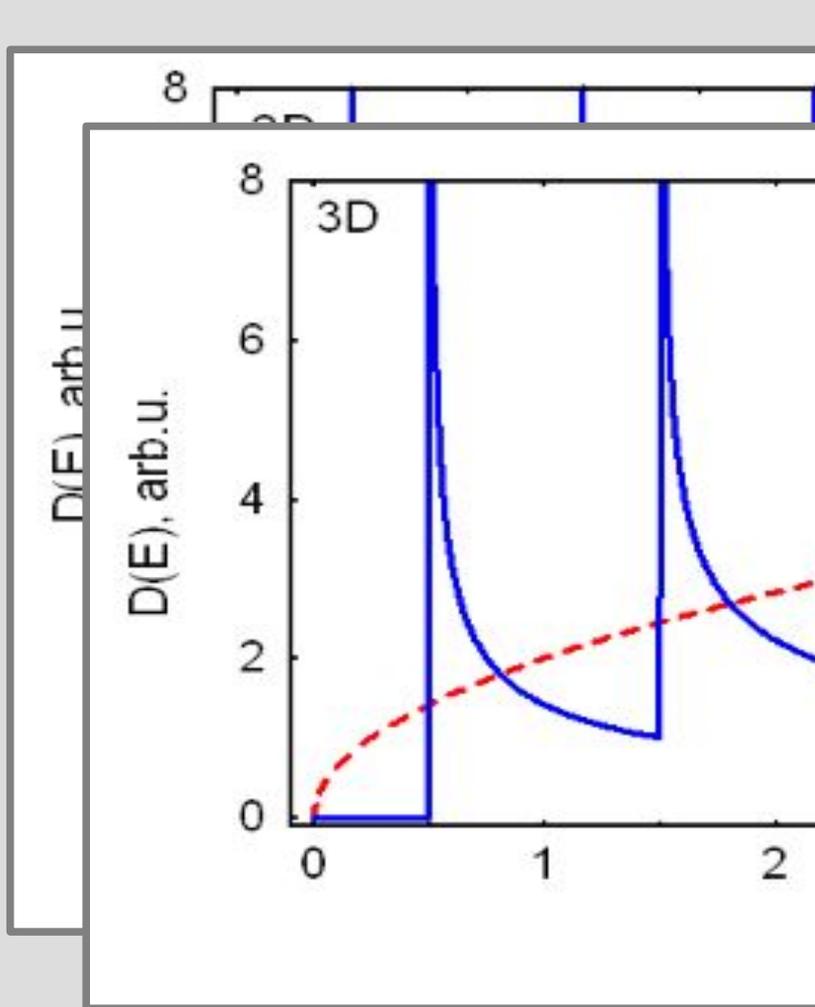
$$E(n, k_z) = \hbar \frac{eB}{mc} \left( n + \frac{1}{2} \right) + \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m}$$

$$E_F \sim 10000 \text{ K}$$

$$\hbar\omega_c \sim 10 \text{ K}$$

Заполнено много ( $N \gg 1$ )  
уровней Ландау

# Плотность состояний в квантующем поле: 3D.



$$E(n, k_z) = \hbar \frac{eB}{mc} \left( n + \frac{1}{2} \right) + \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m}$$

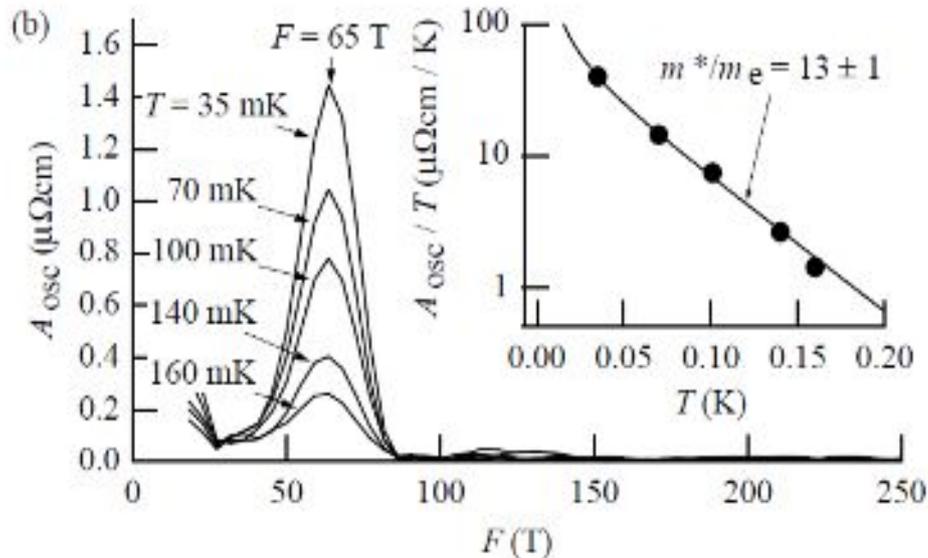
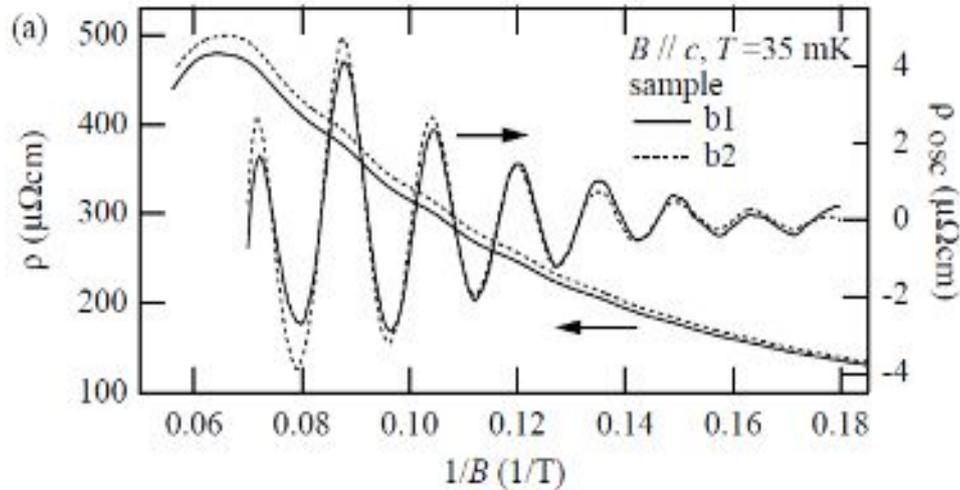
$$E_F \sim 10000 \text{ K}$$

$$\hbar \omega_c \sim 10 \text{ K}$$

Заполнено много ( $N \gg 1$ )  
уровней Ландау

При изменении поля меняется  
расстояние между уровнями  
Ландау и  $D(E_F)$

# Эффект Шубникова-де Гааза.



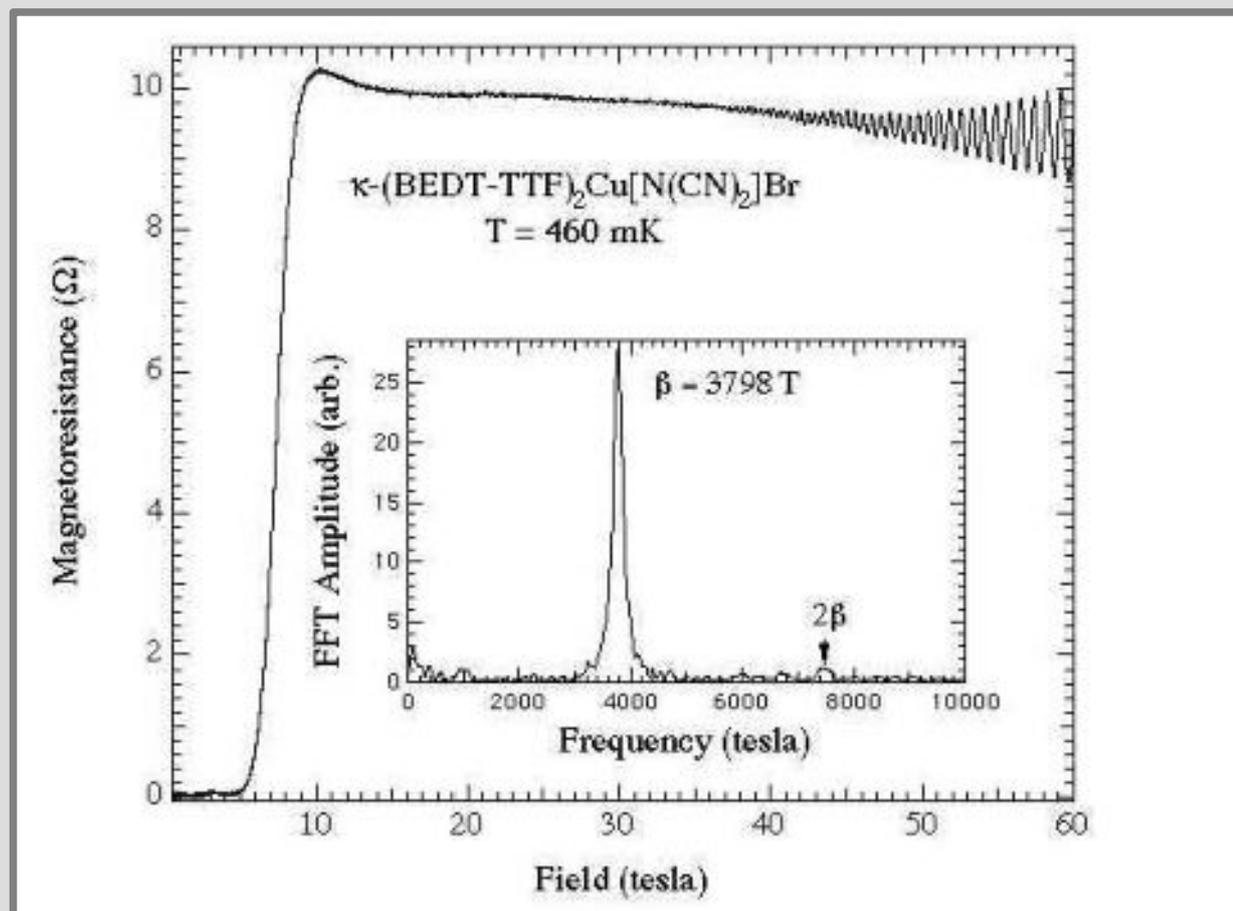
Пример наблюдения шубниковских осцилляций сопротивления в тяжелофермионном соединении CeNiSn.. (a) Сопротивление как функция обратного поля при температуре 35 мК. Представлены данные измерений на двух образцах (сплошная и пунктирная линии). Также показана выделенная на фоне монотонного роста сопротивления в поле осциллирующая часть. (b) Преобразование Фурье от измеренной при разных температурах зависимости сопротивления. На вставке — зависимость амплитуды осцилляций от температуры.

$$\omega_c = \frac{eB}{m^*c}$$

$$\text{max } \sigma \text{ при } \varepsilon_F = \hbar \omega_c \left( n + \frac{1}{2} \right)$$

$$B_n^{(\text{max})} \propto \frac{1}{n + \frac{1}{2}} \approx \frac{1}{n} + O\left(\frac{1}{n^2}\right)$$

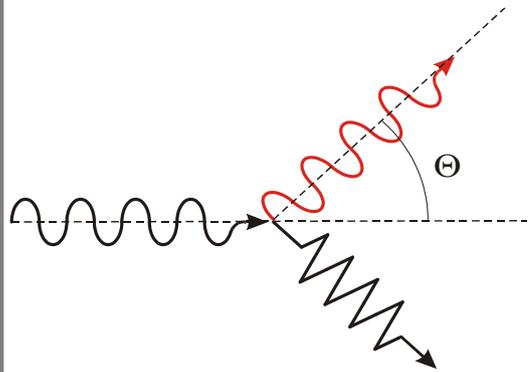
# Эффект Шубникова-де Гааза в высоких магнитных полях.



