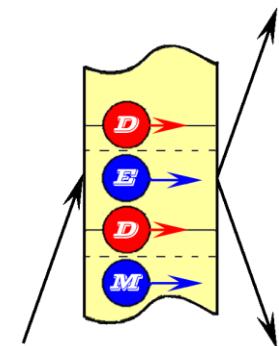
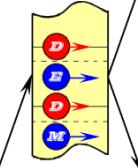


Особенности нейтронной оптики вблизи брэгговского отражения

Воронин В.В.
ПИЯФ НИЦ КИ



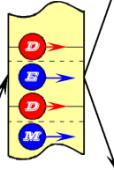


Аннотация

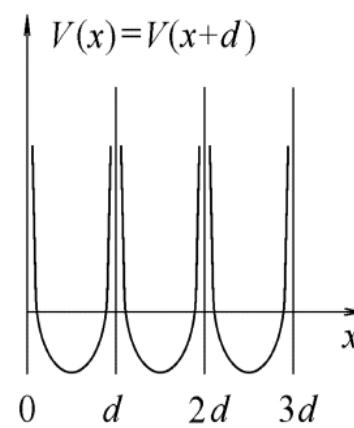
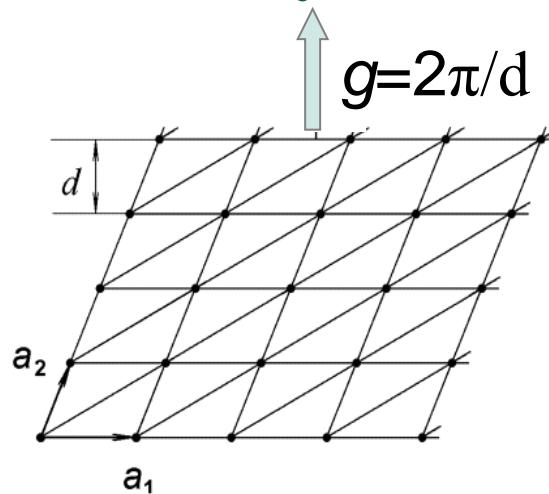
Рассматриваются особенности нейтронной оптики совершенного¹⁾ кристалла вблизи брэгговского отражения.

При этом в кристалле происходит значительная перестройка волновой функции нейтрона, что приводит к целому ряду новых нейтроноптических явлений

¹⁾совершенный кристалл – брэгговская ширина >> мозаичность кристалла



Потенциал взаимодействия нейтрона с кристаллом



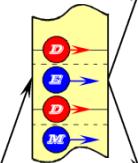
Рассмотрим непоглощающий потенциал $V(\mathbf{r})$, т.е.

$$V_g = V_{-g}^*,$$

$$V(\mathbf{r}) = \sum_a V_a(\mathbf{r} - \mathbf{r}_a) = \sum_g V_g \exp(i\mathbf{g}\mathbf{r}) = V_0 + \sum_g 2v_g \cos(\mathbf{g}\mathbf{r} + \phi_g),$$

Каждая гармоника характеризуется амплитудой и фазой

$$V_g = \int_{v=1} d^3r e^{-i\mathbf{g}\mathbf{r}} V(\mathbf{r}) = -\frac{2\pi\hbar^2}{m} N_c F_g,$$



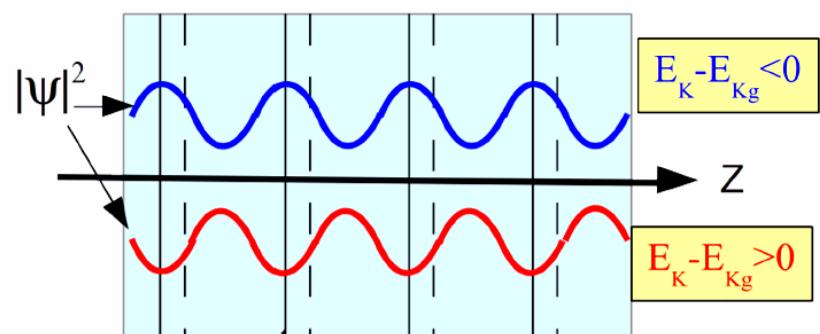
Волновая функция нейтрона в кристалле

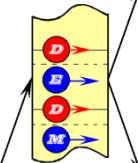
$$\psi = e^{ikr} + \frac{V_g}{E_k - E_{k_g}} e^{ik_g r} \equiv e^{ikr} \left[1 - \frac{1}{\Delta_B} e^{igr} \right]$$

где $\Delta_B = (E_k - E_{k_g})/V_g = 2(E_k - E_B)/V_g$

k и $k_g = k + g$ - волновой вектор в кристалле с учетом преломления

$$|\psi(r)|^2 = 1 - \frac{2}{\Delta_B} \cos(gr)$$





Энергия нейтрона в кристалле

$$\tilde{E}_k = \frac{\hbar^2 \tilde{k}^2}{2m} = E_0 - V_0 + V_g \cdot \frac{1}{\Delta_B}$$

