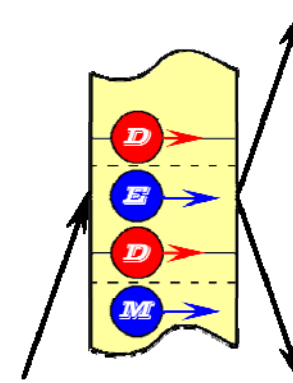
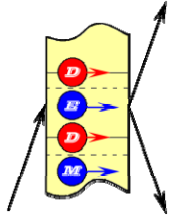


Кристалл-дифракционные исследования фундаментальных свойств нейтрона

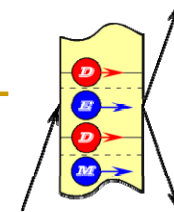
Воронин Владимир





План

- Поиск ЭДМ нейтрона
- Проверка эквивалентности инертной и гравитационной масс нейтрона
- Эксперимент по измерению электрического заряда нейтрона

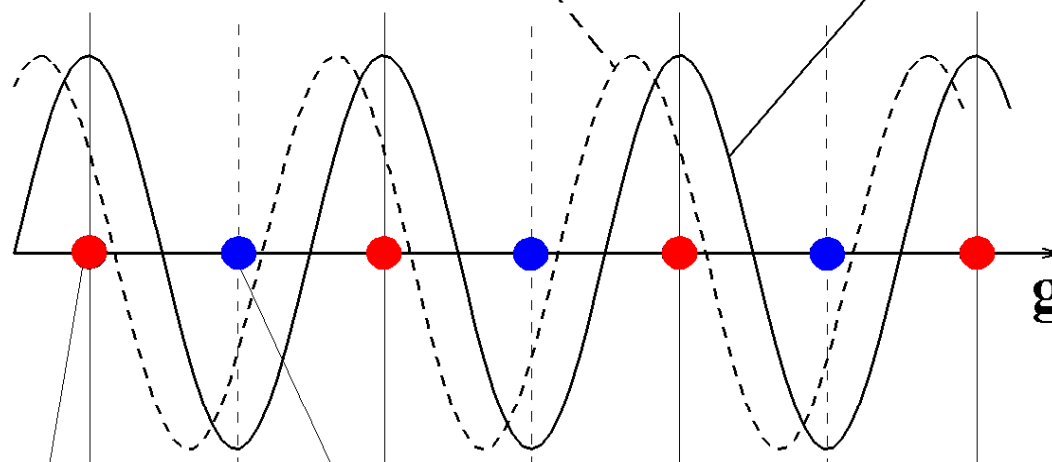


Нецентросимметричный кристалл

При дифракции нейтроны концентрируются на «ядерных» плоскостях, либо между ними, т.е. в областях максимумов или минимумов ядерного потенциала (движутся по «ядерным рельсам»):

$$V^E(\vec{r}) = 2V_g^E \cos(\vec{g}\vec{r} + \Delta\phi_g)$$

$$V^N(\vec{r}) = 2V_g^N \cos(\vec{g}\vec{r})$$



$$\max |\psi^{(1)}|^2$$

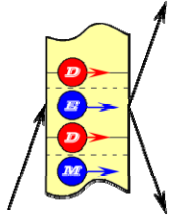
$$\max |\psi^{(2)}|^2$$

$$\left(\begin{array}{l} V^N = 2V_g^N \cos(\mathbf{gr}) \\ V^E = 2V_g^E \cos(\mathbf{gr} + \Delta\phi_g) \end{array} \right)$$

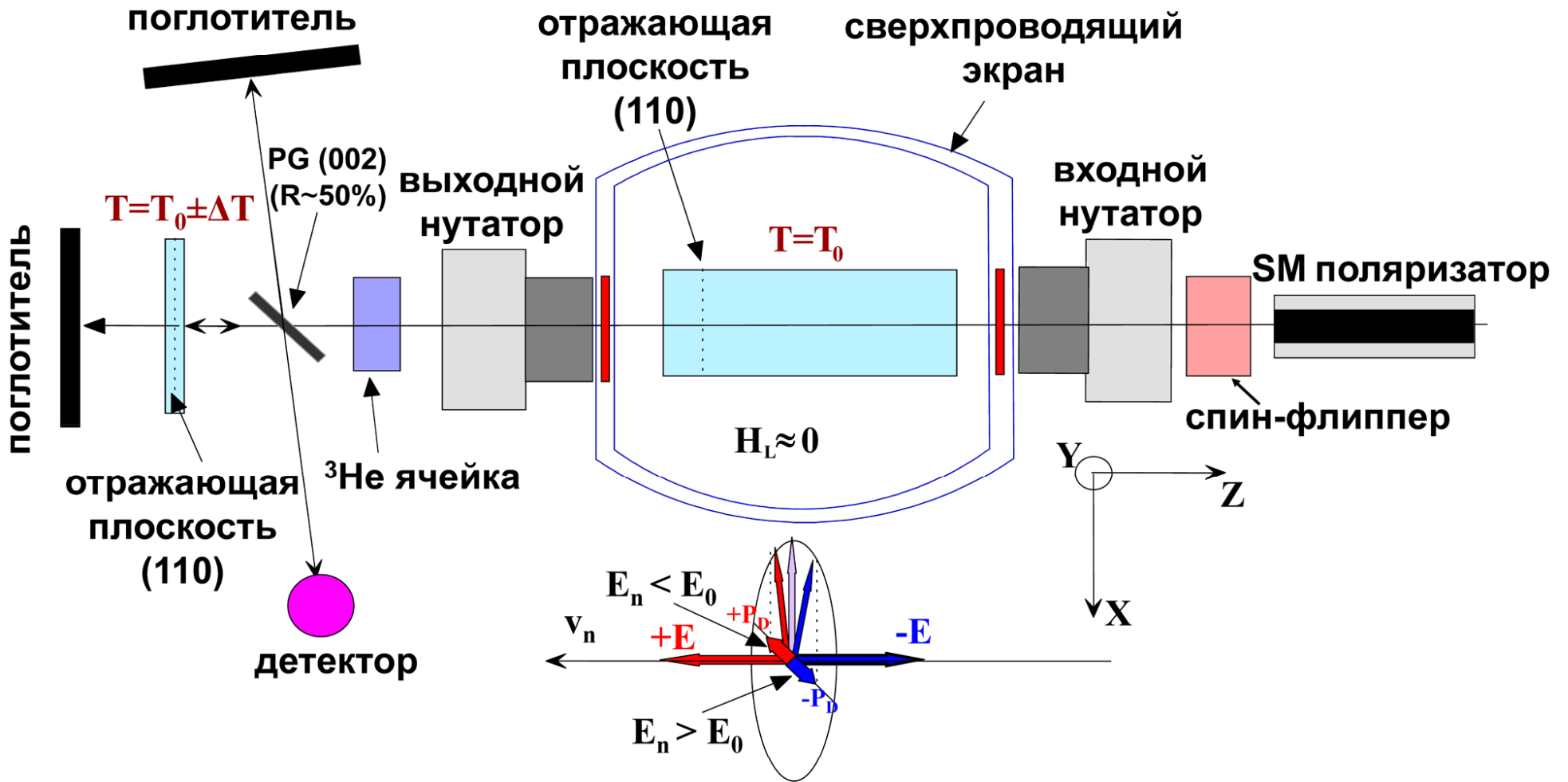
$$\left(\begin{array}{l} |\psi^{(2)}|^2 = 1 - \cos(\mathbf{gr}) \\ |\psi^{(1)}|^2 = 2 \cos^2(\mathbf{gr} / 2) = 1 + \cos(\mathbf{gr}), \end{array} \right)$$

В нецентросимметричных кристаллах $\Delta\phi_g \neq 0$

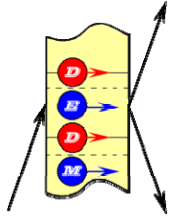
$$E(r) = -\text{grad } V^E(r) = 2V_g^E g \sin(\mathbf{gr} + \Delta\phi_g)$$



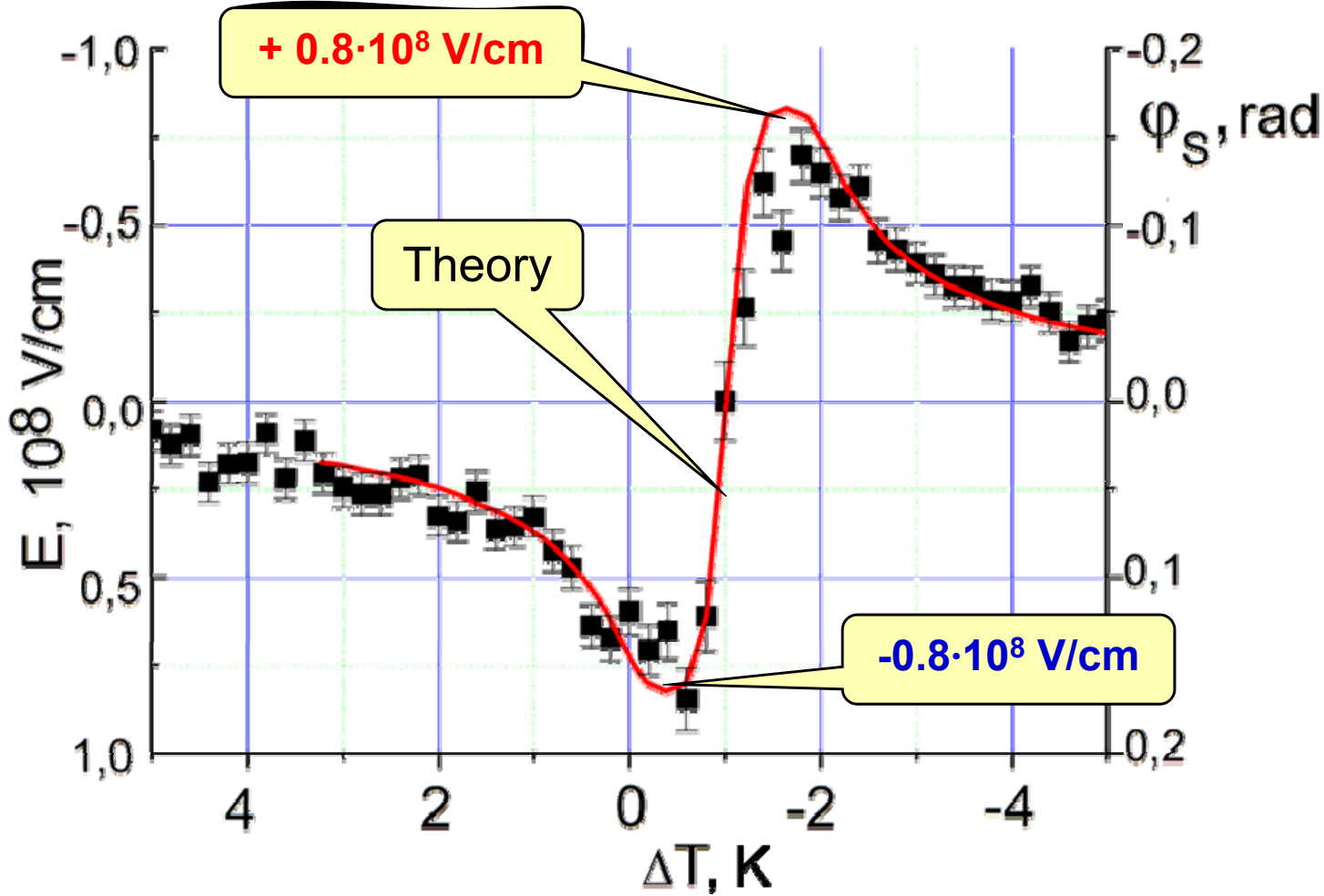
Экспериментальная установка



Цель — $(2-3)10^{-26}$ е см

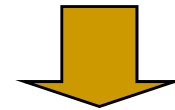


Кварц плоскость (110)