Осцилляции сопротивления в квазидвумерном проводнике  $\kappa$ -(BEDT-TTF)<sub>2</sub>Cu[N(CN)<sub>2</sub>]Br в высоких магнитных полях до 60 Тл. На вставке — фурье-преобразование от наблюдаемых осцилляций.

# Часть 5. Неупругие процессы рассеяния электромагнитных волн

# Комбинационное рассеяние света.



$$\hbar \omega = \hbar \omega' + \hbar \Omega$$

$$\hbar \vec{k} = \hbar \vec{k}' + \hbar \vec{K}$$

$$\omega - \omega' = \Omega$$

$$(\vec{k} - \vec{k}')^2 = \vec{K}^2$$

оптический фонон

$$\Omega = const$$

$$\frac{\delta \omega}{\omega} = \frac{\Omega}{\omega} \sim \frac{10^{13} \text{ 1/сек}}{5 \cdot 10^{15} \text{ 1/сек}} \sim 2 \cdot 10^{-3}$$

(для света 4000Å)

акустический фонон

$$\Omega = s k$$

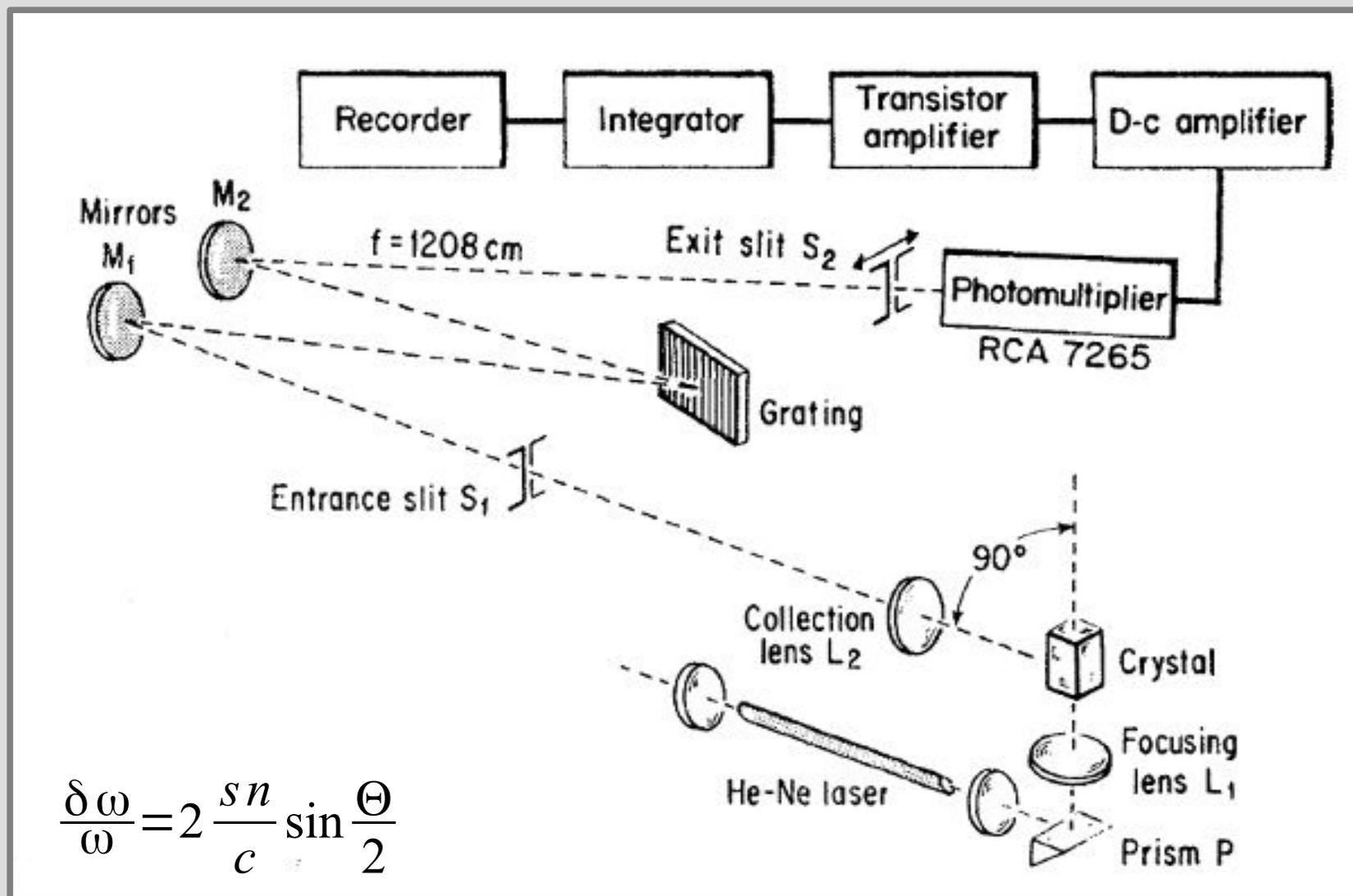
$$K^2 = k^2 + (k')^2 - 2 k k' \cos \Theta$$

$$\left(\frac{\Omega}{s}\right)^2 = \left(\frac{n}{c}\right)^2 (\omega^2 + (\omega')^2 - 2 \omega \omega' \cos \Theta)$$

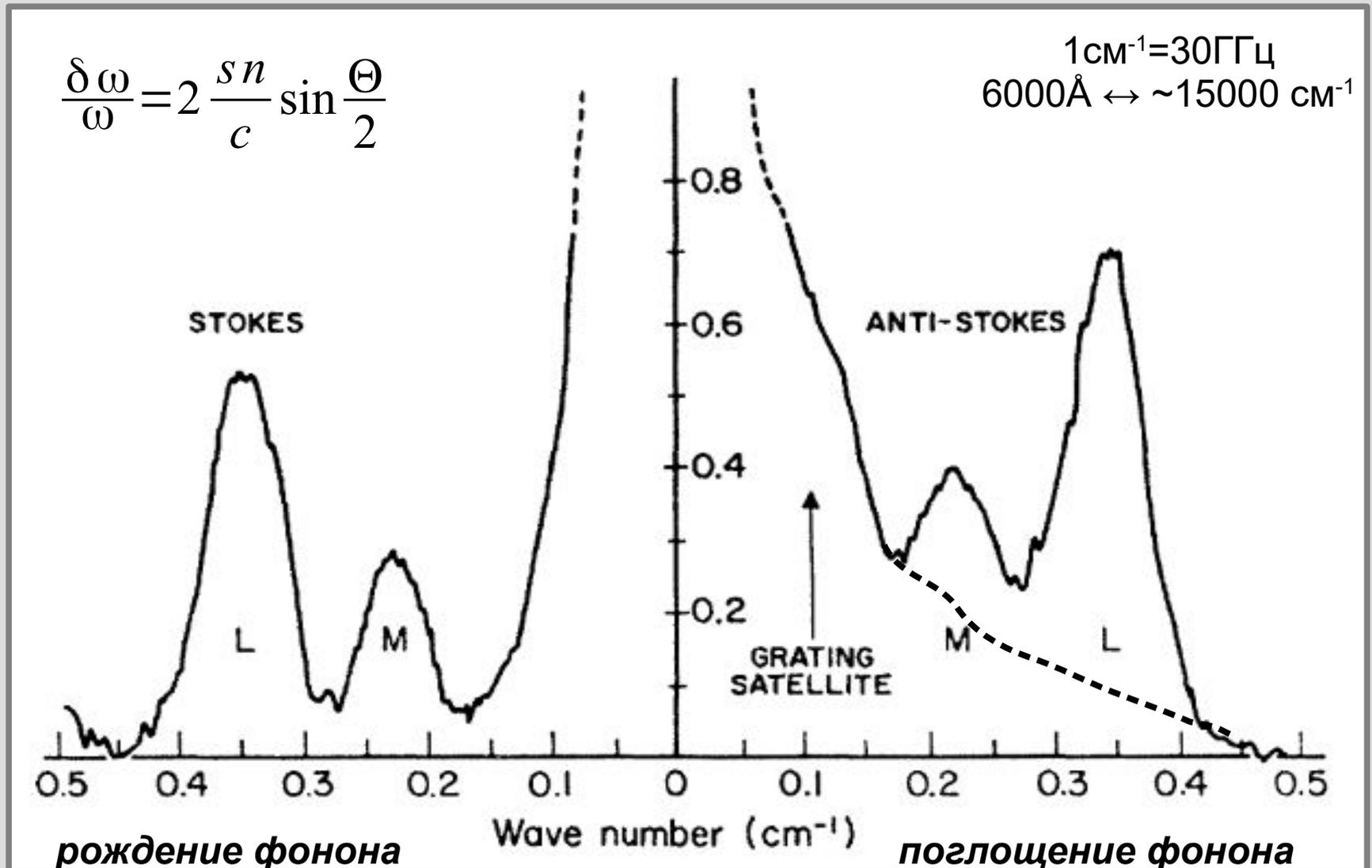
$$(\delta \omega)^2 \approx 2 \omega^2 (s n / c)^2 (1 - \cos \Theta)$$

$$\frac{\delta \omega}{\omega} \sim \frac{s}{c} \sim 10^{-5}$$

# Пример эксперимента по комбинационному рассеянию света.



# ... и наблюдаемые результаты (RbCl, 300K).



# ... и наблюдаемые результаты (RbCl, 300K).



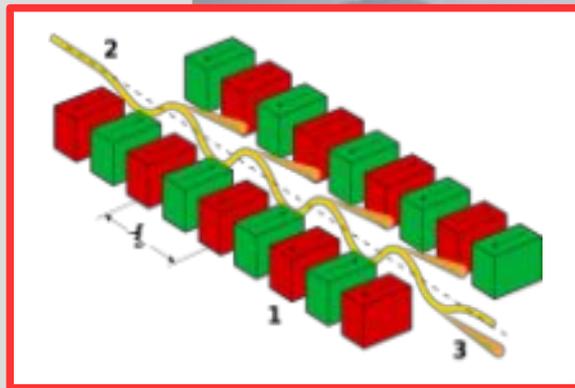
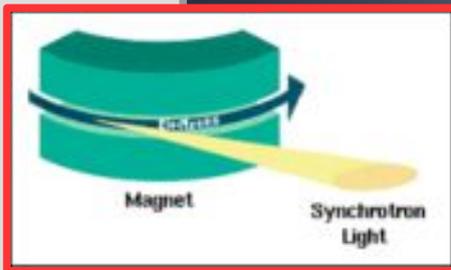
- Разные скорости звука для разных поляризаций фононов
- Стоксовские моды (рождение) интенсивнее

# Синхротронное излучение.



Кольцо ускорителя ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) в Гренобле. С сайта [www.esrf.fr](http://www.esrf.fr)

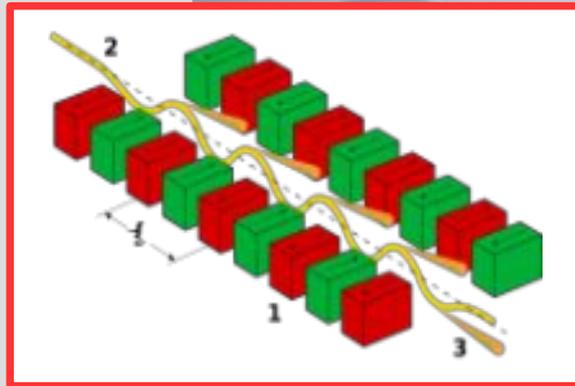
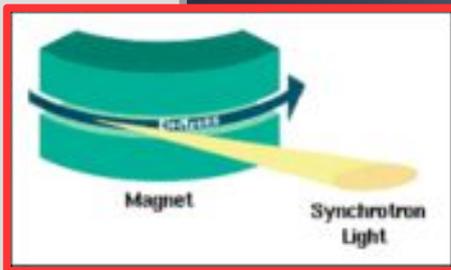
# Синхротронное излучение.