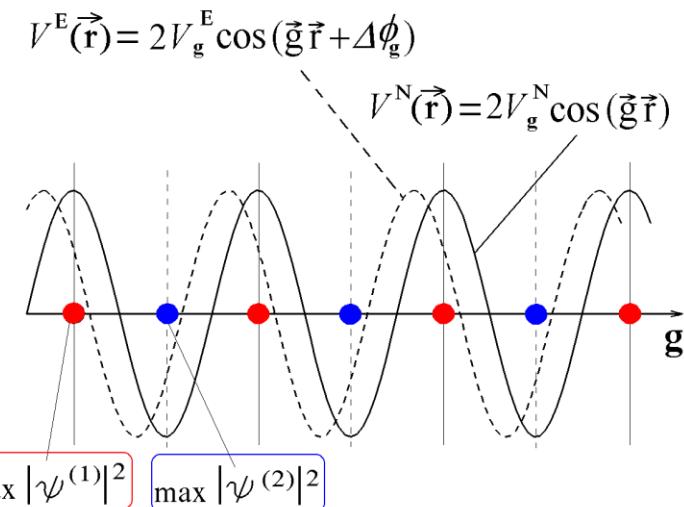
Для нецентросимметричного кристалла

$$|V_g| = v_g^N - \mu(\boldsymbol{\sigma} H_g^S) - D(\boldsymbol{\sigma} E_g),$$

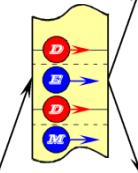
Value of electric field

$$E = \langle \psi | E(\mathbf{r}) | \psi \rangle = E_g \frac{2|V_g^N|}{E_k - E_{k_g}}$$

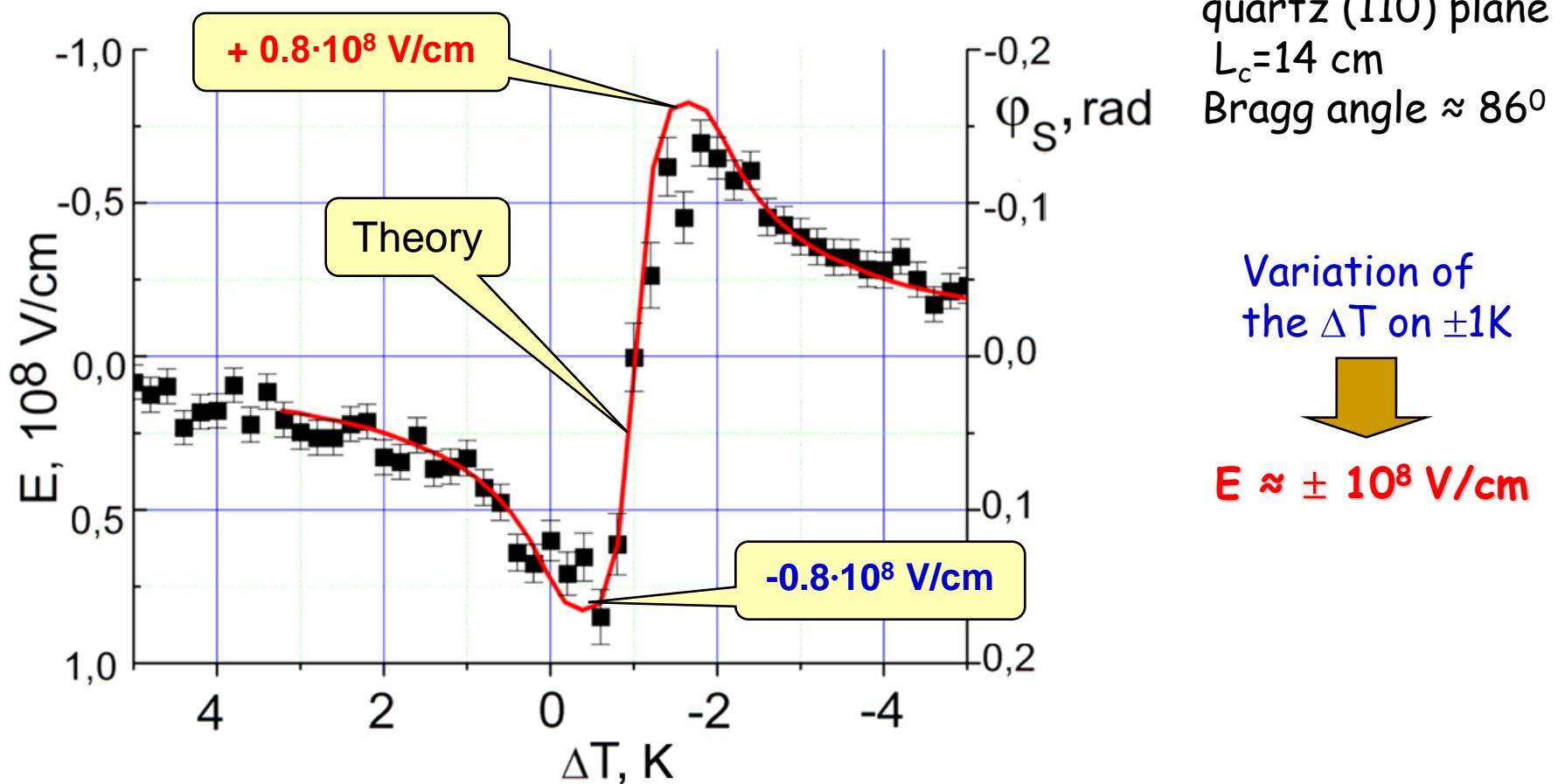
$$E_g = g v_g^E \sin(\Delta\Phi_g) - \text{g-harmonics.}$$

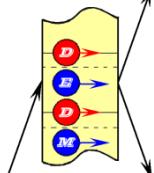


Энергия нейтрона в кристалле зависит от направления спина вблизи брэгговского отражения