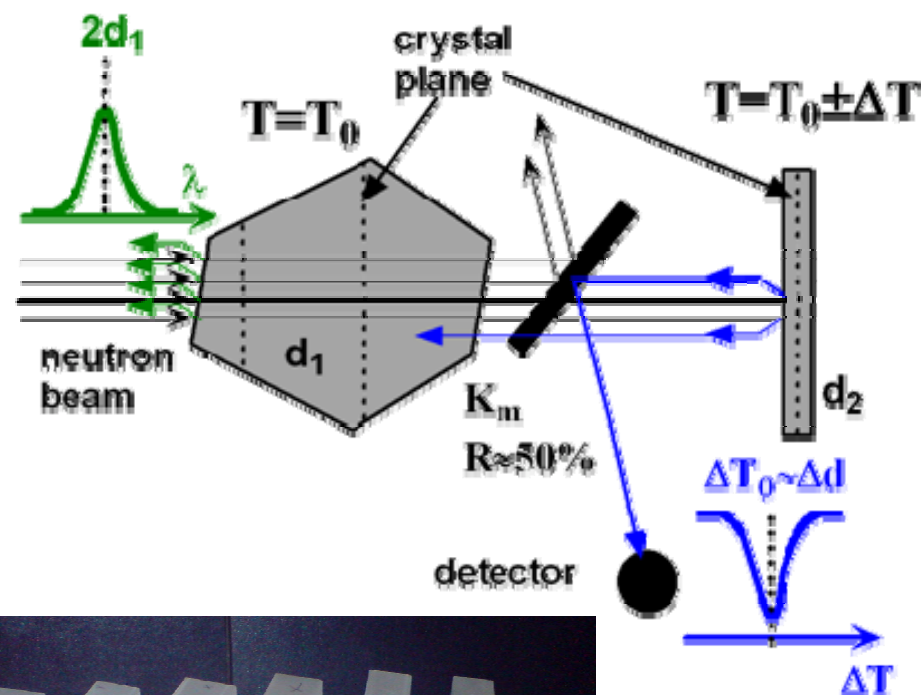
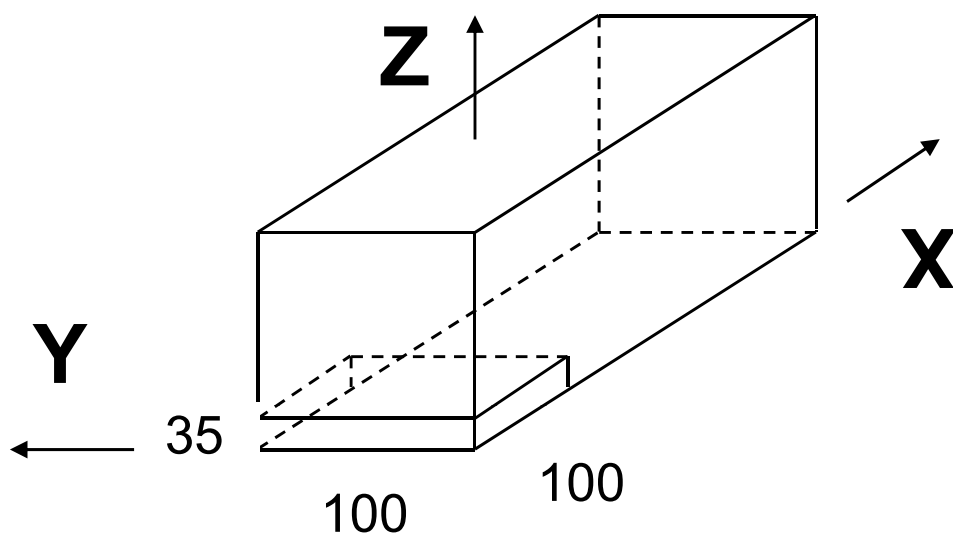
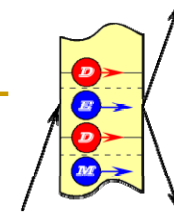
quartz (110) plane
 $L_c = 14$ cm
 Bragg angle $\approx 86^\circ$

Variation of
 the ΔT on ± 1 K

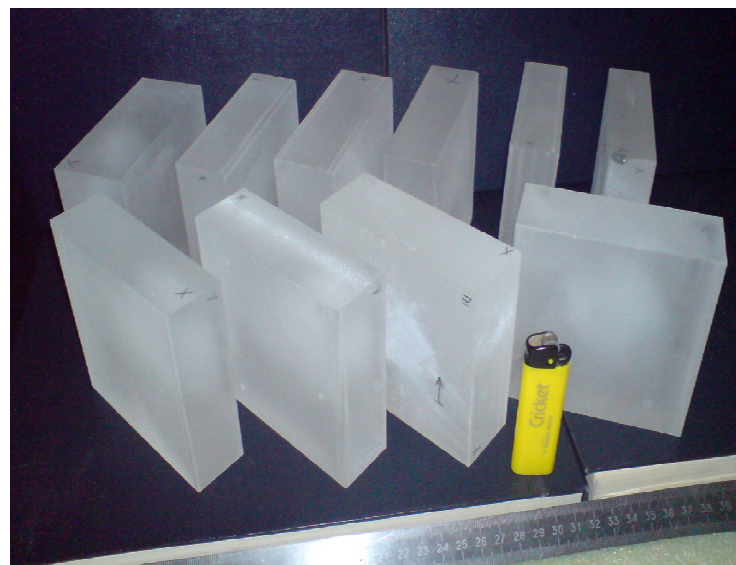


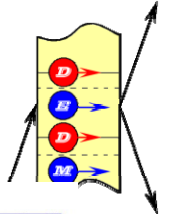
$E \approx \pm 10^8$ V/cm

Изготовлен кристалл

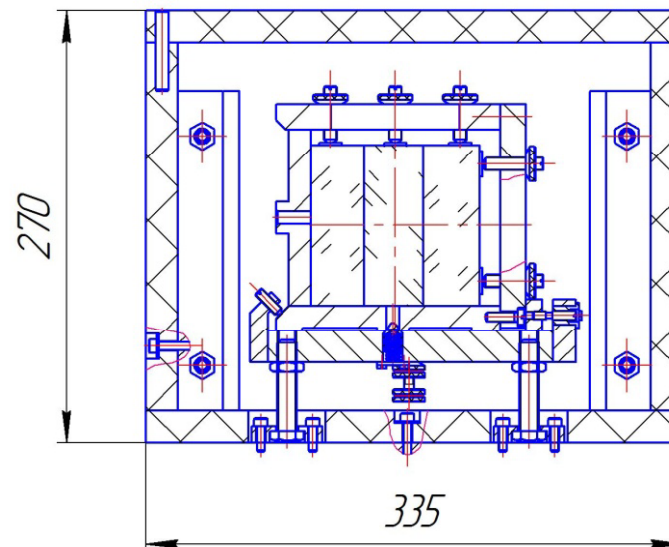
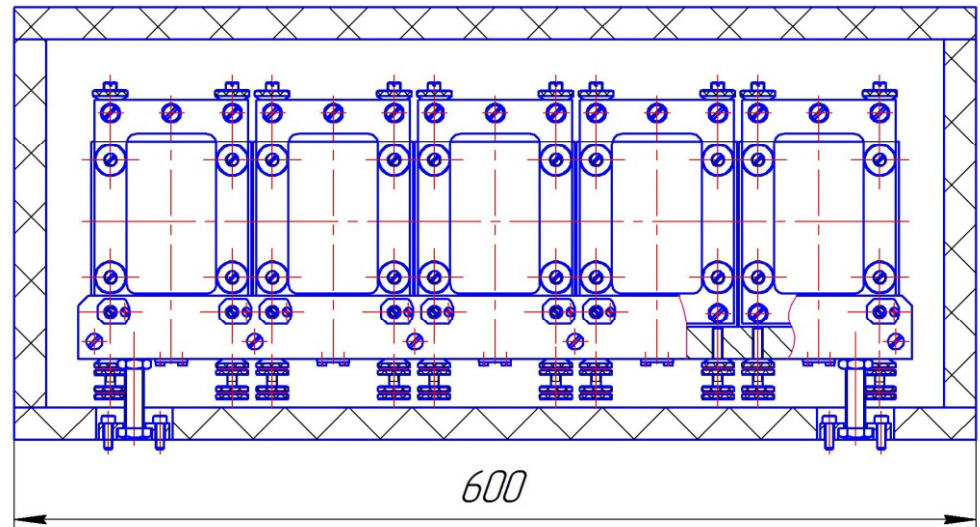
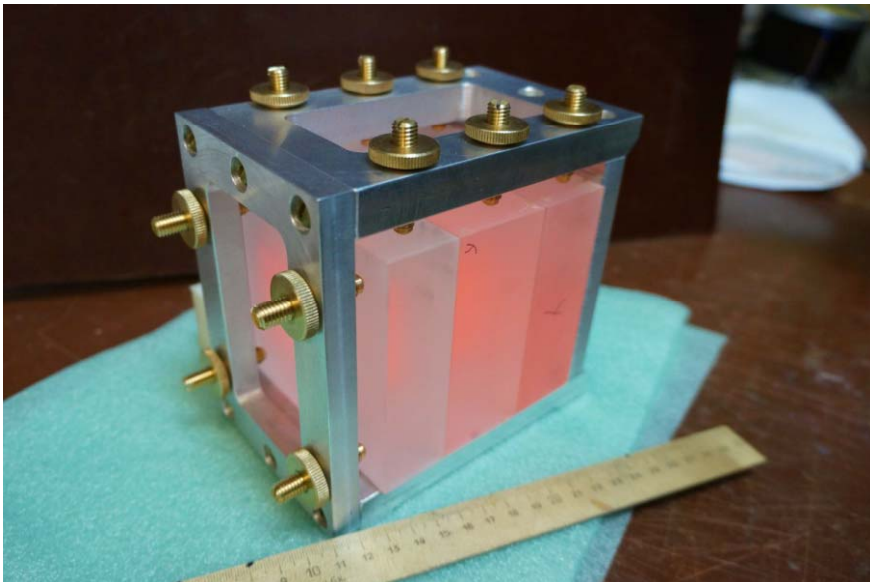


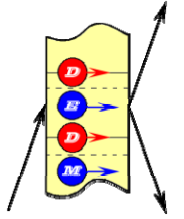
Приготовлен составной кристалл кварца – суммарный размер **105x100x500 мм³** (15 шт. по **35x100x100 мм³**) разброс межплоскостного расстояния протестирован новым методом **$\Delta d/d = \pm 2 \cdot 10^{-6}$**