- Спектр: непрерывный, можно получать от ИК до рентгена
- Яркий, направленный, частично поляризованный пучок



# Синхротронное излучение.



- Спектр: непрерывный, можно получать от ИК до рентгена
- Яркий, направленный, частично поляризованный пучок

Для рентгеновского излучения возможны процессы переброса:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \simeq \frac{\pi}{a}$$

$$E_y = \hbar\omega \gg \Theta \simeq \hbar\Omega_{max}$$

# Трёхосный дифрактометр

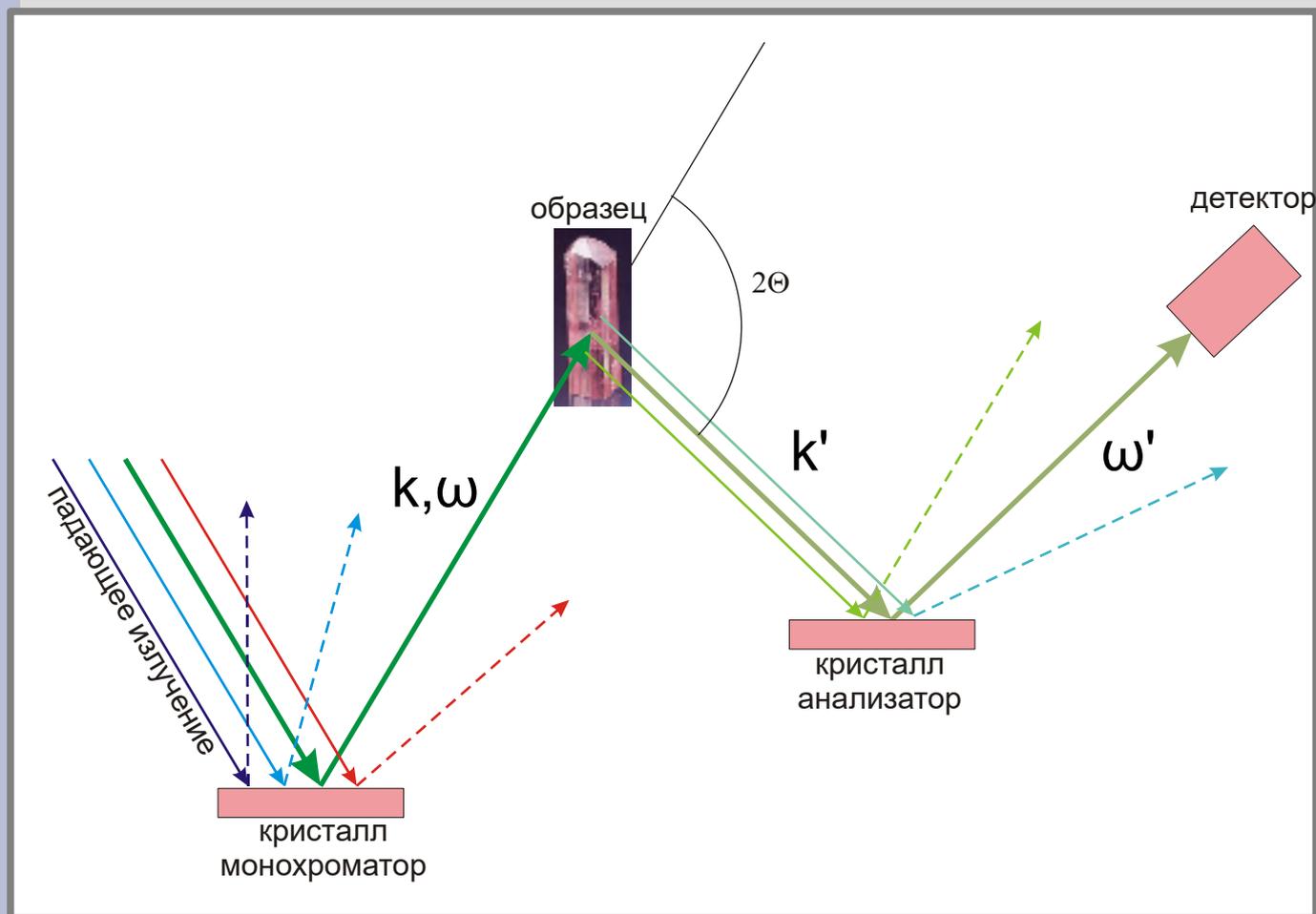
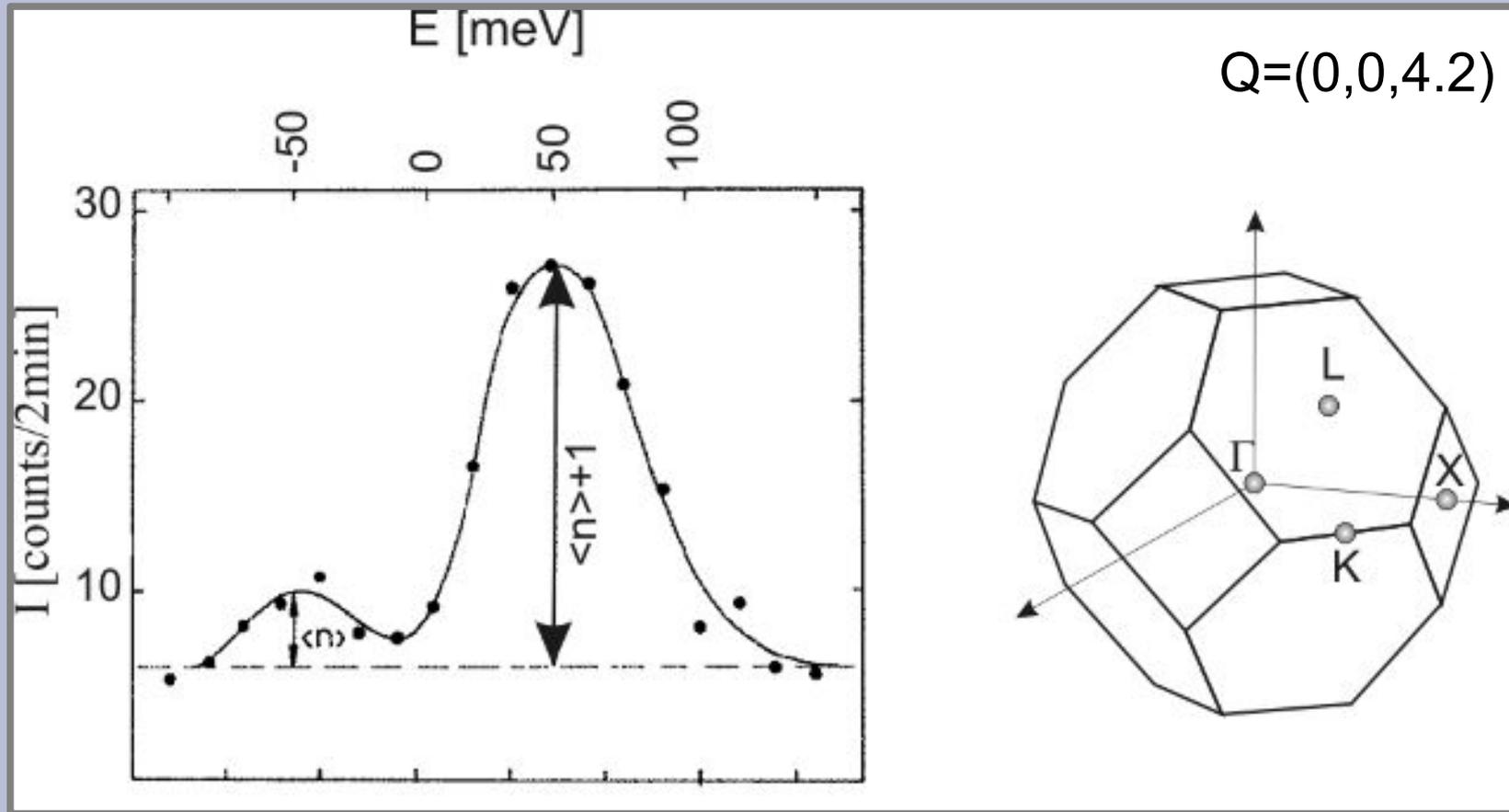


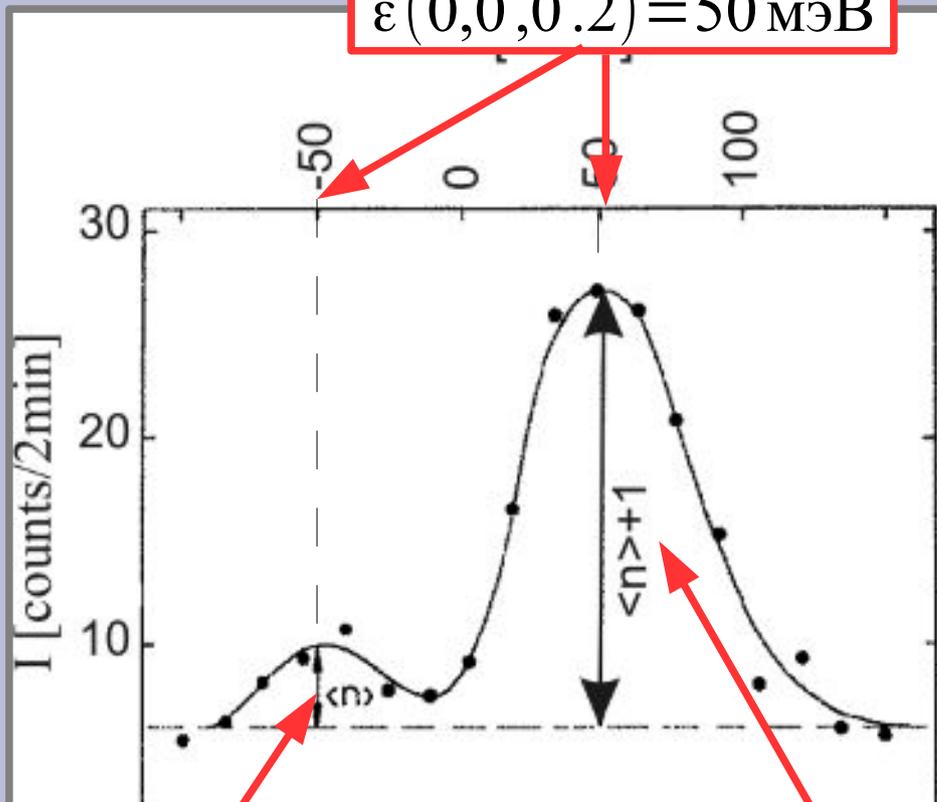
Схема эксперимента по неупругому рассеянию излучения на трёхосном дифрактометре. Коллиматоры, выделяющие желаемое излучение после монохроматора и анализатора не показаны. Изображение "образца" на схеме - фотография розового топаза с сайта Минералогического музея РАН