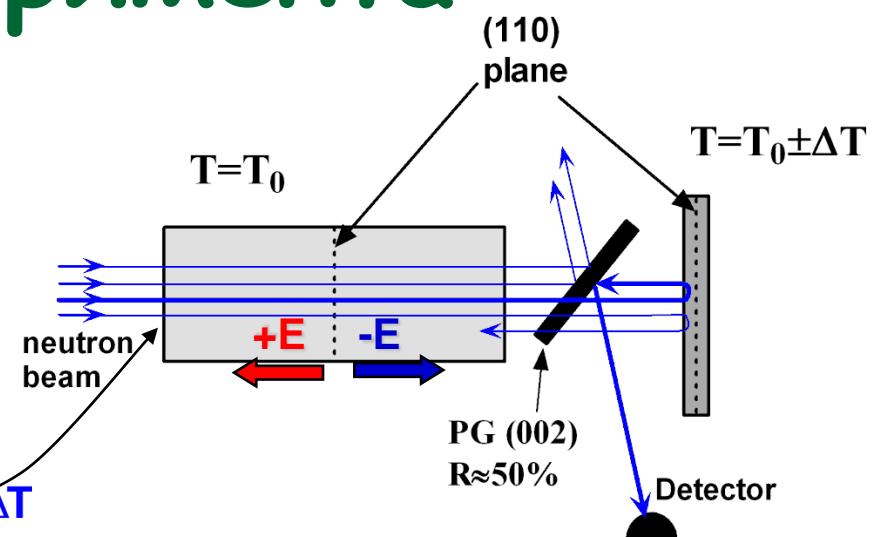
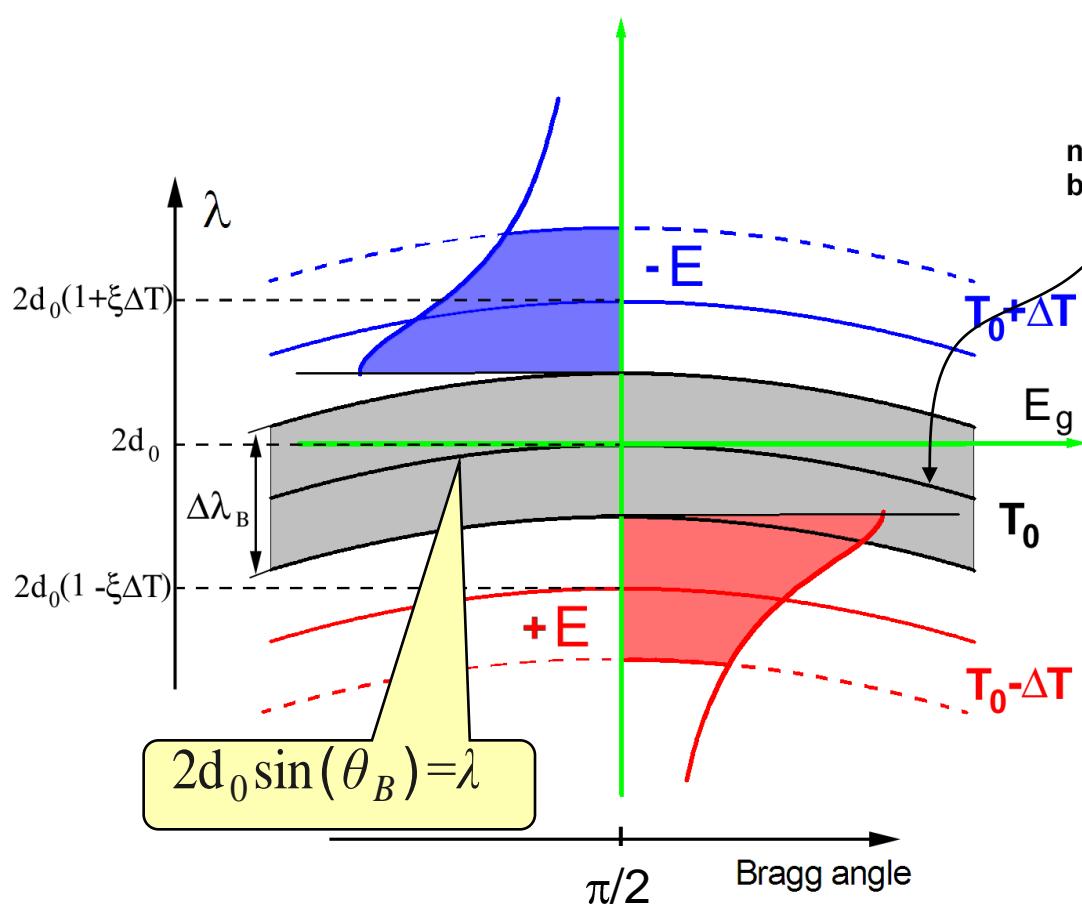