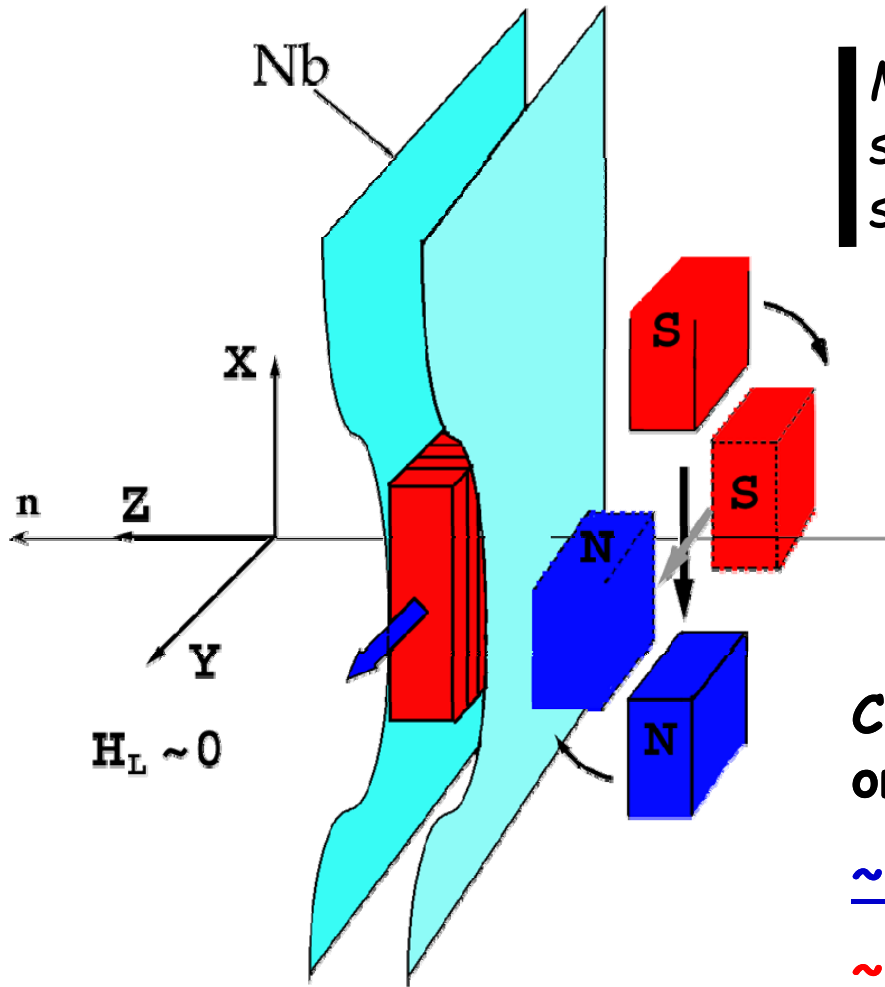


Кристаллодержатель

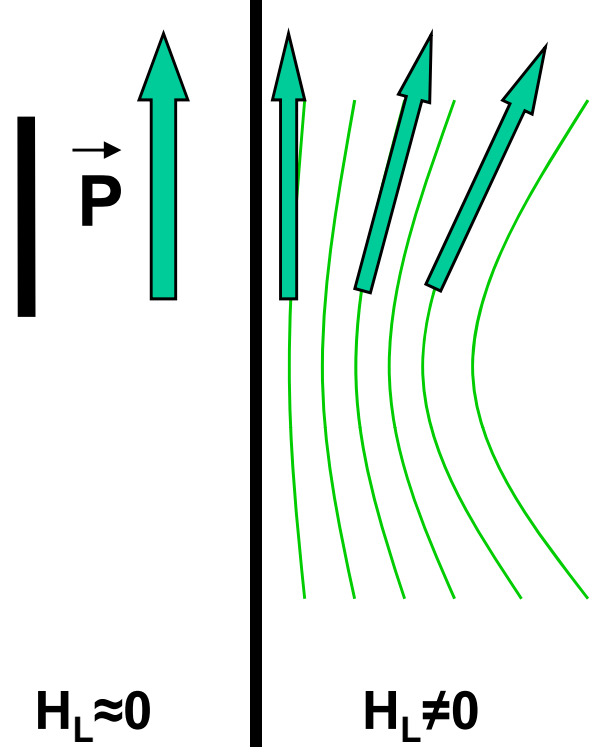




3-D анализ поляризации



Magnetic field || surface of the superconductor.

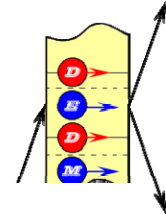


Current accuracy of spin orientation is

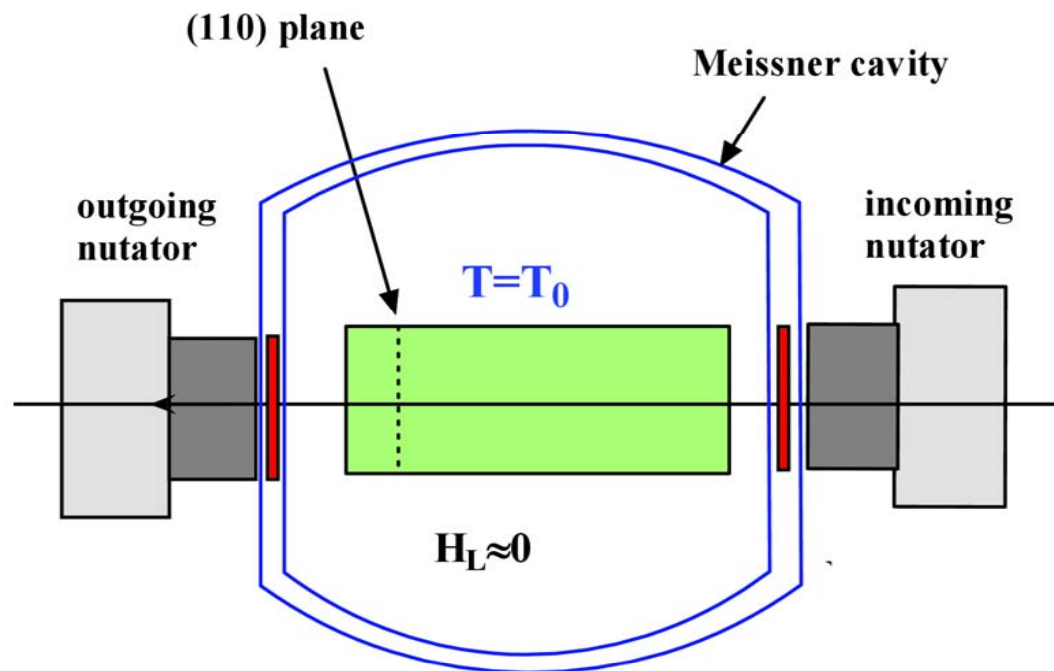
$\sim 10^{-2}$ rad for routine experiment

$\sim 10^{-3}$ rad can be reached for special cases

CRYOPAD-EDM

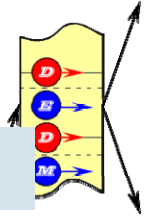


Система 3-х мерного анализа поляризации, основанная на использовании сверхпроводящих экранов.



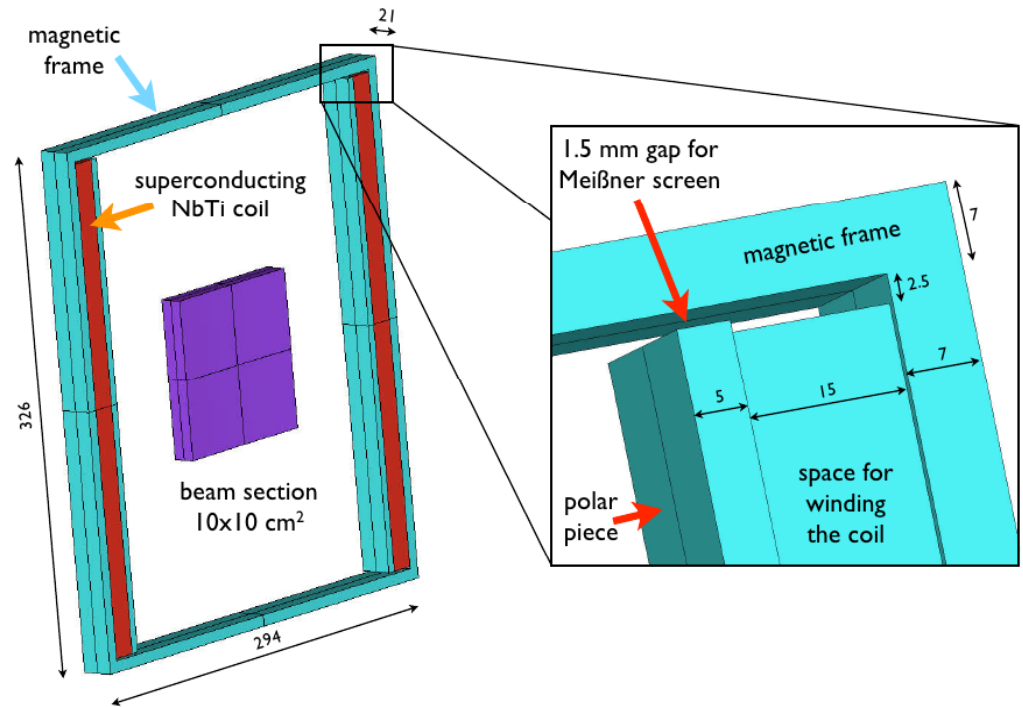
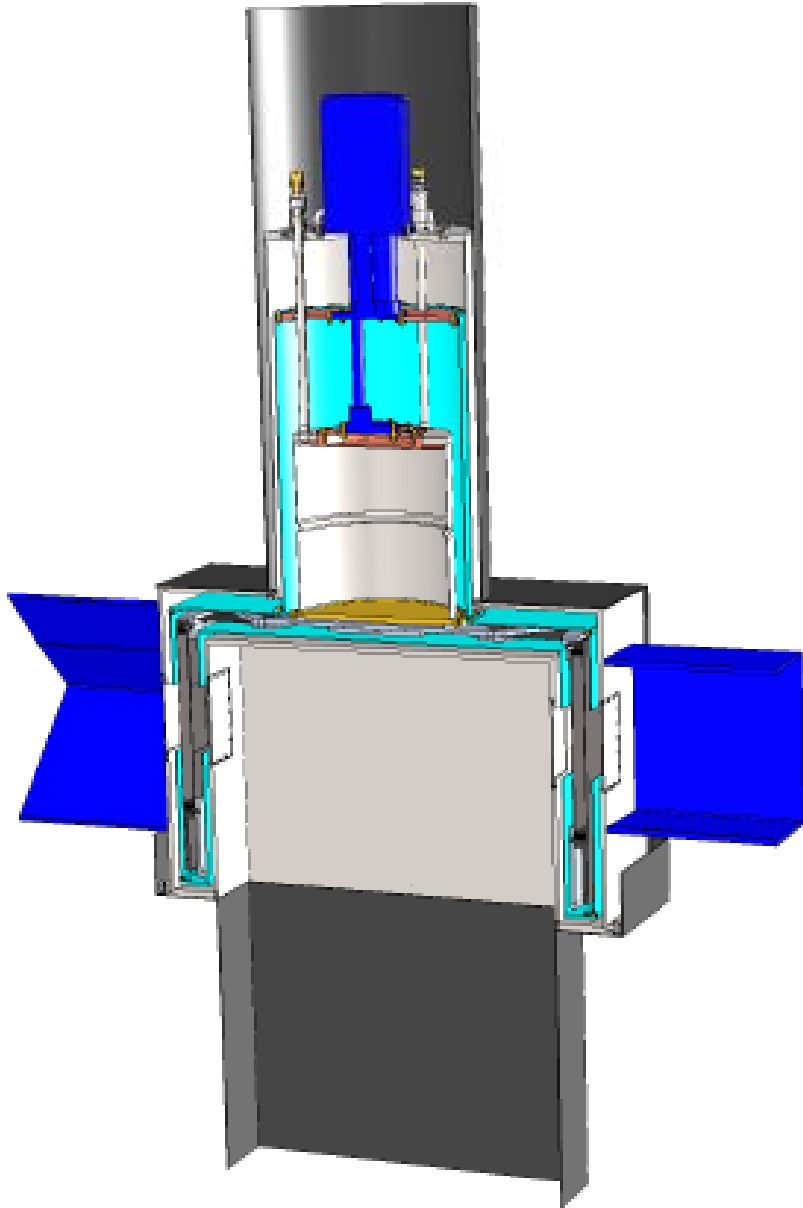
Основные технические характеристики системы:

- Внутренний диаметр свободного пространства для размещения экспериментального оборудования – **600 мм**.
- Размер входного и выходного окна для пучка нейтронов составляет **100x100 мм²**. Входное и выходное окна экрана для проводки пучка нейтронов плоскопараллельны друг другу с точностью не хуже **10⁻³ рад**.
- Точность и однородность поворота поляризации по всей апертуре пучка не хуже **10⁻³ рад**.