# Эксперимент: рассеяние рентгеновских лучей на алмазе

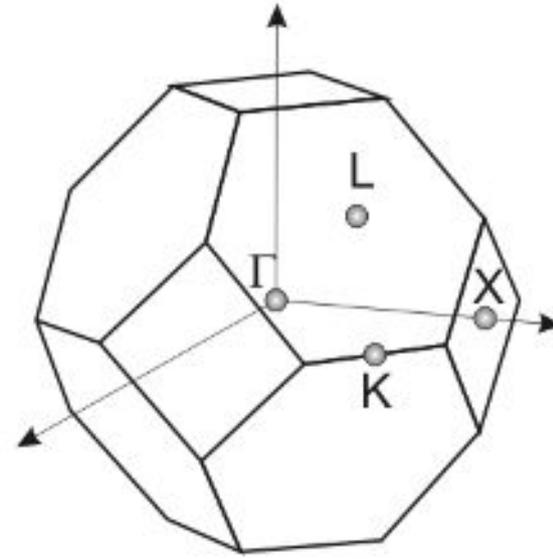


# Эксперимент: рассеяние рентгеновских лучей на алмазе

$$\epsilon(0,0,0.2) = 50 \text{ мЭВ}$$



$Q=(0,0,4.2)$



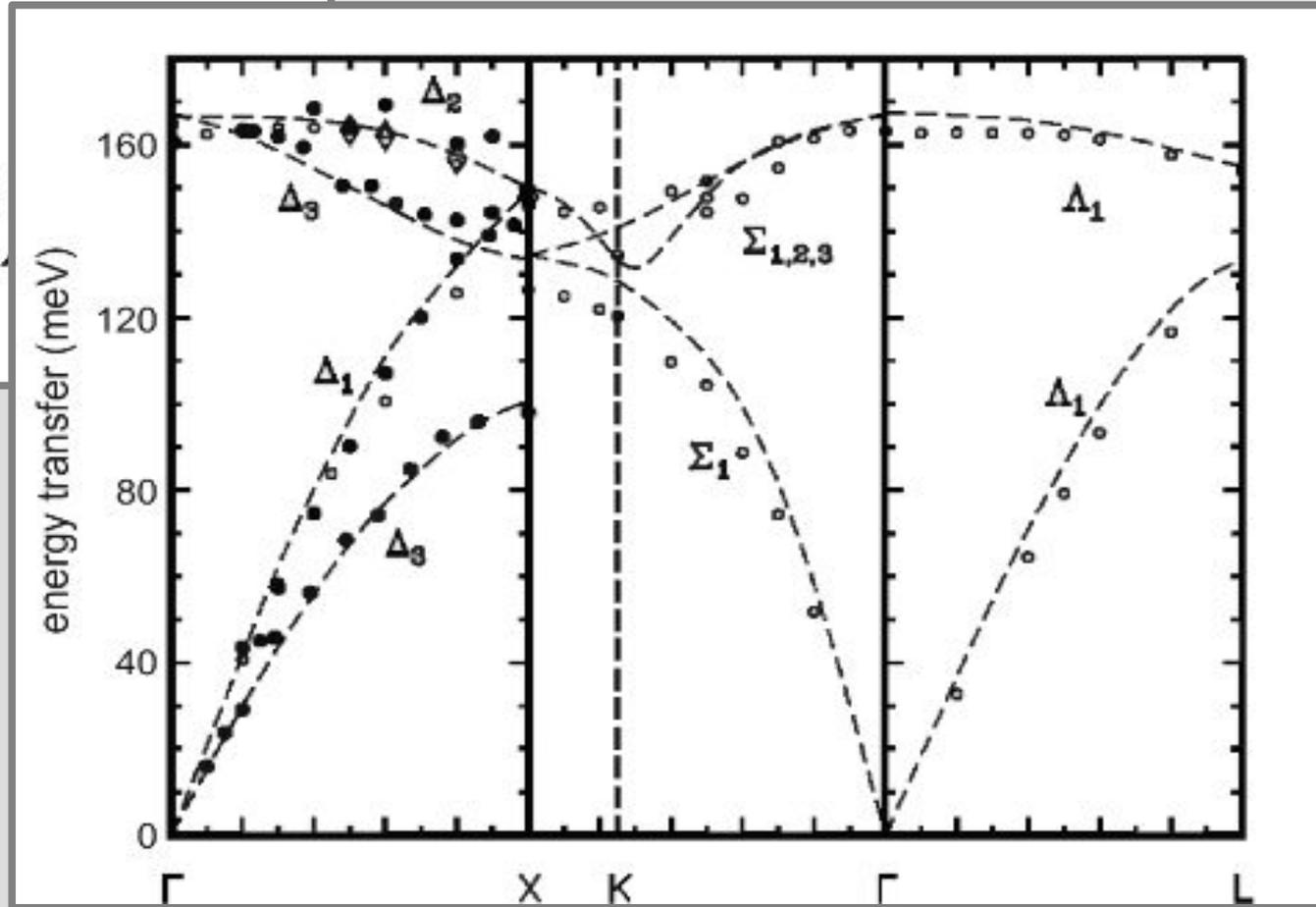
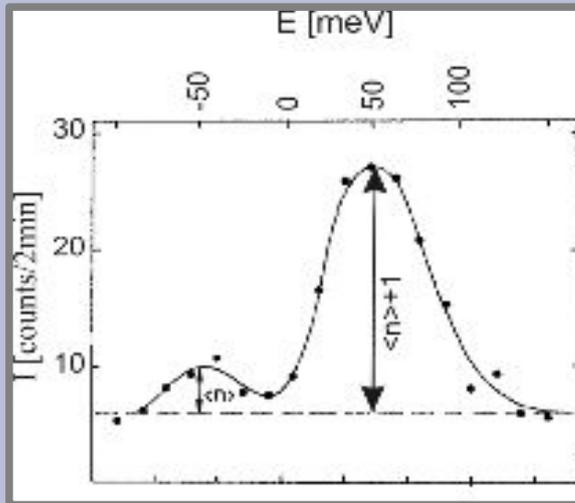
поглощение  
фонона

$$w \propto \frac{1}{e^{E/T} - 1}$$

рождение  
фонона

$$w \propto \left[ \frac{1}{e^{E/T} - 1} + 1 \right]$$

# Эксперимент: рассеяние рентгеновских лучей на алмазе



# Часть 6. Упругое и неупругое рассеяние нейтронов.

# Упругое и неупругое рассеяние нейтронов.

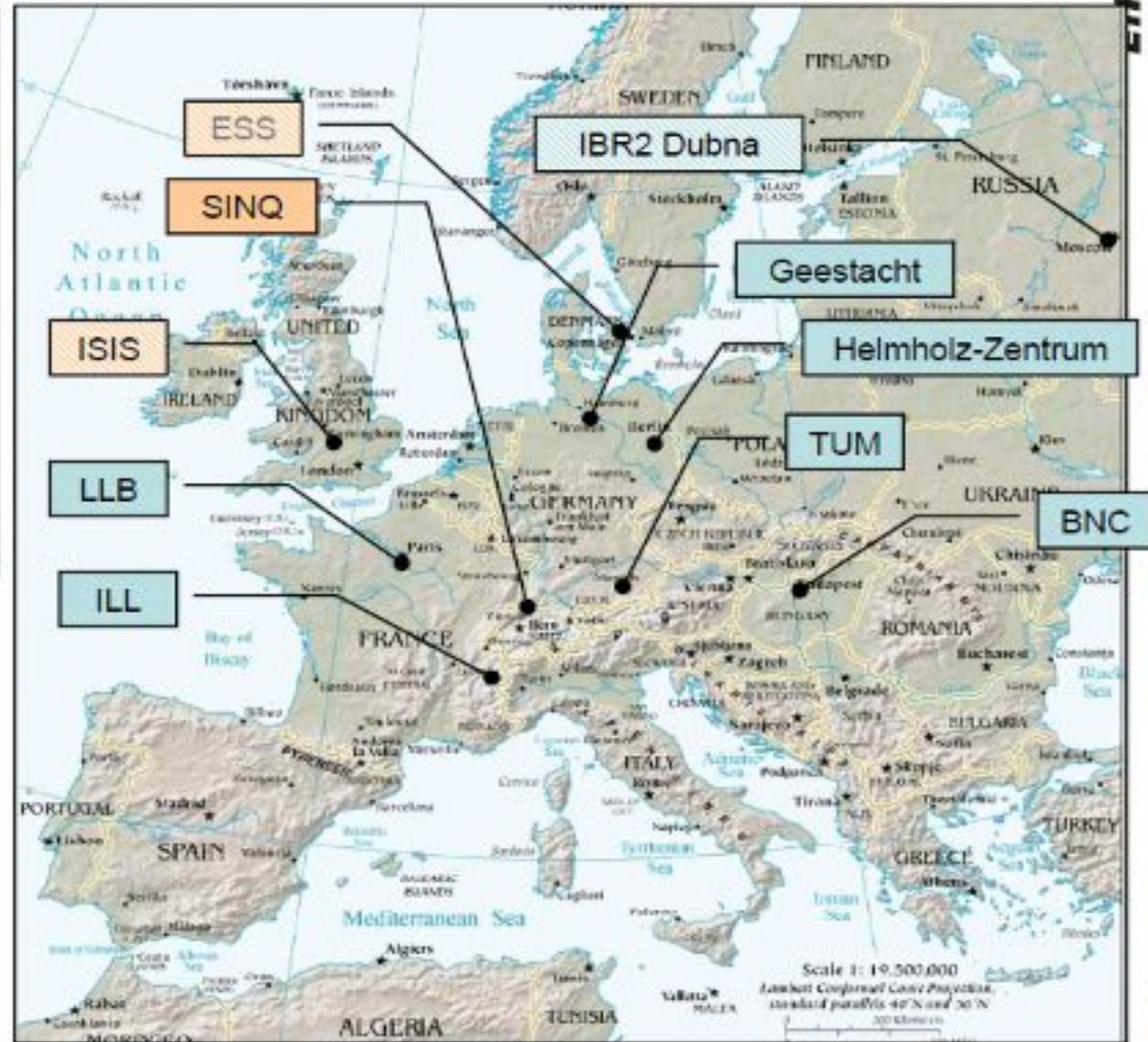
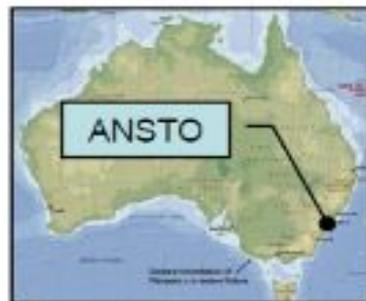
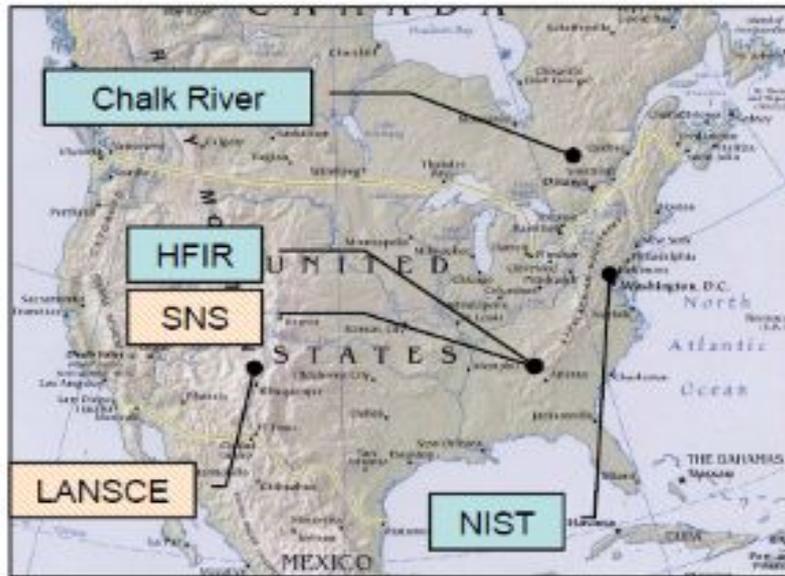
## Нейтрон:

- масса покоя 940 МэВ
- спин 1/2
- время жизни около 700 сек
- $q=0$
- есть магнитный момент  $\mu_n = -1.913 \mu_{nucl}$

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = 2.07 [\text{мэВ} \times \text{Å}^2] k^2$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{9.04 \text{ Å}}{\sqrt{E(\text{мэВ})}}$$

# Постановка эксперимента



Расположение наиболее известных функционирующих нейтранных источников (2012 год). Из лекций проф. А. Жёлуева

## За рамками краткого рассказа...

В реакторе или ускорителе получают нейтроны с энергией  $\sim 100$  МэВ

Для длины волны несколько ангстрем требуется энергия нейтрона  $\sim 10$  мэВ

## За рамками краткого рассказа...

В реакторе или ускорителе получают нейтронную энергию ~100 МэВ

Для длины волны несколько ангстрем  
нейтрона ~10 мэВ

**нужно  
термализовать...**

технология

## За рамками краткого рассказа...

В реакторе или ускорителе получают нейтронную энергию ~100 МэВ

Для длины волны несколько ангстрем  
нейтрона ~10 мэВ

**нужно  
термализовать...**

Нужен параллельный пучок, желательно монохроматических нейтронов...

## За рамками краткого рассказа...

В реакторе или ускорителе получают нейтронную энергию ~100 МэВ

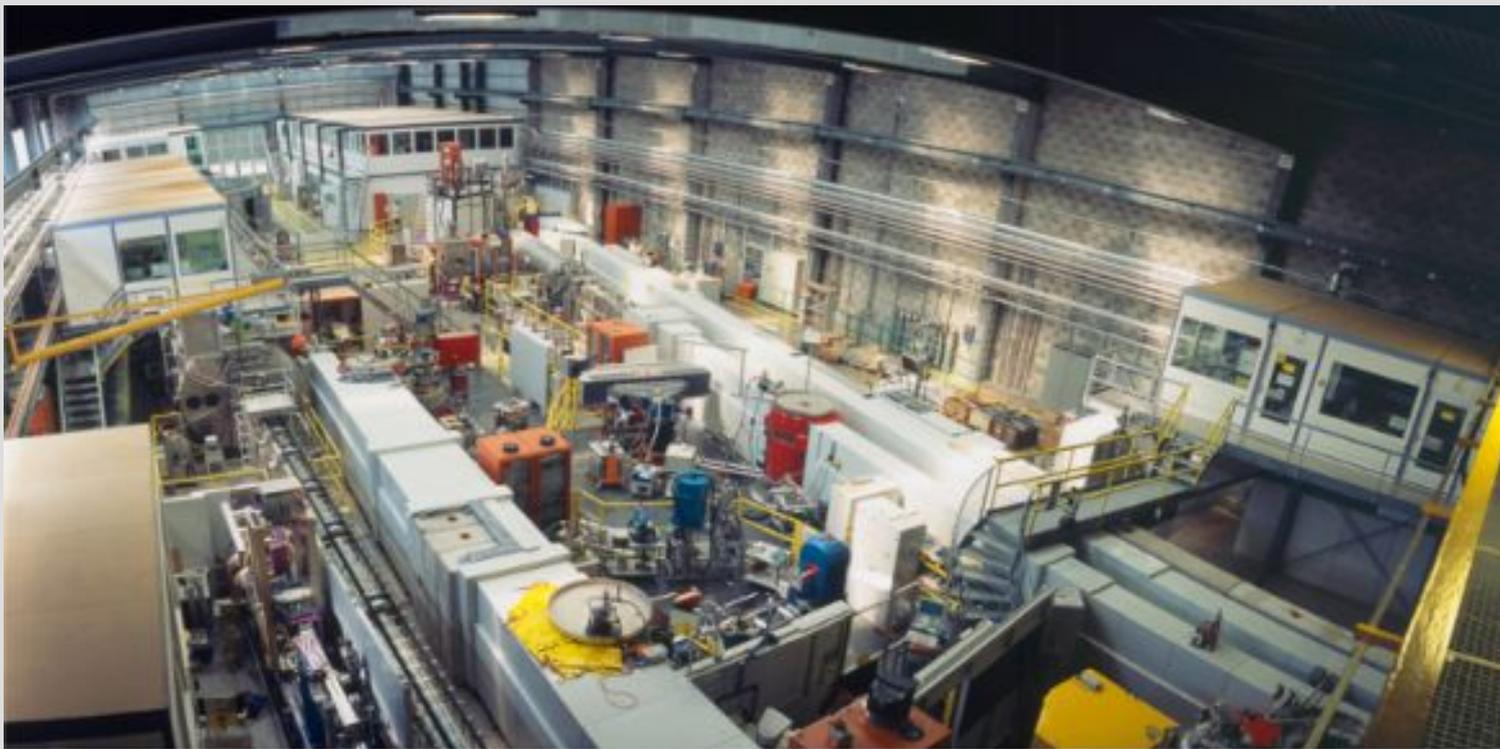
Для длины волны несколько ангстрем  
нейтрона ~10 мэВ

Нужен параллельный пучок  
монохроматических нейтронов

**нужно  
термализовать...**

**а всё что можно  
сделать: выкинуть  
«неправильные»  
нейтроны**

# Постановка эксперимента



Экспериментальный зал источника нейтронов SINQ Института Поля Шерера (Виллиген, Швейцария). С сайта [www.psi.ch](http://www.psi.ch)

# «Time Of The Flight» эксперимент

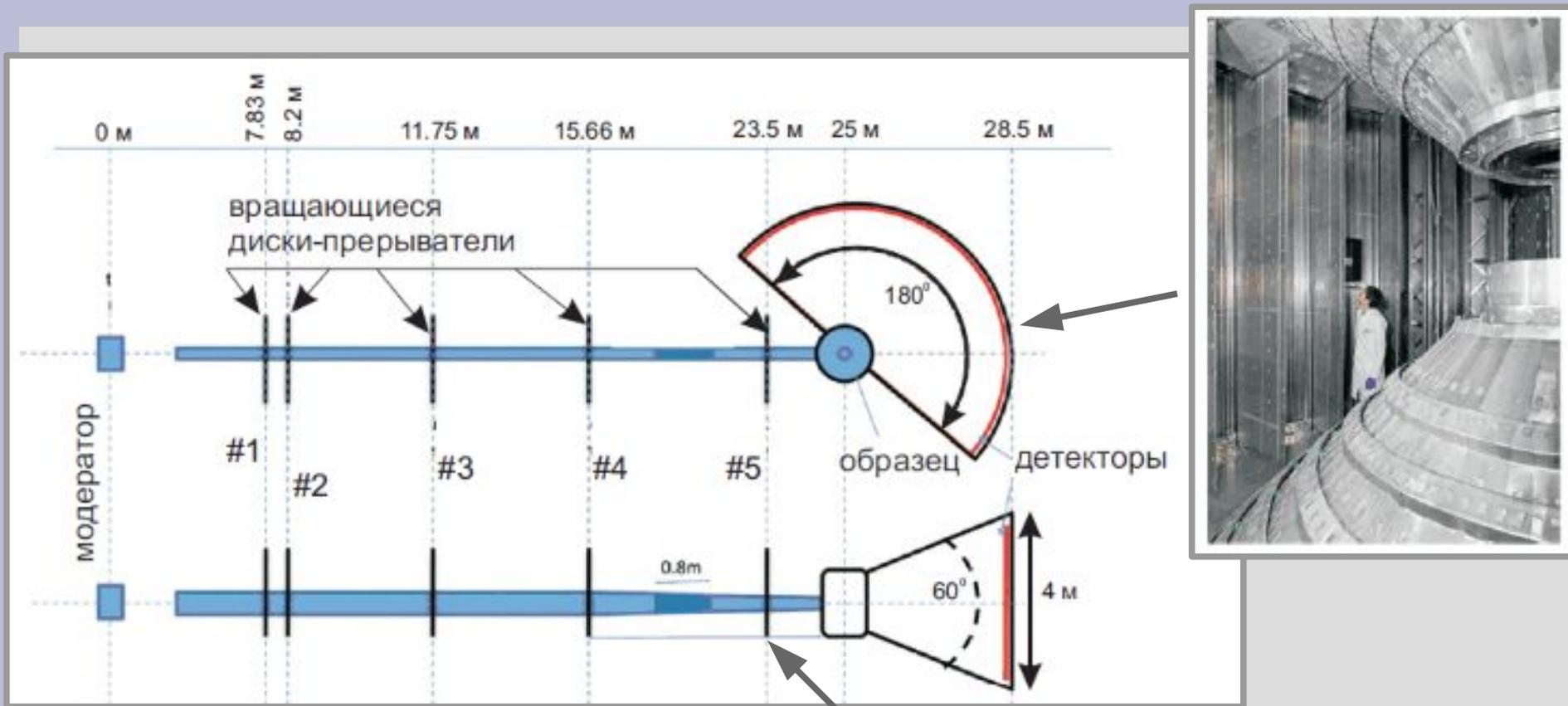


схема расположения прерывателей потока нейтронов и массива детекторов во времяпролётном спектрометре LET центра ISIS  
R. I. Bewley, J. W. Taylor, S. M. Bennington, LET, a cold neutron multi-disk chopper spectrometer at ISIS, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 637, 128 (2011)