Электрическое поле





Идея ЭДМ эксперимента



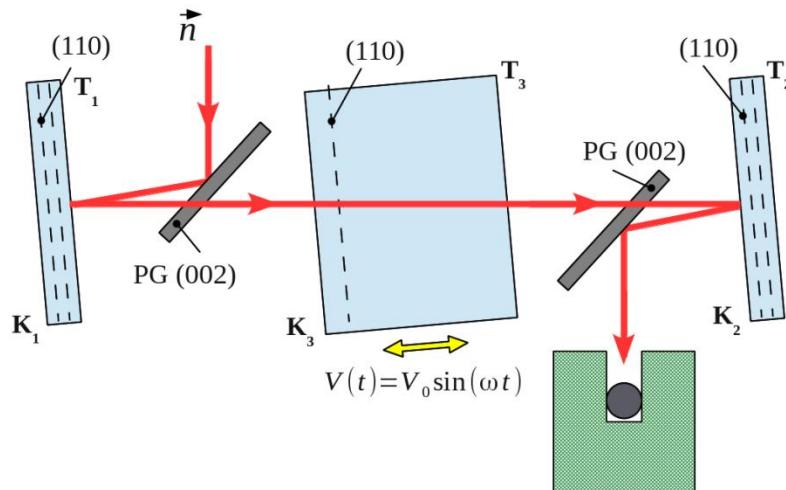
For (110) plane of quartz crystal
 $\Delta T = 1 \text{ K} \rightarrow \Delta \lambda_B / \lambda = 10^{-5}$

For $\pi/2$ reflection
 $E \parallel v_n$ and $H_s \sim [E \times v_n] \approx 0$

Показатель преломления нейтрона вблизи брэгговского отражения

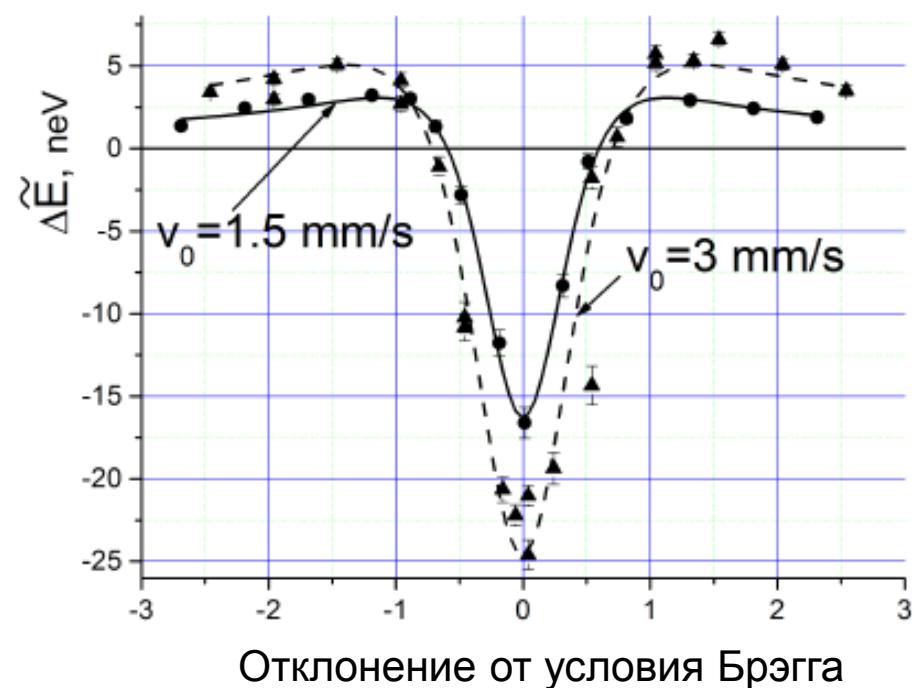
$$\tilde{E}_k = \frac{\hbar^2 \tilde{k}^2}{2m} = E_0 - V_0 + V_g \cdot \frac{1}{\Delta_B}$$