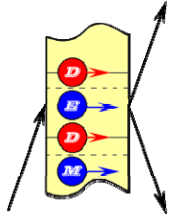


Общая концепция
CRYOPAD-EDM

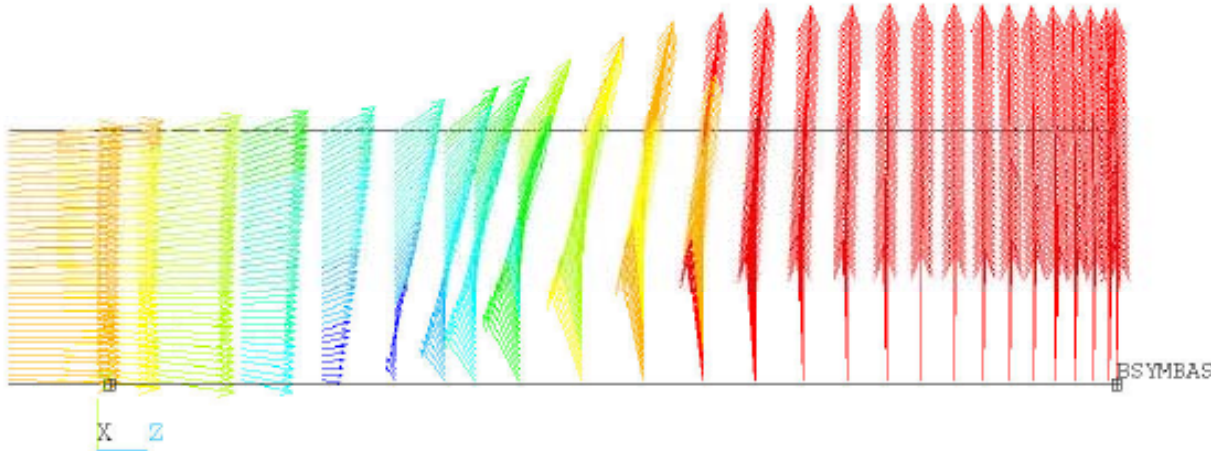
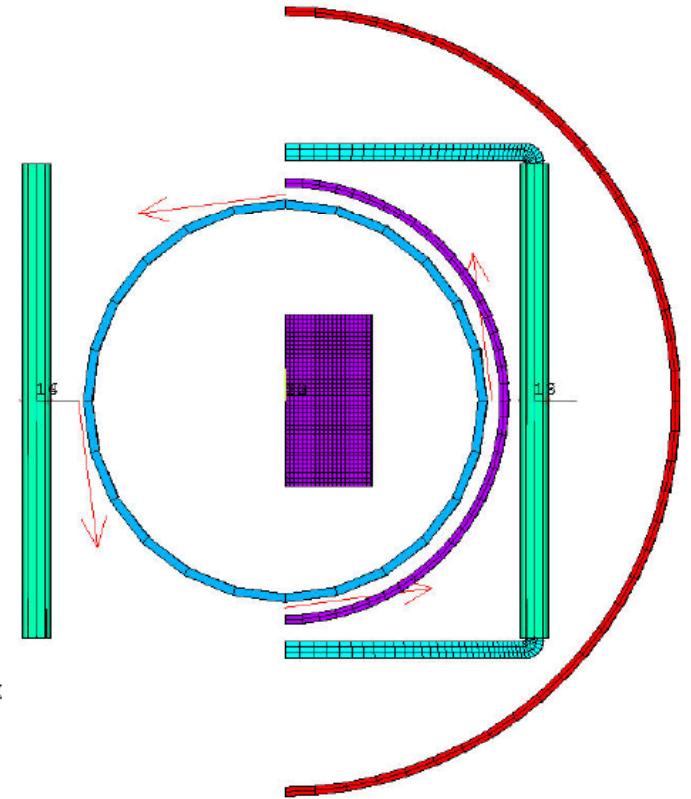
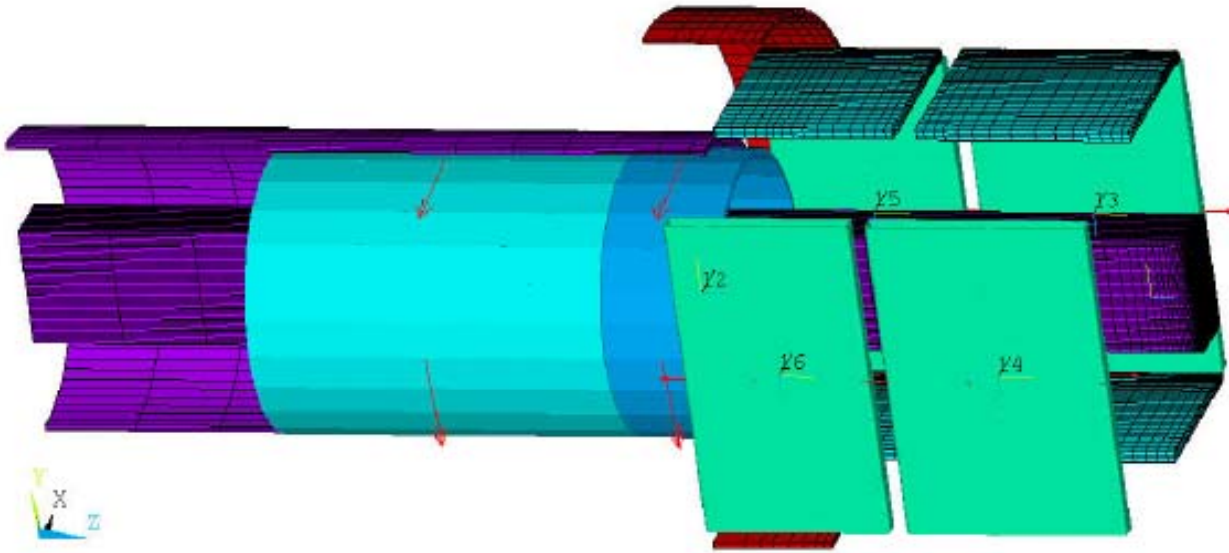
Катушка вращающего магнитного поля

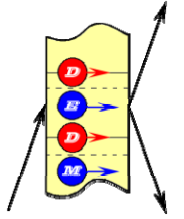


Однородность поля в рабочей области $\sim 10^{-4}$

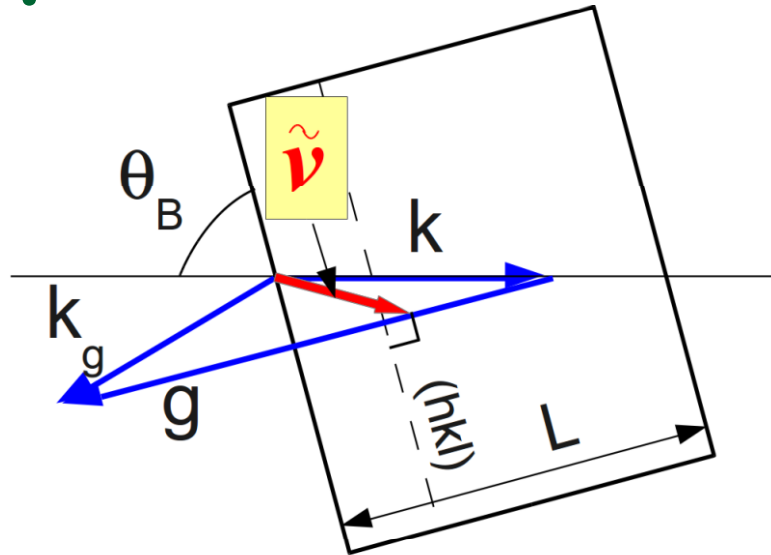


Input and output nutators





Скорость нейтрона вблизи условия Брэгга



Скорость нейтрона в кристалле

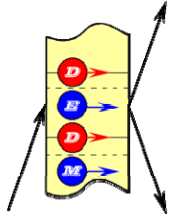
$$\psi(\mathbf{r}) = e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r})} + a_g e^{i(\mathbf{k}_g\mathbf{r})}$$

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

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

При углах дифракции близких к 90°

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



Дисперсия вблизи условия Брэгга

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

где $\Delta E = E_k - E_B$ — отклонение от условия Брэгга.

$v_B = \sqrt{2E_B/m}$ — скорость нейтрона, соответствующая условия Брэгга

Первое слагаемое — нормальная дисперсия, а второе — аномальная часть, обусловленная наличием отраженной волны. Аномальная часть резонансным образом зависит от энергии и меняет знак при пересечении брэгговского значения.

На границе применимости теории возмущений ($\Delta E \simeq |V_g|$), второе слагаемое становится равным

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

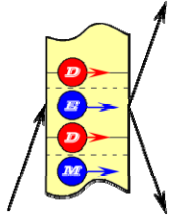
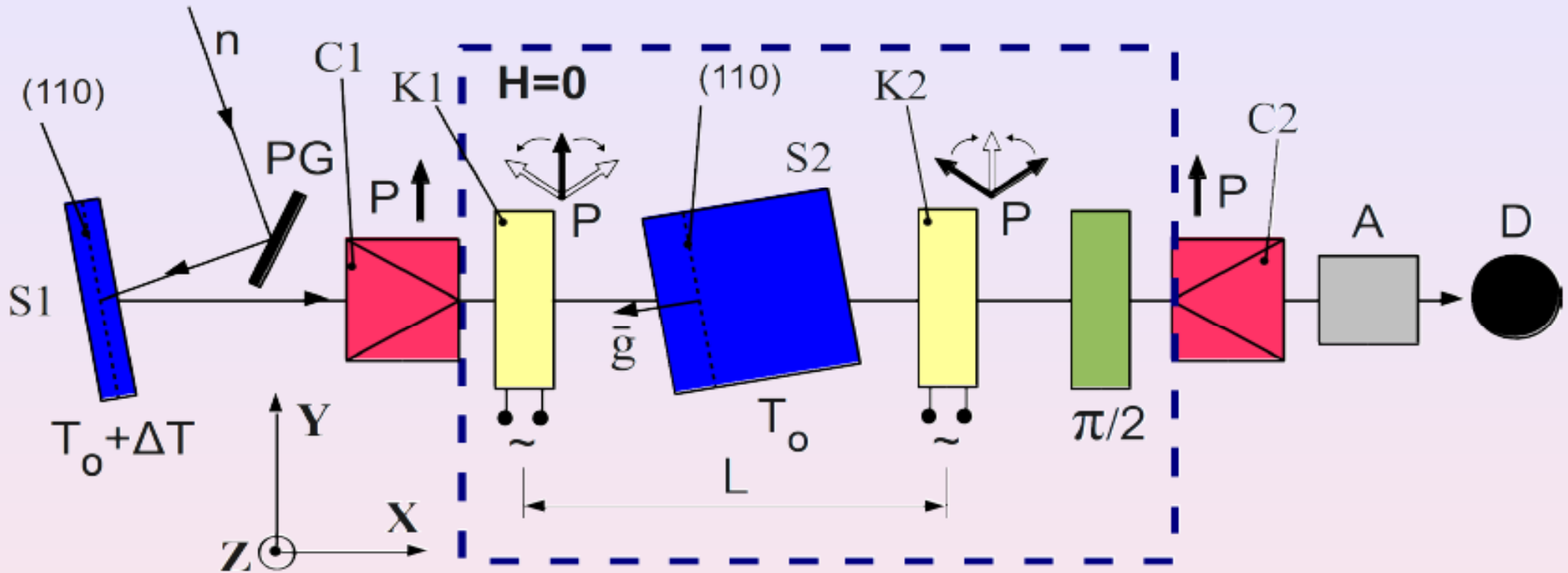
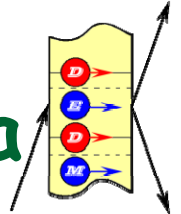


Схема эксперимента



Для измерения времени пролета использовался метод разделенных осциллирующих полей. $\nu \simeq 4 \text{ кГц}$.

Кварц, плоскость (110) ($\lambda \simeq 4.9 \text{ \AA}$), $\theta_B = 87^\circ$, длина кристалла $L=10 \text{ см}$.