# » эксперимент

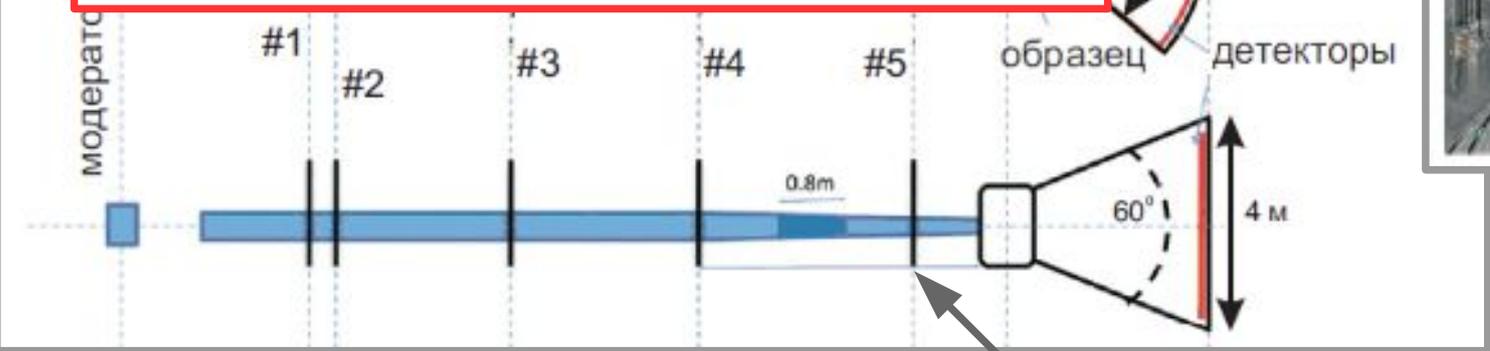
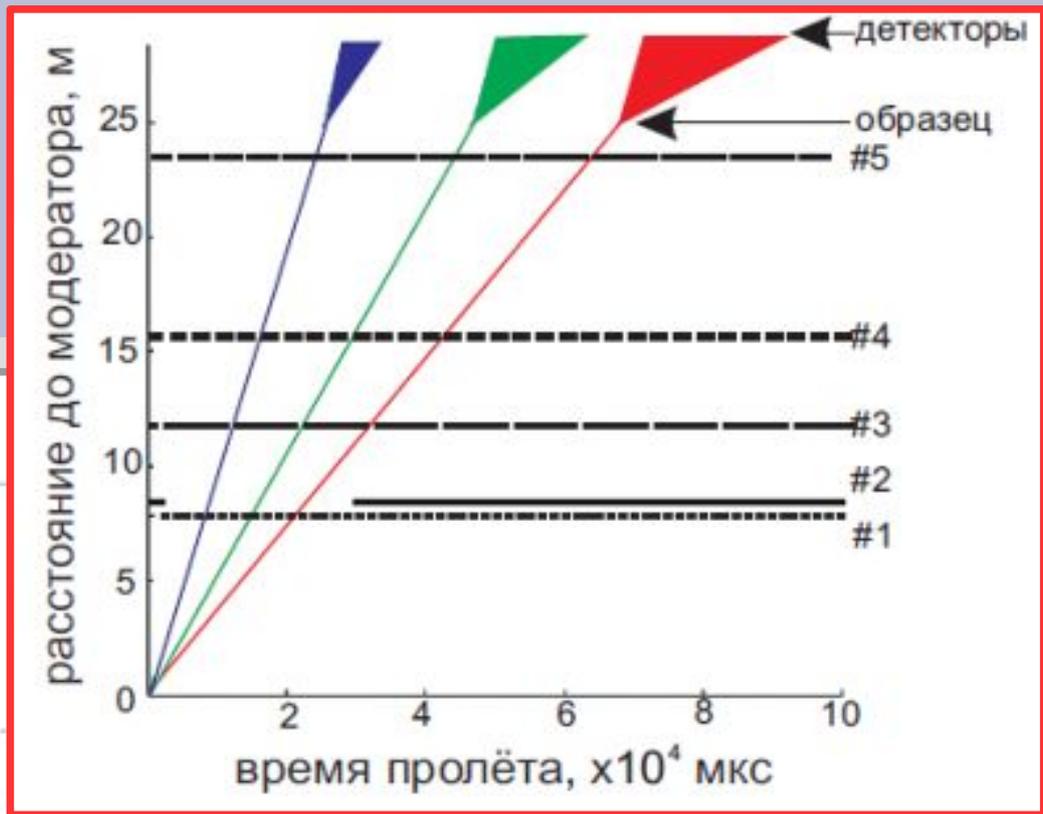
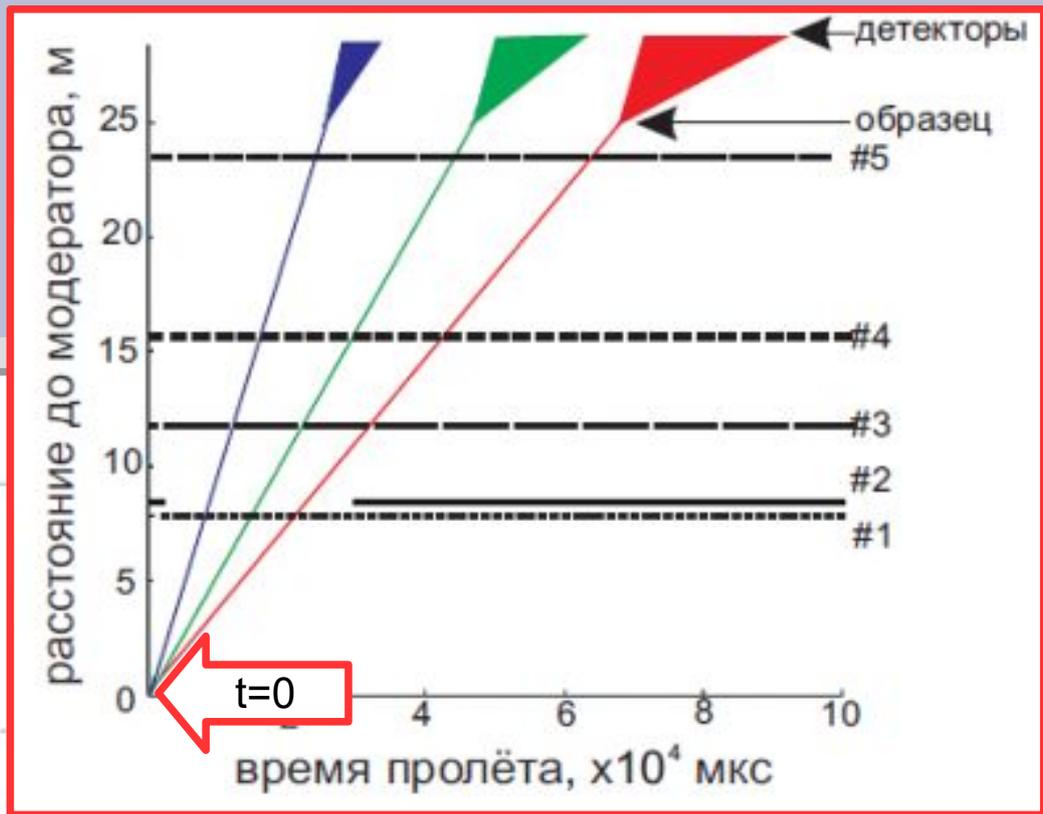


схема расположения прерывателей потока нейтронов и массива детекторов во времяпролётном спектрометре LET центра ISIS  
 R. I. Bewley, J. W. Taylor, S. M. Bennington, LET, a cold neutron multi-disk chopper spectrometer at ISIS, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 637, 128 (2011)



# » эксперимент



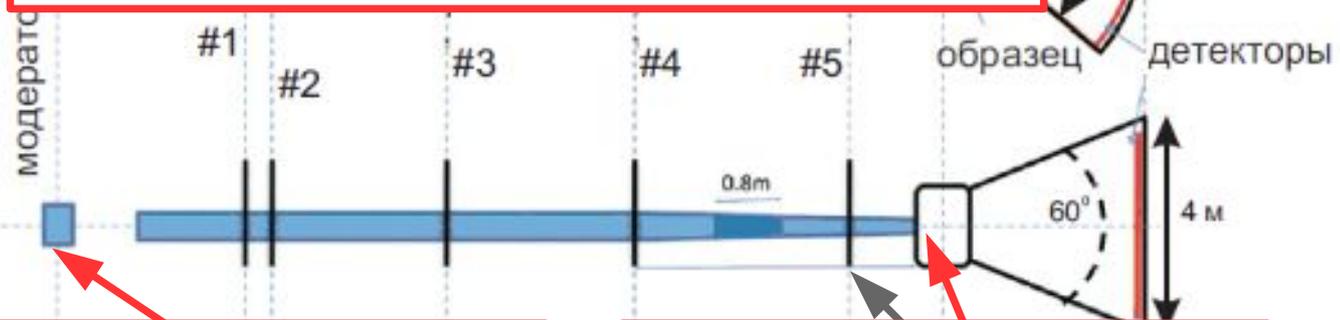
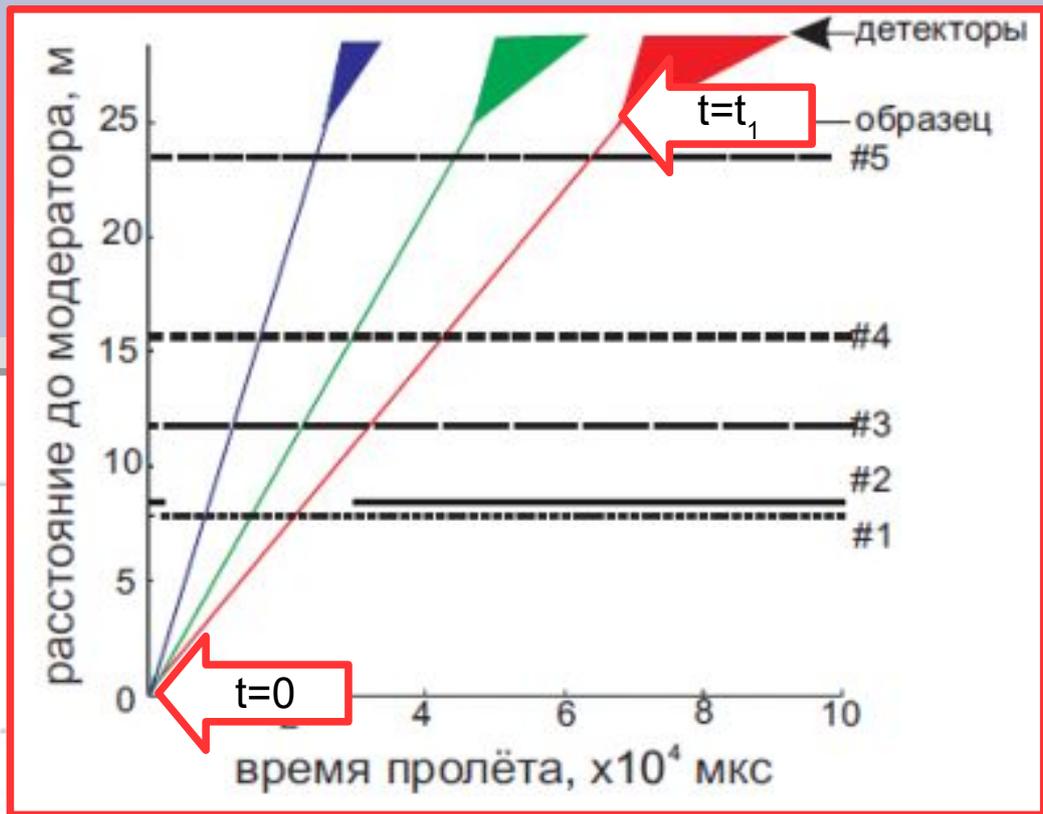
**t=0**  
импульс протонов выбил нейтроны из мишени, нейтроны попали в модератор