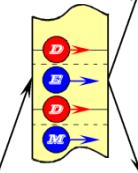
Эффект ускорения
нейтрона



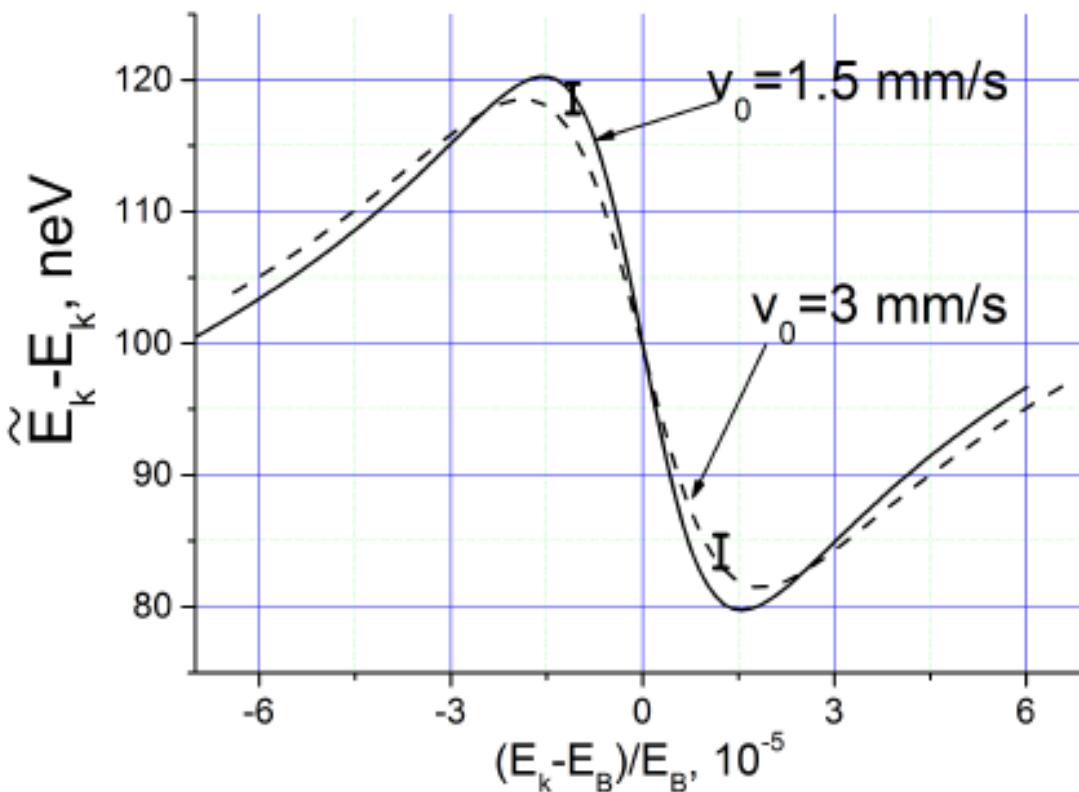
Частота колебаний кристалла – 4 кГц

Кристаллы K1, K2 и K3, изготовленные из кварца, плоскость (110), располагались в параллельном положении при угле дифракции $\theta_B = 89^\circ$ ($\lambda = 4.9\text{\AA}$).

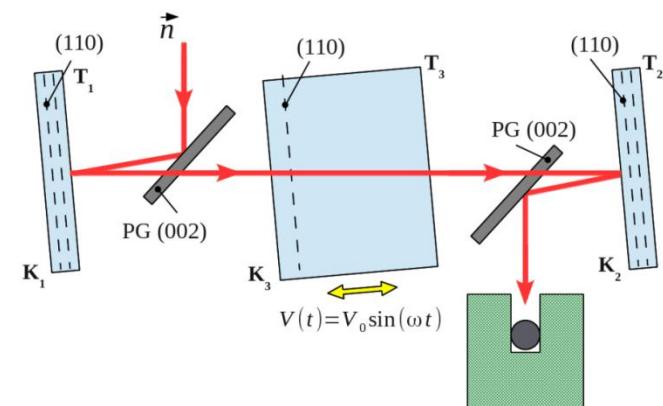




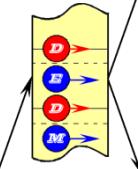
Показатель преломления вблизи брэгговского отражения



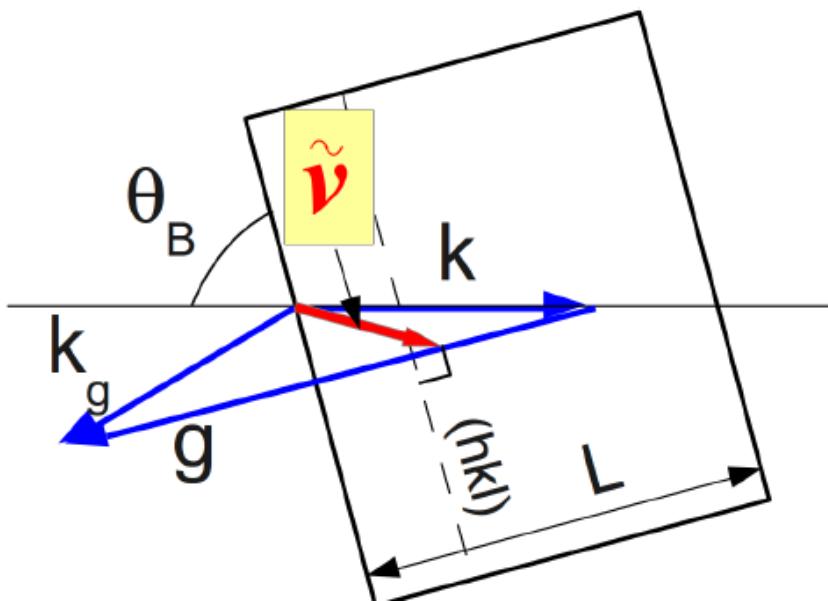
Изменение энергии нейтрона фактически есть производная от потенциала взаимодействия нейтрона с кристаллом



$$\Delta \tilde{E}(t_0) = \tilde{E}_k(t_1) - \tilde{E}_k(t_2), \text{ где } t_1 \text{ и } t_2 - \text{ время влета и вылета нейтрона из кристалла}$$



Скорость распространения нейтрона через кристалл



Neutron velocity in crystal

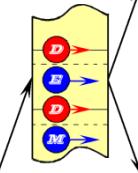
$$\psi(\mathbf{r}) = e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r})} + a_g e^{i(\mathbf{k}_g \mathbf{r})}$$

$$\text{где } a_g = \frac{V_g^N}{E_k - E_{k_g}}$$

$$\tilde{\mathbf{v}} = \frac{\hbar}{m} (\mathbf{k} + |a_g|^2 \mathbf{g})$$

For the Bragg angle close to 90^0

$$k \simeq -g/2 \implies \tilde{v} = v_0(1 - 2|a_g|^2)$$



Дисперсия скорости вблизи брэгговского условия

$$\frac{d\tilde{v}}{dE} = \frac{v_B}{2E_B} \left(1 - \frac{|V_g|^2 E_B}{2\Delta E^3} \right)$$

here $\Delta E = E_k - E_B$ — deviation from Bragg condition.