Аномальное поведения дисперсии нейтрона

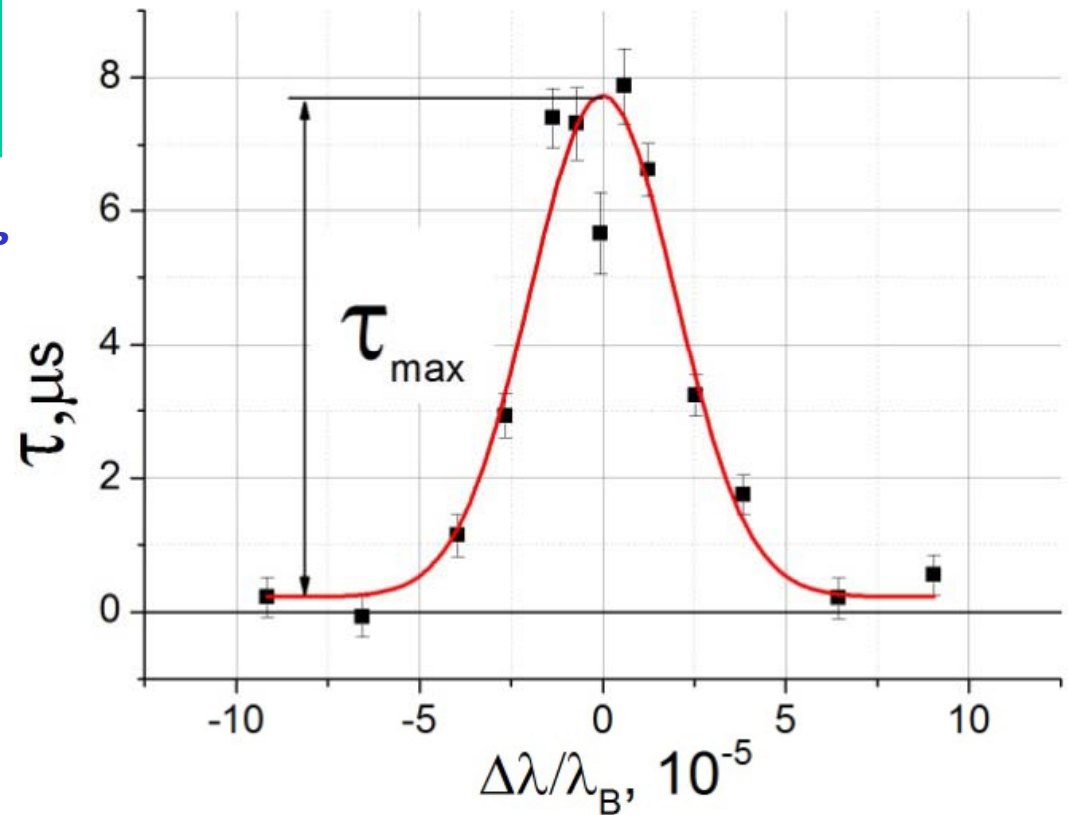
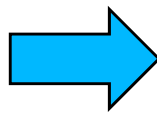
При энергиях, близких к брэгговским, величина дисперсии (dv/dE) для дифрагирующего нейтрона может на **3-4** порядка превосходить аналогичную величину для свободного нейтрона

Зависимость времени пребывания нейтрона в кристалле от отклонения от условия Брэгга

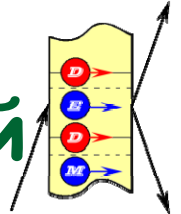
$$\frac{d\tilde{v}}{dE_k} = \frac{v_B}{2E_B} \left(1 - \frac{v_g^2 E_B}{2\Delta E^3} \right)$$

Аномальная часть

Величина дисперсии
Изменение
 $\Delta\lambda/\lambda_B \simeq 5 \cdot 10^{-5}$
дает $\tau_0 \simeq 7.5$ мкс,
при этом
 $\tau_L = 125$ мкс,
т.е.
 $\tau_0/\tau_L \simeq (6 \cdot 10^{-2})$,



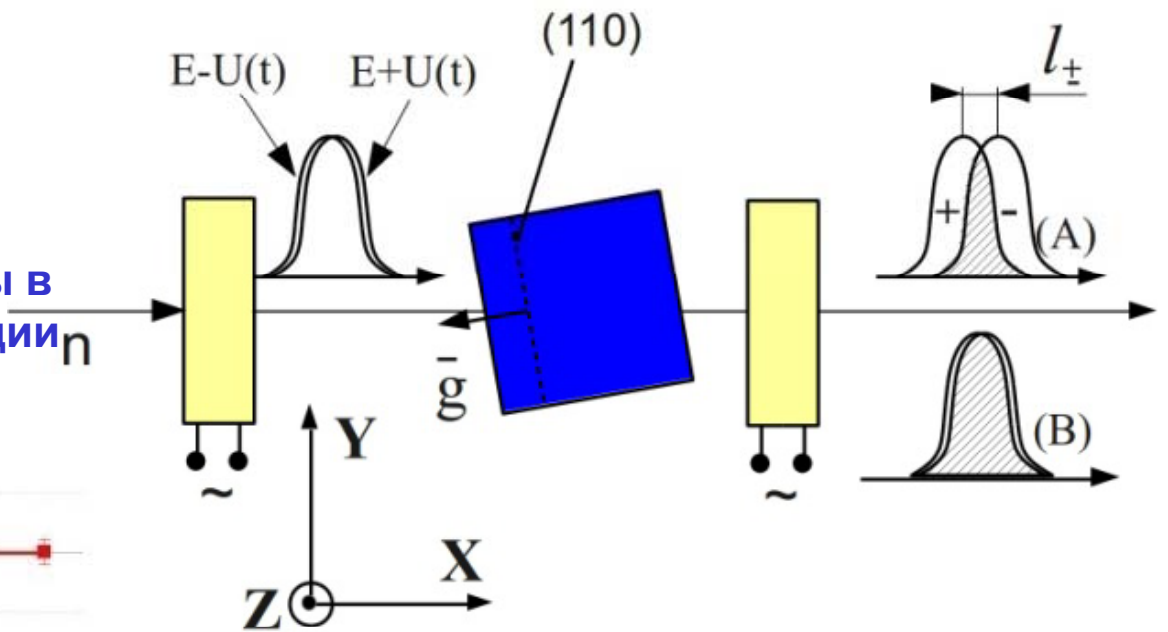
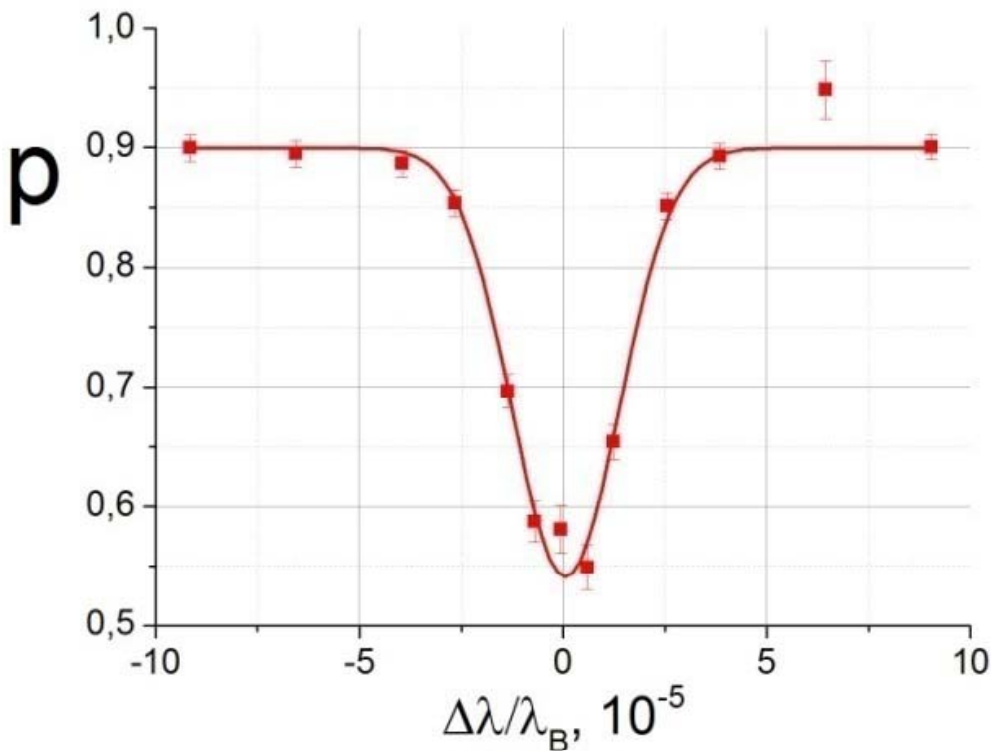
Аномальная часть знакопеременна и $2 \cdot 10^3$ раз больше нормальной



Возможность наблюдения малых изменений энергии нейтрона

$\Delta E_{\pm} \sim (10^{-10} - 10^{-11}) \text{ eV}$

Эффект расщепления нейтронной волны в магнитном поле приводит к деполяризации



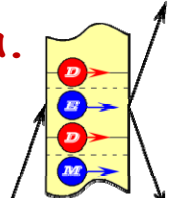
Размер волнового пакета

Из величины деполяризации

$4,3(4) \cdot 10^{-4} \text{ см}$

Из соотношения неопределенности

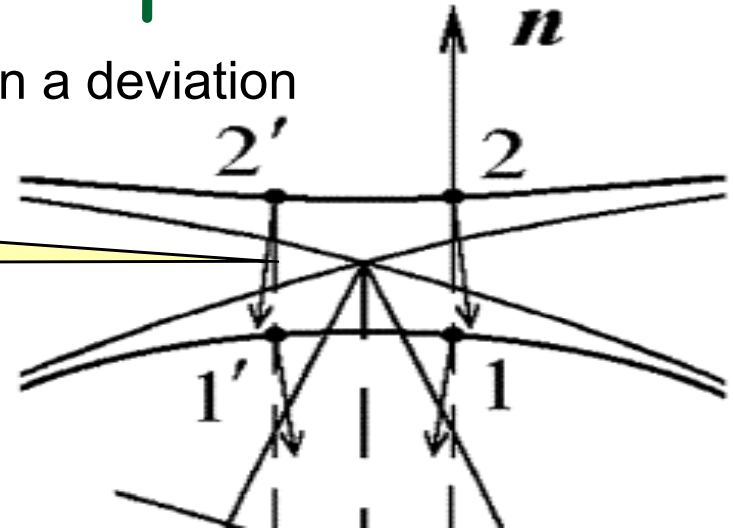
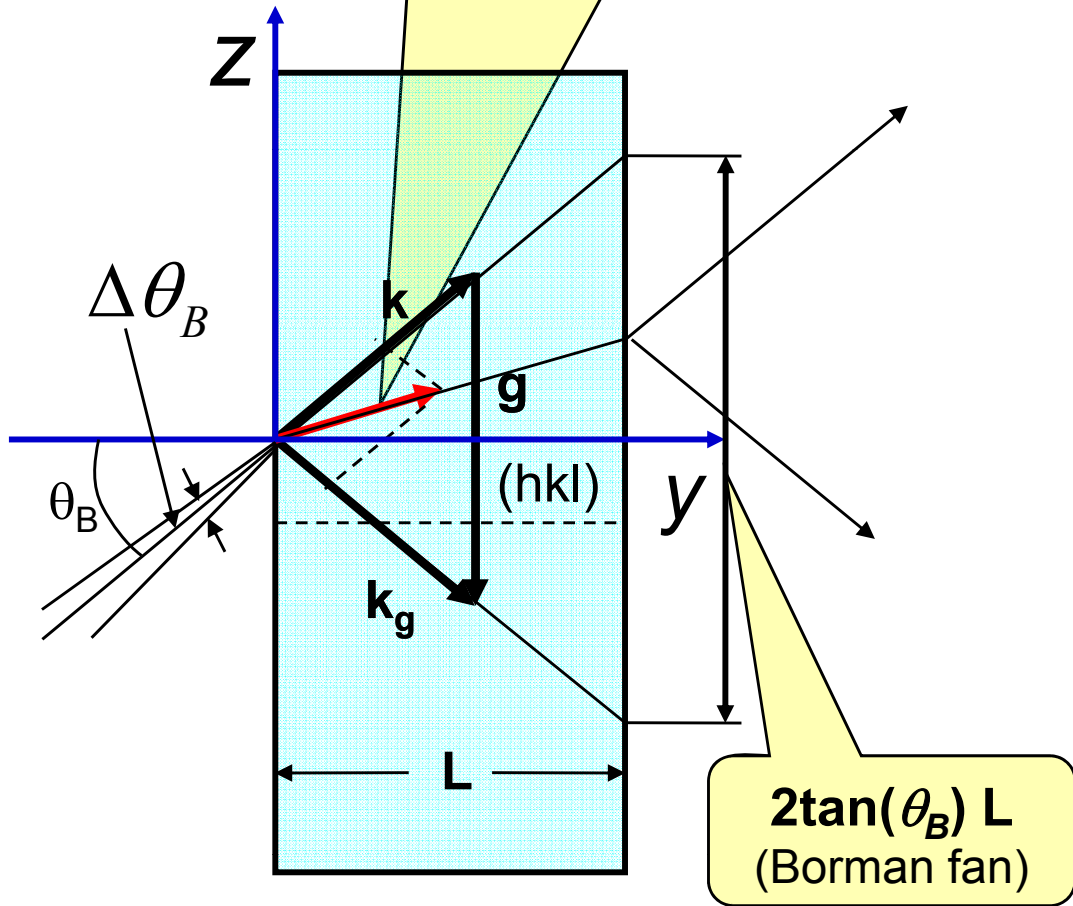
$l_{p0} > \frac{1}{2\Delta k} \simeq 4 \cdot 10^{-4} \text{ см}$