тронов и мас-  
тре LET центра ISIS  
a cold neutron  
struments and Methods in



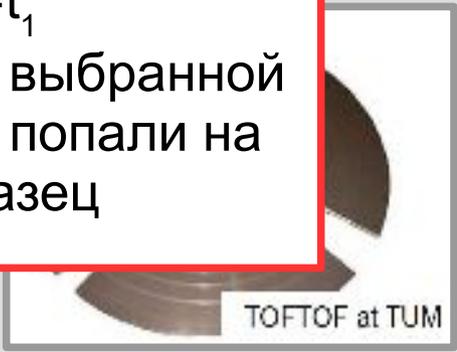
TOFTOF at TUM

# » эксперимент

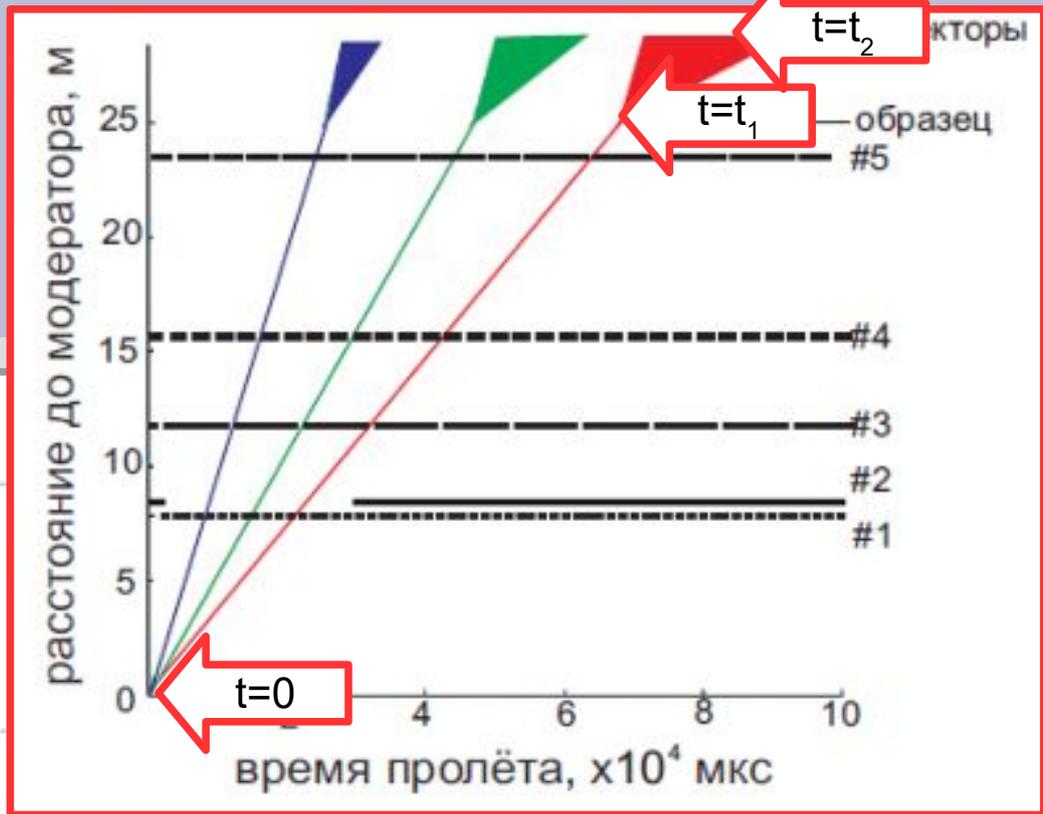


$t=0$   
импульс протонов выбил нейтроны из мишени, нейтроны попали в модератор

$t=t_1$   
нейтроны с выбранной скоростью попали на образец



# » эксперимент



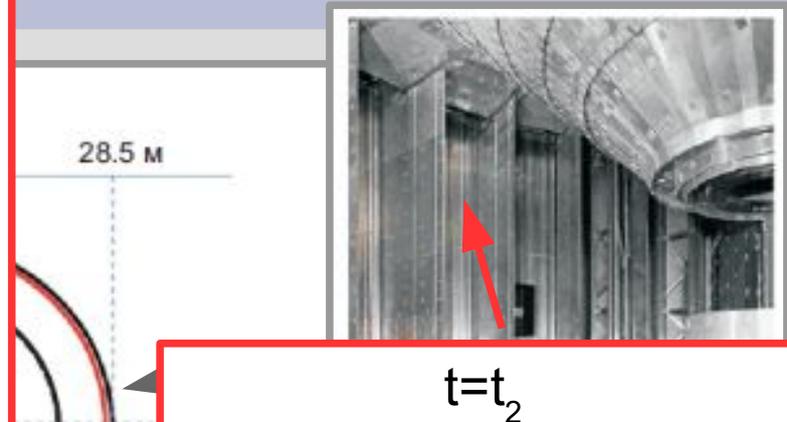
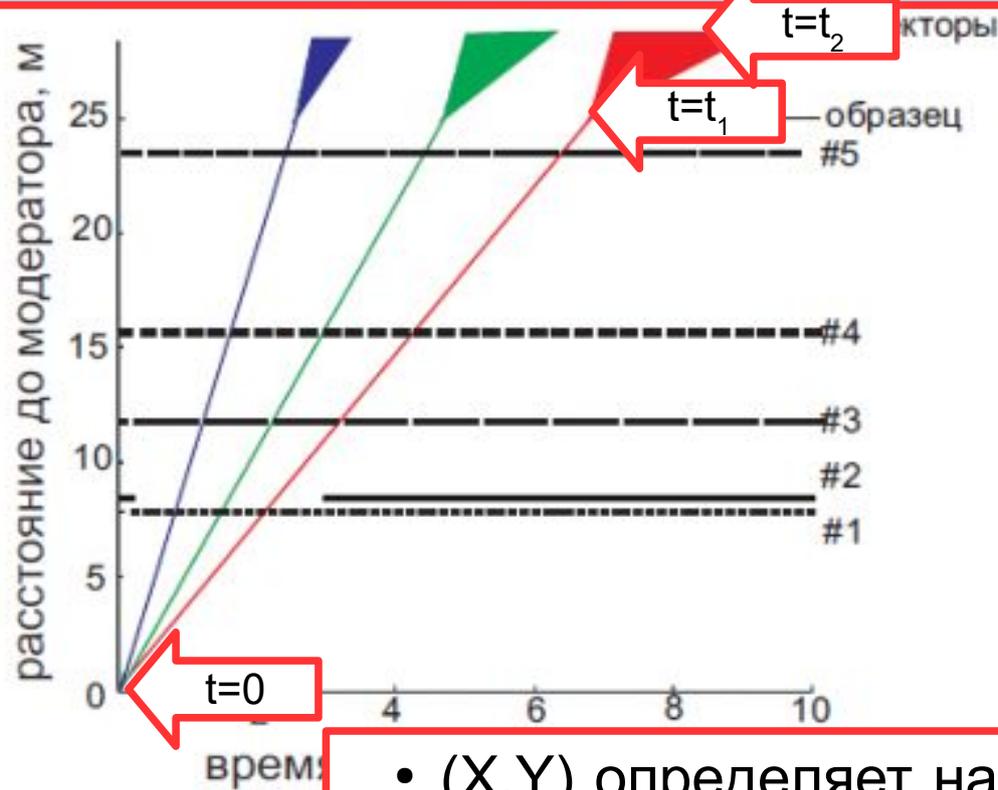
$t=t_2$   
 один из нейтронов  
 зафиксирован  
 детектором (X,Y)

$t=0$   
 импульс протонов  
 выбил нейтроны из  
 мишени, нейтроны  
 попали в модератор