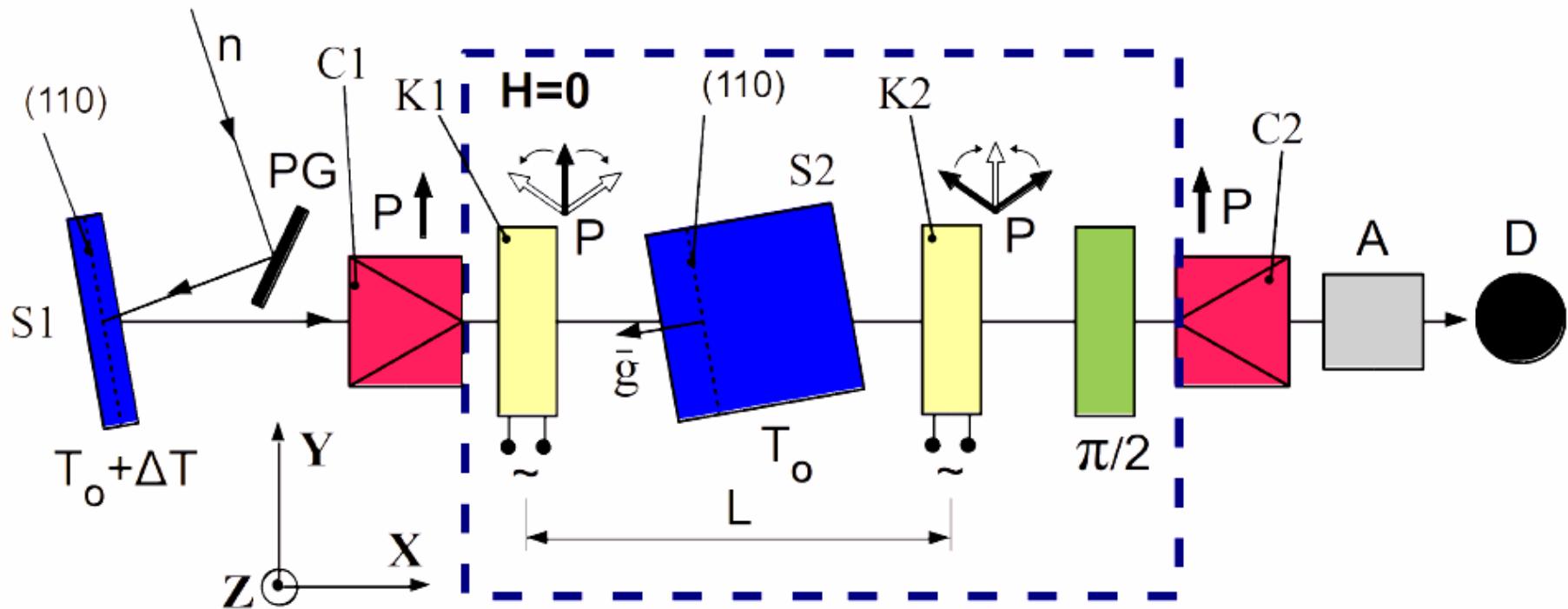
$v_B = \sqrt{2E_B/m}$ — Bragg neutron velocity

First term is a normal dispersion, second is abnormal term caused by reflected wave. This term has resonance shape and reverses the sign on Bragg condition.

For the case ($\Delta E \simeq |V_g|$), second term is equal to

$$\frac{E_B}{2|V_g|} \sim \frac{1}{n-1} \sim 10^5$$

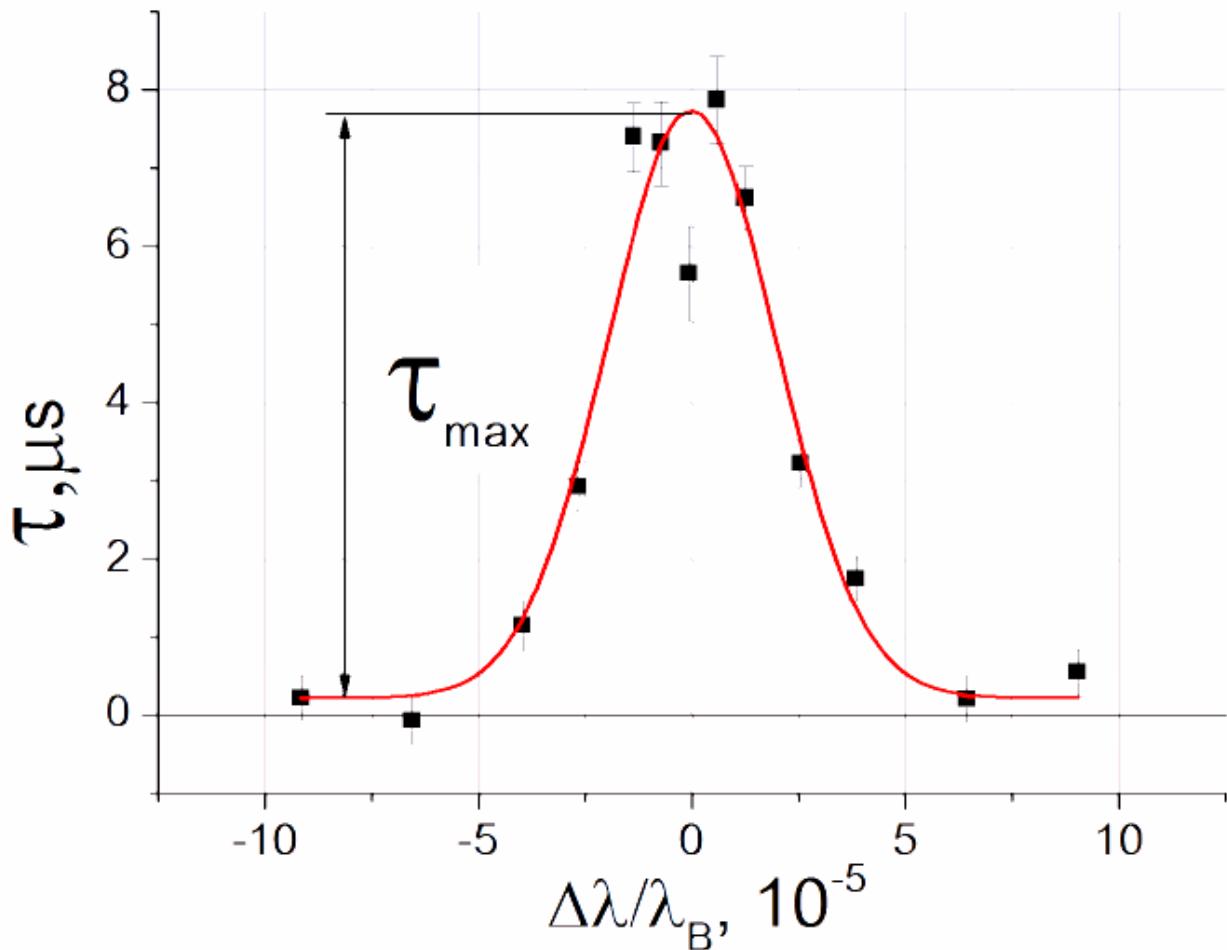
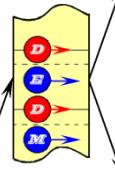
Экспериментальная установка