Траектория нейтрона в кристалле

j is normal to the dispersion surface and depends on a deviation from exact Bragg condition

$$j = \hbar/m(|a_g|^2 k_g + |a_0|^2 k)$$

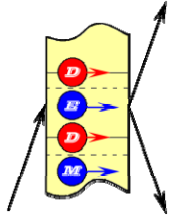


$$\Delta\theta_B \sim (1-5)'' \approx 0.001^{\circ}$$

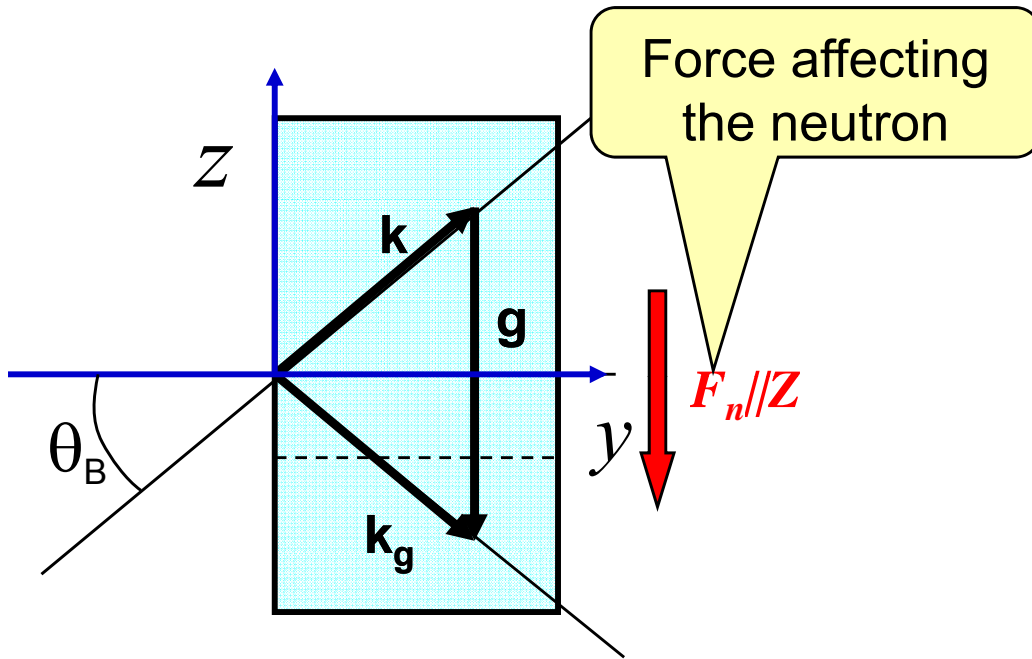
$$\theta_B \sim 45^{\circ}$$

Gain factor

$$\frac{2\theta_B}{\Delta\theta_B} \sim \frac{E}{V_g} \sim 10^5$$



Дифракция нейтрона при наличии внешней силы



Neutron trajectory equation (Laue diffraction case):

$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \pm \frac{\tan^2(\theta_B) \pi}{m_0} \frac{F_n}{d 2E_n}$$

Equation for free neutron:

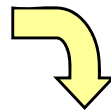
$$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{F_n}{2E_n}$$

Gain factor for the diffracting neutron



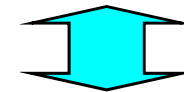
$$K_d = \pm \frac{\tan^2(\theta_B) \pi}{m_0 d}$$

For silicon (220) planes

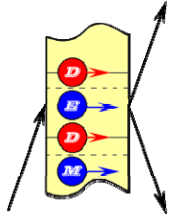


$$K_d = \tan^2(\theta_B) \times 2 \cdot 10^5 \xrightarrow{\theta_B (84^\circ \div 87^\circ)} (10^7 \div 10^8)$$

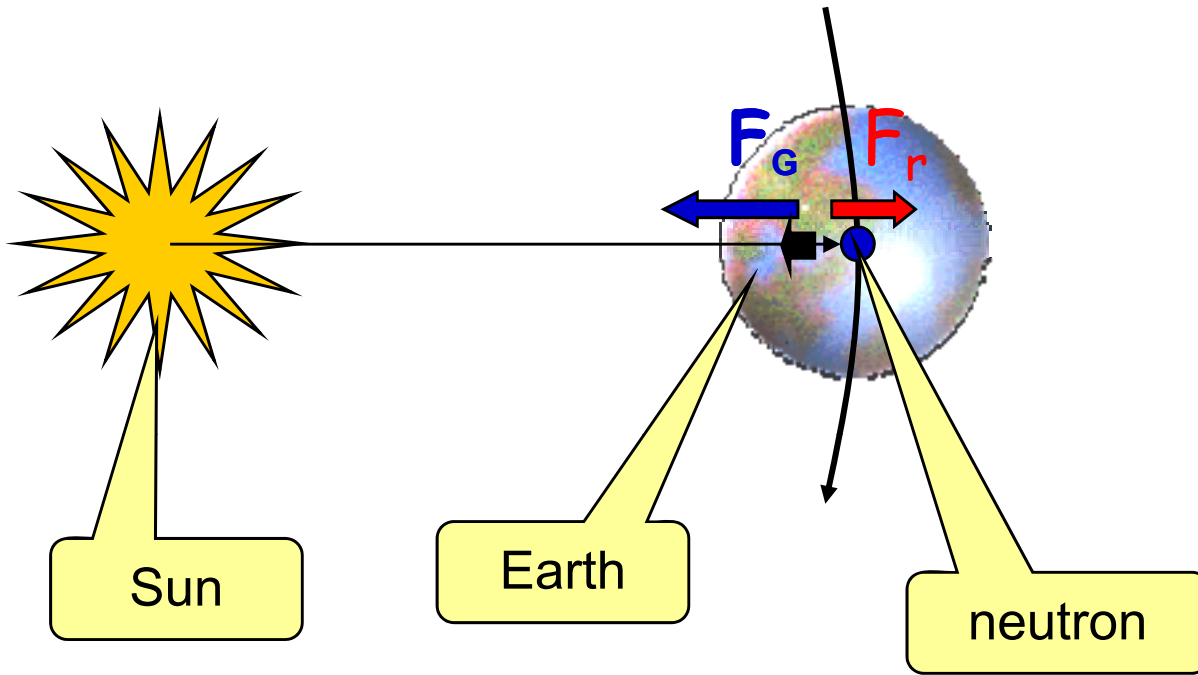
10 cm crystal



1 km free flight

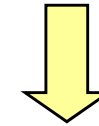


Идея эксперимента по измерению m_i/m_G

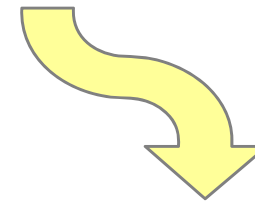


$F_G = F_r$ for the Earth

$$? \frac{m_n^i}{m_n^G} \neq \frac{m_\oplus^i}{m_\oplus^G} ?$$



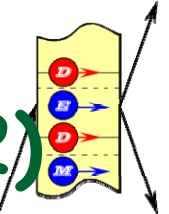
$F_G \neq F_r$ for the neutron



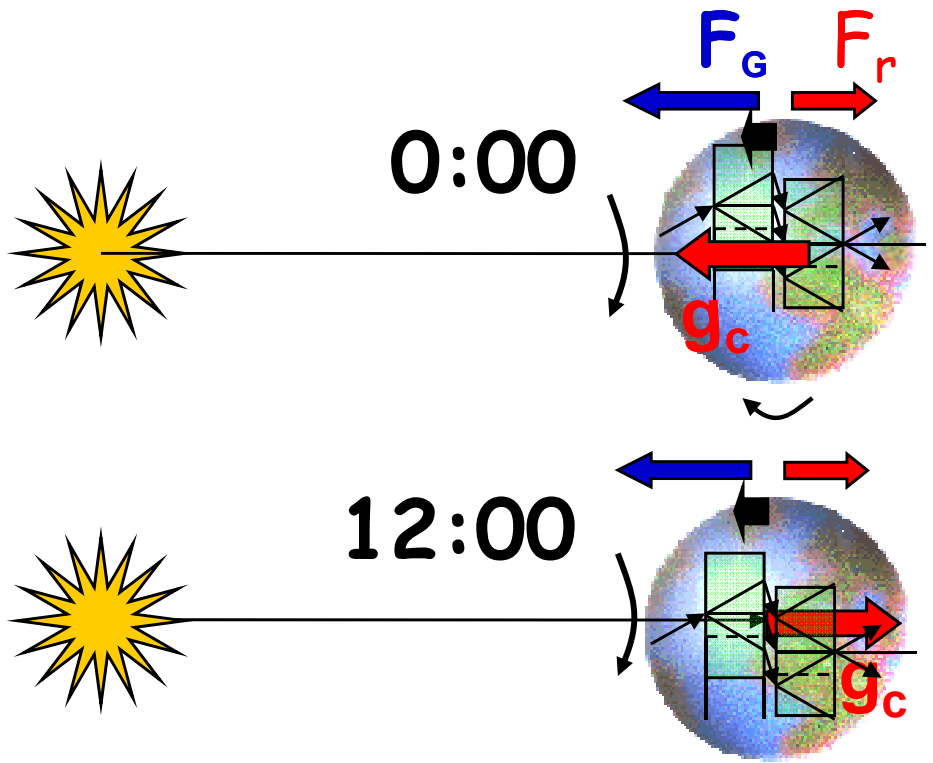
Non zero force:

$$F_m \equiv F_G - F_i = G \cdot \frac{m_\oplus m_n^g}{R^2} \left(1 - \frac{m_n^i / m_n^g}{m_\oplus^i / m_\oplus^g} \right) \Big|_{m_\oplus^i / m_\oplus^g \equiv 1}$$

$$\approx 6 \cdot 10^{-13} \left(1 - \frac{m_n^i}{m_n^g} \right) eV / cm$$



Идея эксперимента по измерению m_i/m_G (2)



$$F_m \approx 6 \cdot 10^{-13} \left(1 - \frac{m_n^i}{m_n^g} \right) eV / cm$$

$F_m \uparrow \uparrow \uparrow g_c$

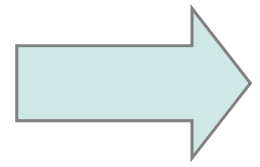
F_m changes its sign in the laboratory coordinate system

$F_m \uparrow \downarrow g_c$

Daily oscillations of the F_m sign

The possible sensitivity of the setup:

$$\sigma(F_{ext}) \approx 10^{-17} eV / cm$$



$$\sigma \left(\frac{m_i - m_G}{m_G} \right) \approx 2 \cdot 10^{-5}$$

Current accuracy $2 \cdot 10^{-4}$ (Schmiedmayer, 1989)