$t=t_1$   
 нейтроны с выбранной  
 скоростью попали на  
 образец



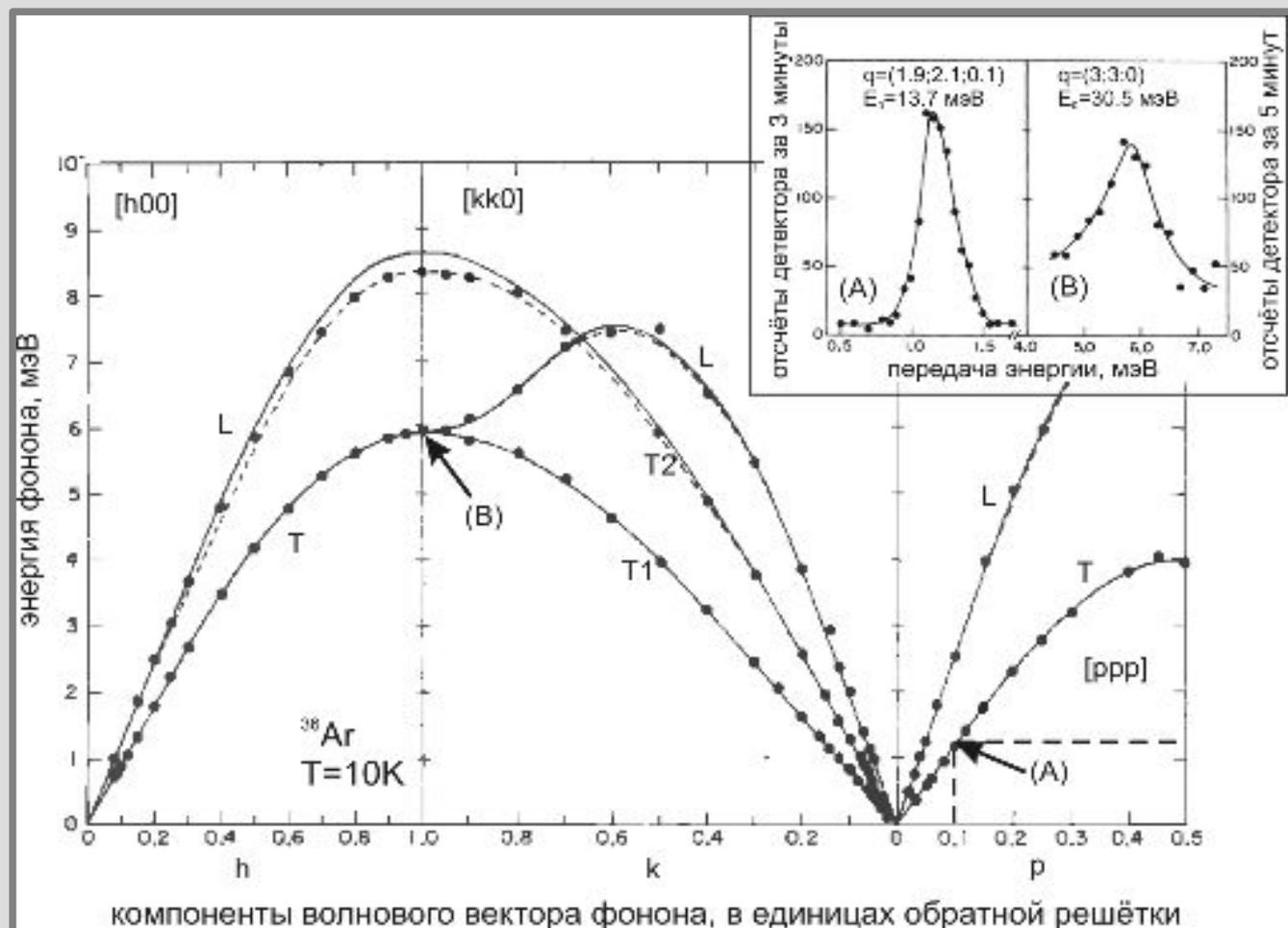
## » эксперимент



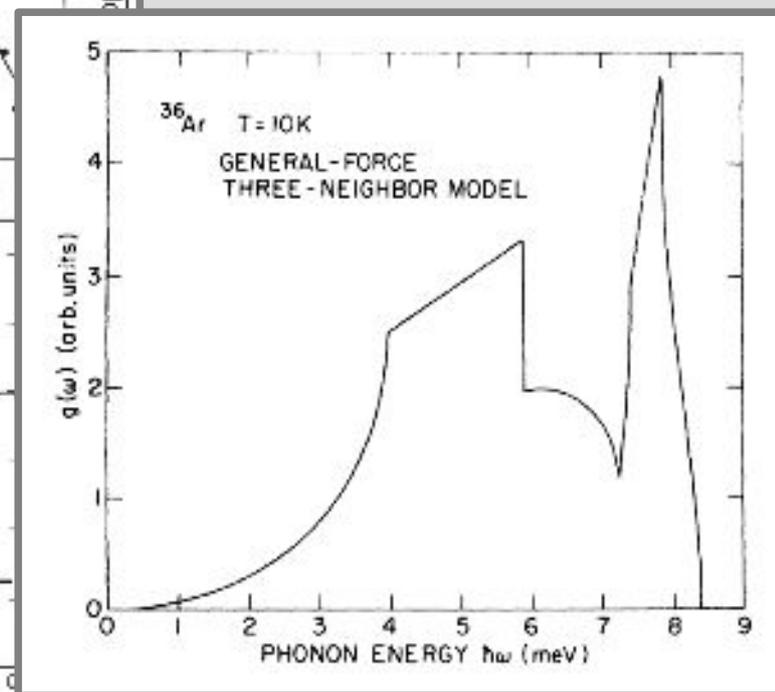
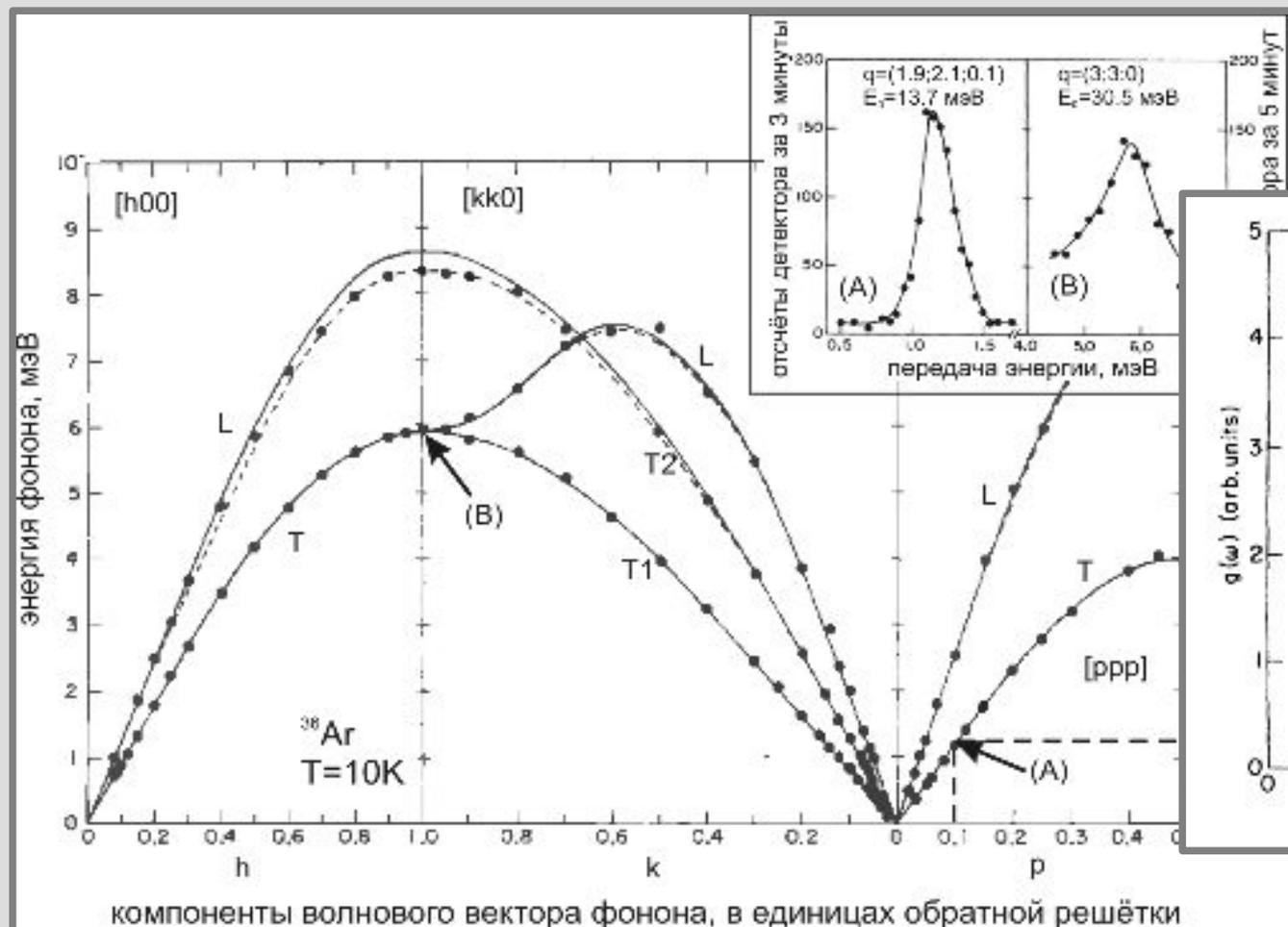
- $(X, Y)$  определяет направление и  $(t_2 - t_1)$  позволяют определить величину скорости после рассеяния.
- Считаем каждый нейтрон (поток на образце  $10^8$   $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ).
- Эксперимент может длиться несколько дней...

$t=0$   
импульс протонов выбил нейтрон с мишени, нейтроны попали в модератор

# Неупругое рассеяние на фононах в $^{36}\text{Ar}$ , 10К.

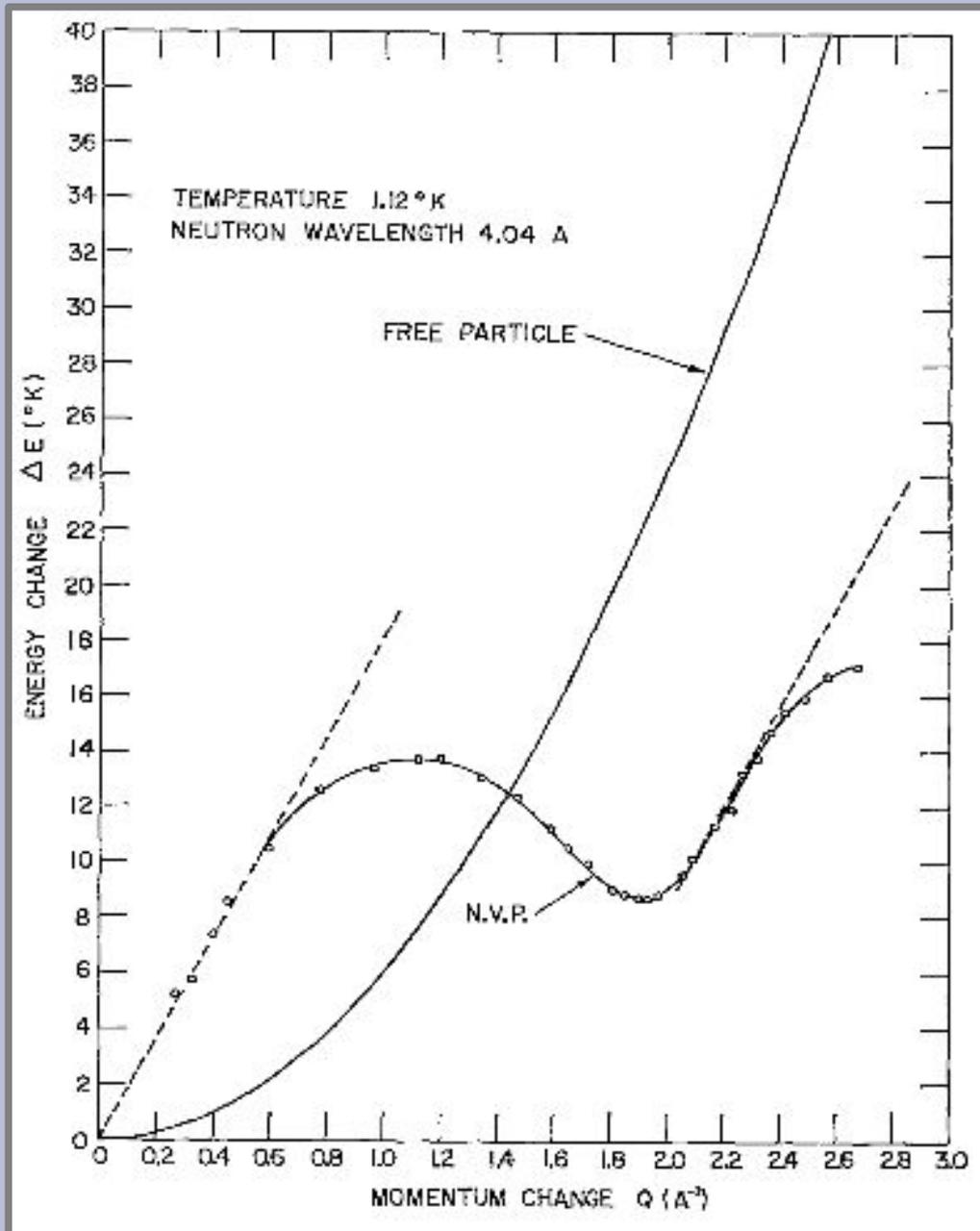


# Неупругое рассеяние на фононах в $^{36}\text{Ar}$ , 10К.



Вычисленная по параметрам модели взаимодействия трёх ближайших соседей плотность фононных состояний в твёрдом аргоне-36.

# Неупругое рассеяние на возбуждениях квантовой жидкости.



Спектр элементарных возбуждений, измеренный методом неупругого рассеяния нейтронов в сверхтекучем гелии-4 при давлении насыщенных паров и температуре 1.12K.

D.G.Henshaw and A.B.Woods, Modes of Atomic Motion in Liquid Helium by Inelastic Scattering of Neutrons, Physical Review, 121, 1266(1961)