Method of separated oscillated field was used. $\nu \simeq 4\text{kHz}$.

Quartz, (110) plane ($\lambda \simeq 4.9\text{\AA}$), $\theta_B = 87^\circ$, crystal length $L=10\text{ cm}$.

Время задержки нейтрона в кристалле



Dispersion value

The

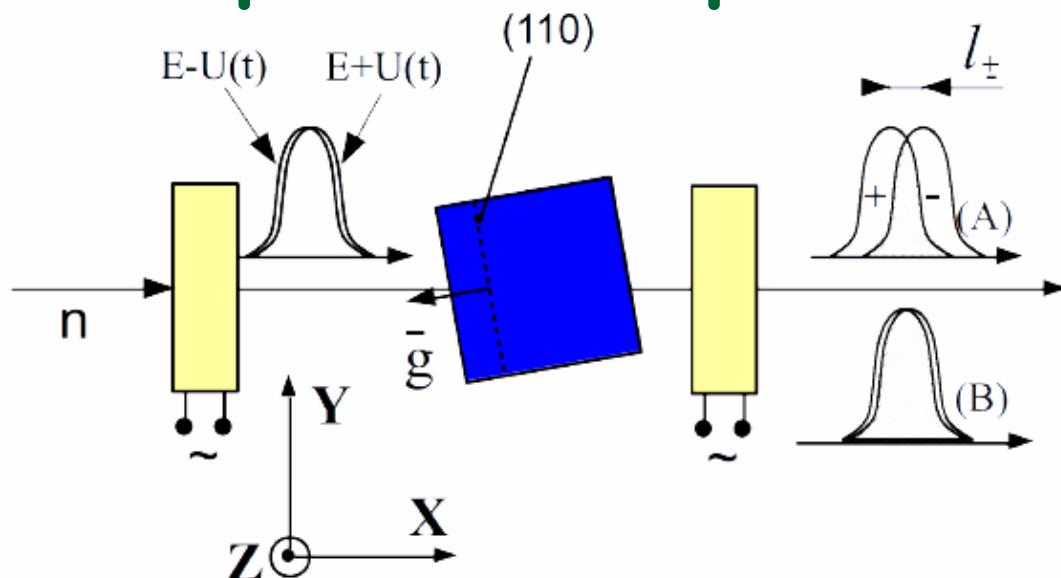
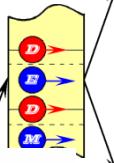
$$\Delta\lambda/\lambda_B \simeq 5 \cdot 10^{-5}$$

gives $\tau_0 \simeq 7.5 \mu\text{s}$, for the $\tau_L = 125 \mu\text{s}$, i.e.

$$\tau_0/\tau_L \simeq (6 \cdot 10^{-2}),$$

Abnormal part has alternating sign and is about 1000 times more than standard.