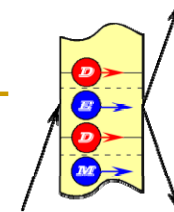
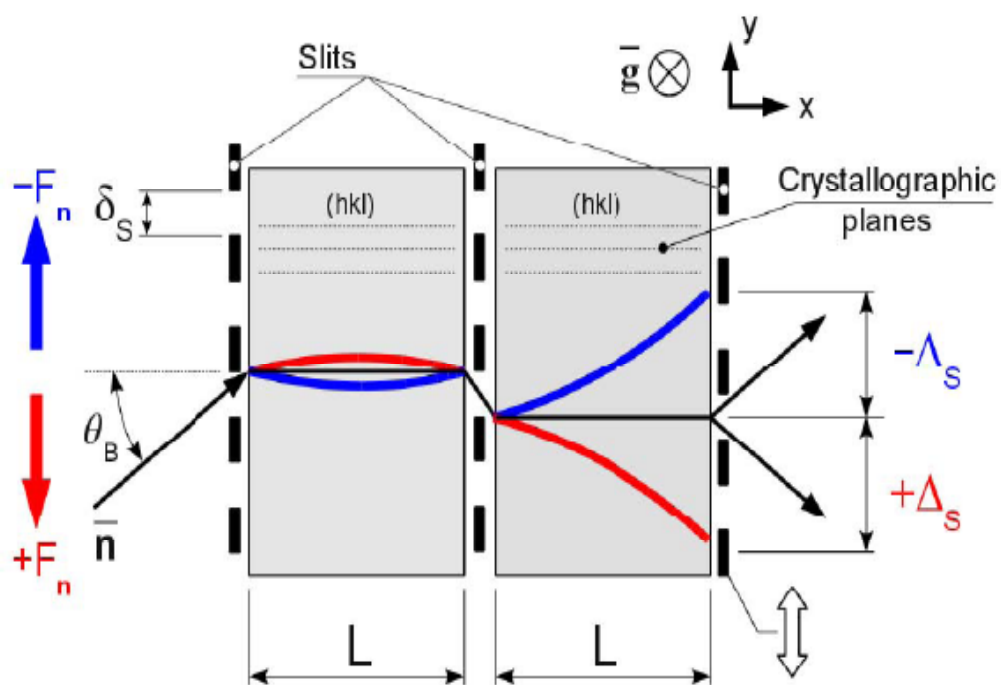


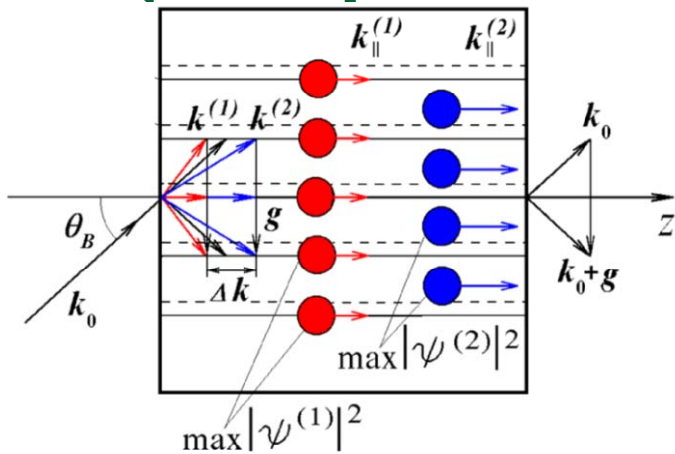
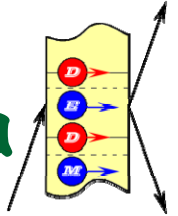
Схема эксперимента



220 mm

Кристалл кремния размерами $\varnothing 150 \times 220 \text{ мм}^3$
 плоскость (220), $d = 1.92 \text{ \AA}$ ($\lambda \approx 2d = 3.84 \text{ \AA}$)

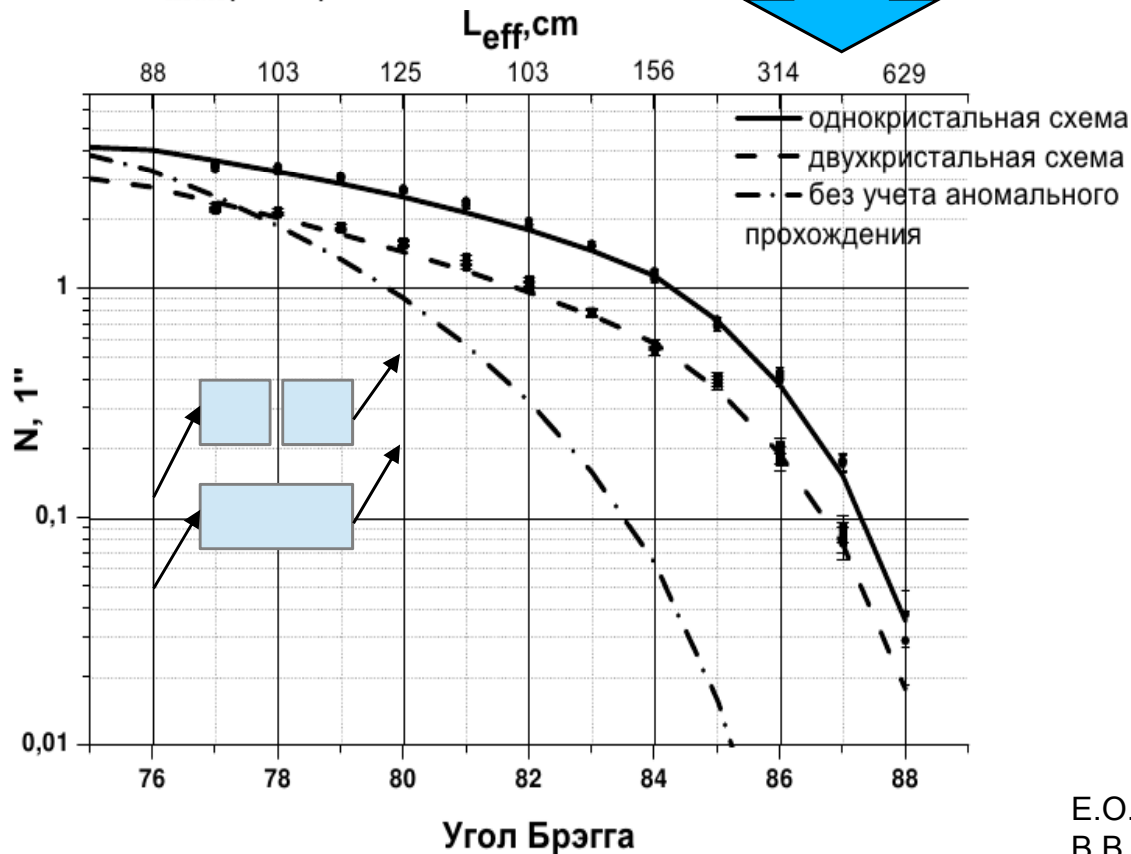
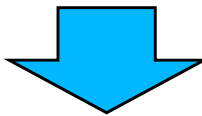
Эффект аномального прохождения нейтрона через кристалл в условиях дифракции.



При дифракции по Лауэ амплитуда прошедшей волны

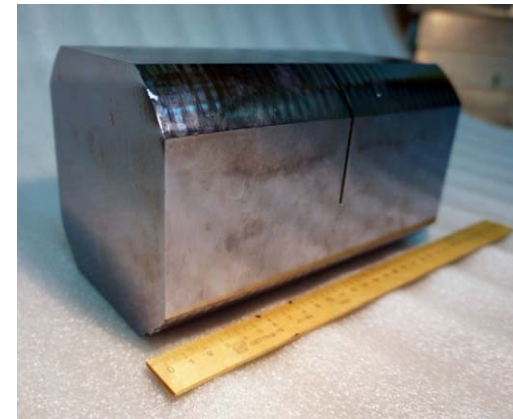
$$|a_0^{(1,2)}| = |a_g^{(1,2)}| = \exp \left[-\frac{\mu_0 L}{2 \cos \theta_B} (1 \pm \varepsilon_g) \right]$$

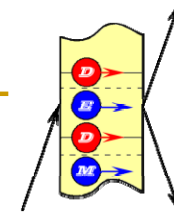
Для плоскости (220) кристалла кремния измеренная зависимость соответствует $\varepsilon_g \sim 0.9$



Т.е. длина поглощения одной из блоховских волн **>300 см**
Среднее поглощение **40 см**

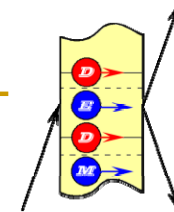
Фотография рабочего кристалла



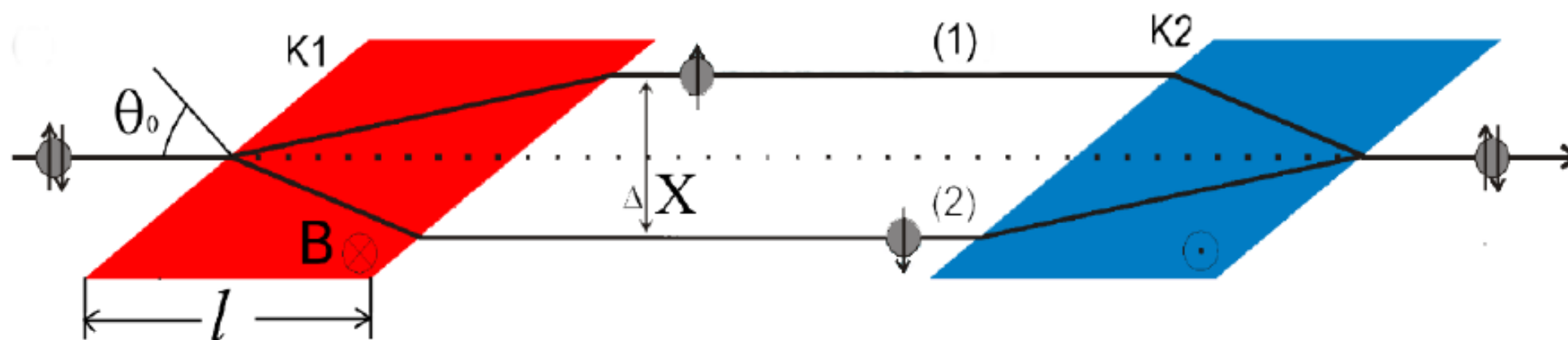


Последствие эффекта аномального поглощения

- ❑ Возможность работать при углах дифракции вплоть **до 88°**
- ❑ увеличение чувствительности в **~ 300** раз по сравнению с углом **45°**
- ❑ возможность достижения чувствительности к отношению инертной и гравитационной масс **$\sim 10^{-5}$**



Спиновой интерферометр (SESANS)



Let's apply $V_{sr}(x)$. The phase difference between these two eigenstates will be

$$\varphi_{sr} = (V_{sr}(x_0) - V_{sr}(x_0 + \Delta x)) / \hbar \cdot \tau,$$

The neutron wave function on the exit of coil K2 will be

$$\psi_{out} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} e^{-\frac{i\varphi_{sr}}{2}} \\ e^{+\frac{i\varphi_{sr}}{2}} \end{pmatrix} \Rightarrow \mathbf{P} = (\cos \varphi_{sr}, \sin \varphi_{sr}, 0)$$

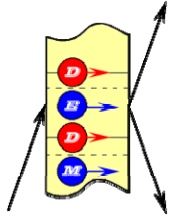
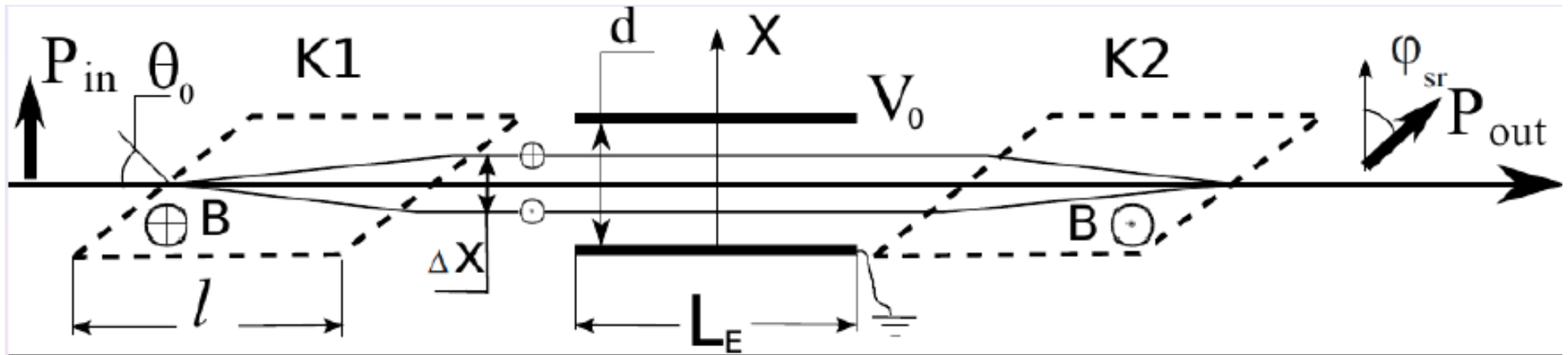


Схема эксперимента



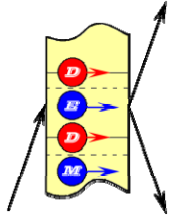
Electric field is applied $V_E(x) = E_0 \cdot x$.