Ускорение нейтрона в магнитном поле



Let in a region

$$x = [-l/2, +l/2]$$

$$B(t) = B_0 \sin(\omega t)$$

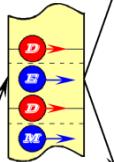
and

$$B(t) = 0, -l/2 > x > l/2$$

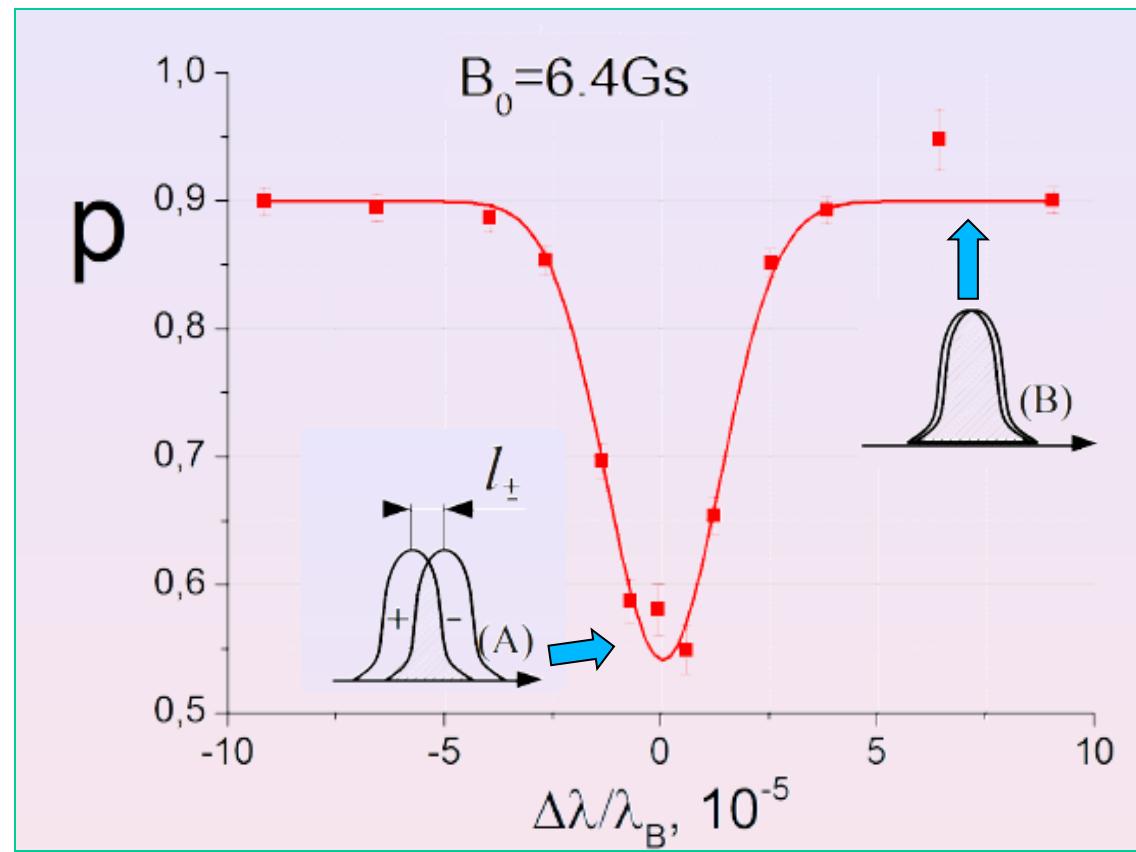
Energy difference of two state

$$\Delta E_{\pm}(t) = 4\mu B_0 \cdot \sin \omega t \sin \frac{\omega t_B}{2} = 2\sqrt{2}\mu B_0 \sin \omega t,$$

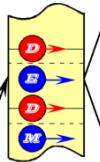
the last term written for our experimental setup (time of neutron stay in coil t_B equal to 1/4 oscillation period, i.e. $\omega t_B = \pi/2$, $\nu = 4\text{kHz}$).



Величина деполяризации в зависимости от отклонения от условия Брэгга



Изменение энергии нейтрона на $\sim 10^{-10}$ эВ приводит к уменьшению поляризации почти в 2 раза.



Размер волнового пакета

Beam polarization is proportional to the packet overlapping area

$$p \simeq \frac{l_p - |l_{\pm}|}{l_p},$$

Value of spatial splitting

$$|l_{\pm}|_a = |\Delta\tau_{\pm}|_a v_n \simeq \frac{|\Delta E_{\pm}|_a}{E} \cdot K_d v_n,$$

The value of $K_d = \Delta\tau / (\Delta E / E) \approx 0.1$ second.

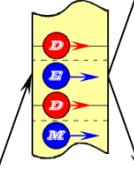
$$l_p = \frac{|\Delta E_{\pm}|_a}{E} \cdot K_d v_n \frac{1}{1-p} = 2 \cdot 10^{-5} \frac{B_0}{1-p} \simeq 4,3(4) \cdot 10^{-4} \text{ cm}.$$

The wave size from the uncertainty principle

$$l_{p0} > \frac{1}{2\Delta k} \simeq 4 \cdot 10^{-4} \text{ cm},$$

in our experiment $\Delta k = 1.2 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$ is the Bragg width for (110) quartz plane.

Заключение



При прохождении нейтрона через совершенный кристалл вблизи брэгговского условия возникает ряд новых эффектов:

1. В случае нецентросимметричного кристалла может наблюдаться **эффект вращения спина нейтрона** за счет швингеровского взаимодействия с электрическим полем кристалла. **Величина этого поля достигает 10^8 В/см для кристалла кварца.** Данное явление планируется использовать в эксперименте по поиску **электрического дипольного момента нейтрона**.
2. Возникает **эффект аномальной временной дисперсии**. Дисперсия нейтрона при таких условиях может **на 3 - 4 порядка** превосходить аналогичную величину для свободного нейтрона.
3. Показатель преломления нейтрона в этих условиях **ведет себя резонансным образом с шириной порядка брэгговской ширины отражения** и **изменение энергии падающего нейтрона на величину $\sim 10^{-5}$ приводит к значительному (десятки процентов) изменению потенциала взаимодействия нейтрона с кристаллом.**