The spin rotation angle will be:

$$\phi_e = \frac{E_0 q_n \Delta x}{\hbar} \cdot \tau$$

The value of spatial splitting Δx is

$$\Delta x = \frac{\mu B}{E} \cdot l \cdot \tan \theta_0$$



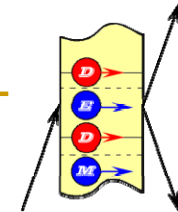
Угол поворота спина нейтрона

$$\phi_e = E_0 q_n l L_E B \tan \theta_0 \gamma \frac{\lambda_n^3 m_n^2}{8\pi^3 \hbar^3},$$

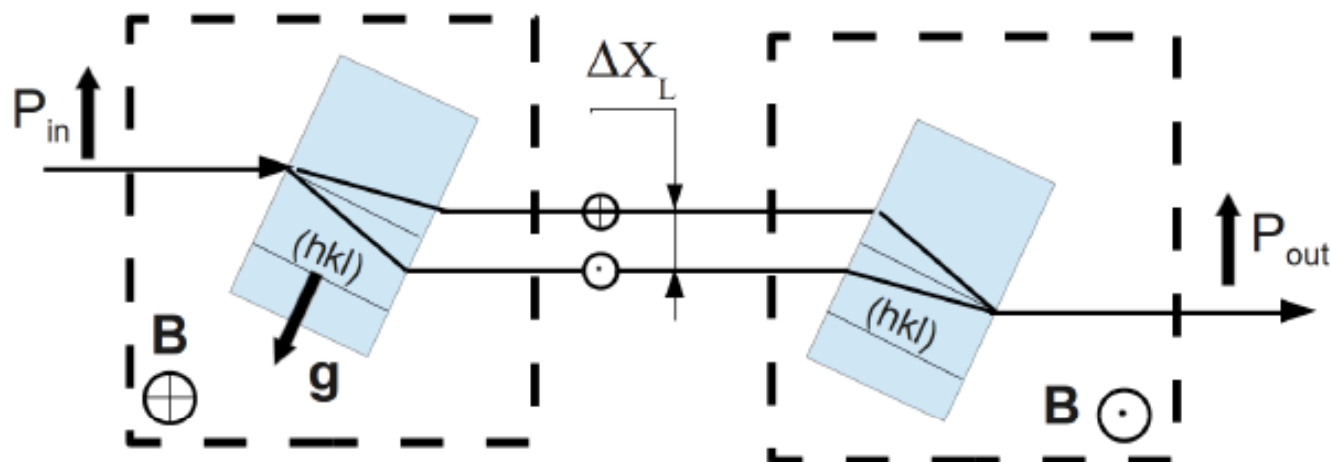
Numerical estimations show, that under the conditions ($B = 0.1\text{T}$, $L_E = 1\text{m}$, $l = 1\text{m}$, $E_0 = 100\text{ kV/cm}$, $\tan \theta_0 = 10$, $\lambda_n = 10\text{\AA}$)

$$\phi_e = 2.6 \cdot 10^{15} \cdot e_n.$$

where $e_n = q_n/e$. The accuracy of $\Delta\phi_e \simeq 10^{-5}$ corresponds to the neutron electric charge $\sigma(e_n) \simeq 4 \cdot 10^{-21}$ part from electron charge.



SESANS + Дифракция по Лауэ



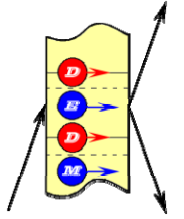
The values of neutron splitting

Laue diffr.+SESANS

Standard SESANS

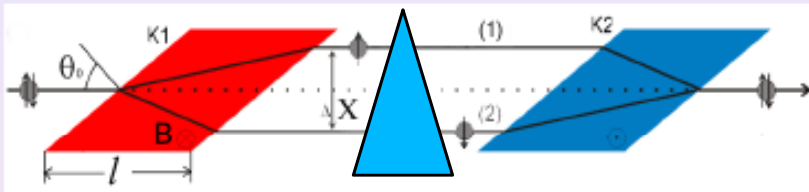
$$\Delta X_L = \frac{\mu B}{2v_g} L \sin \theta_B \iff \Delta X = \frac{\mu B}{E} \cdot l \cdot \tan \theta_0$$

About $K_g = \frac{E}{2v_g} \Rightarrow 10^5$ times more.



Измерение сдвига фазы за счет преломления нейтронной волны в среде

SESANS at WWR-M reactor (PNPI, Gatchina)



Neutron length wave - 2.3 \AA ,

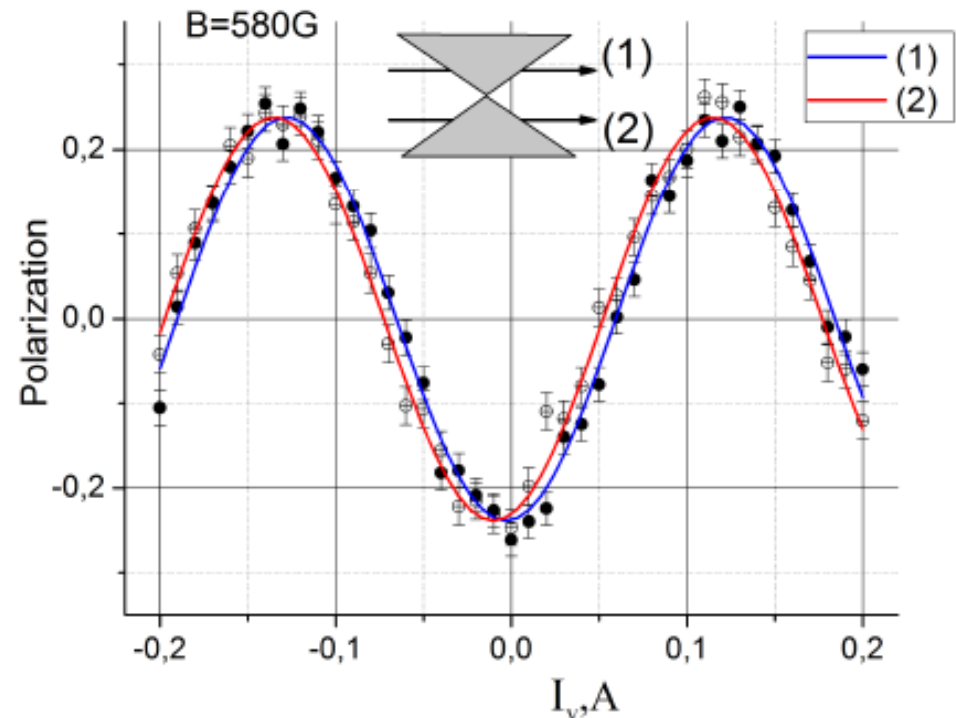
$B = (40 \div 800) \text{ Oe}$

$\theta_0 = 45^\circ$

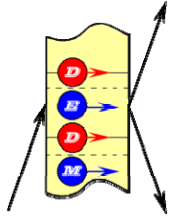
$l = 50 \text{ cm}$

Δx reached about 200 nm.

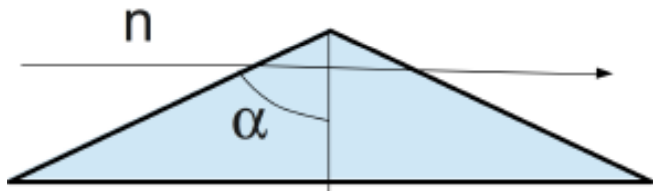
Example of experimental curves



V.V.Voronin, L.A.Akselrod, V.N.Zabenkin, I.A.Kuznetsov, New approach to test a neutron electroneutrality by the spin interferometry technique, Physics Procedia, accepted for publication.



Преломление в кварцевой призме



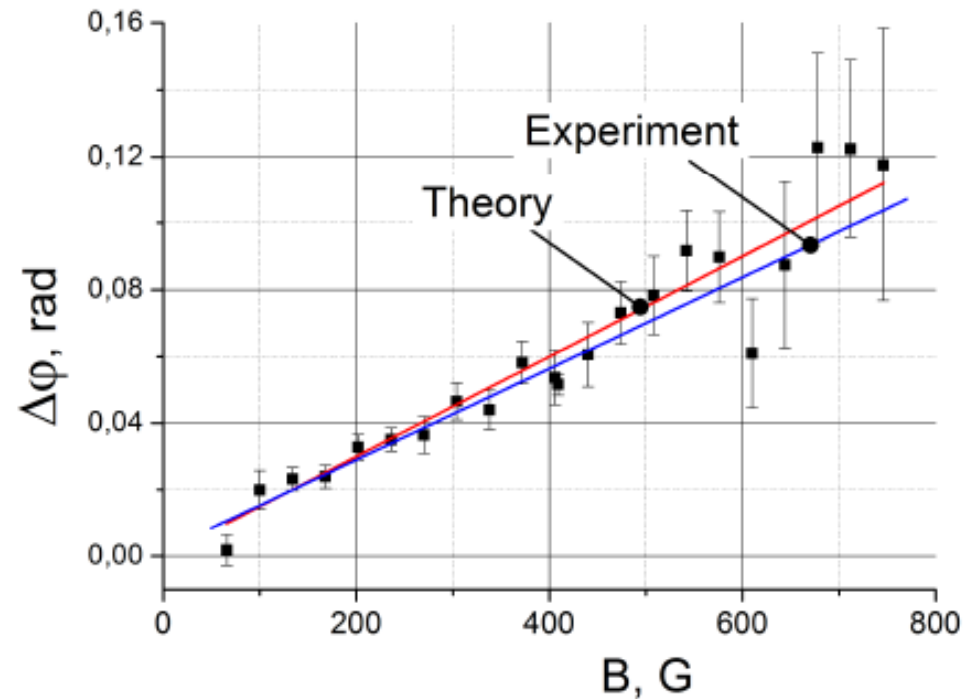
Value of phase shift due to refraction in prism

$$\Delta\varphi_r = \frac{V_0}{E} \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x \tan \alpha$$

The used quartz prism

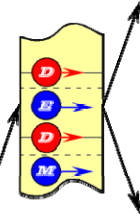
$$V_0 \simeq 10^{-7} \text{ eV}, \alpha = 78^\circ$$

The phase shift dependence on a value of magnetic field in main coils.



Вывод: Можно измерять малые сдвиги фазы (10^{-2} рад)

Ближайшие планы (2-3 года)



- ЭДМ нейтрона**
 - Создание CRYOPAD-EDM
 - Выход на полномасштабный эксперимент с кварцем
- Принцип эквивалентности для нейтрона**
 - Сборка и тестирование модернизированной установки
 - Тест на ВВР-М
 - Измерения на интенсивном пучке холодных нейтронов
- Заряд нейтрона**
 - Создание тестовой установки на ВВР-М
 - Проверка основных идей с дифракцией по Лауэ