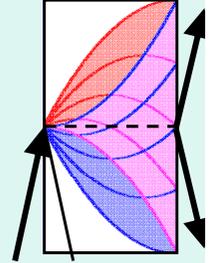


Наблюдение эффекта аномального прохождения нейтронов, дифрагирующих по Лауэ, при углах Брэгга, близких к $\pi/2$

Егор Вежлев

*Международная молодежная конференция
«Использование рассеяния нейтронов в
исследованиях конденсированного
состояния» - 2012*

Мотивация



- Для дифрагирующих по Лауэ нейтронов существует эффект дифракционного усиления малых воздействий на нейтрон*:

$$K_d^{Si} \theta_B \sim 45^\circ \rightarrow (10^4 \div 10^5)$$

- При углах Брэгга, близких к $\pi/2$ **::

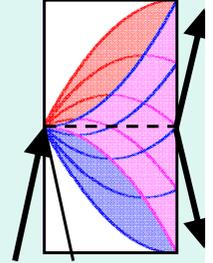
$$K_d^{Si} \theta_B \sim 84 \div 87^\circ \rightarrow (10^7 \div 10^8)$$

- Очень заманчиво попробовать использовать такое значительное усиление для исследования влияния этих самых воздействий.

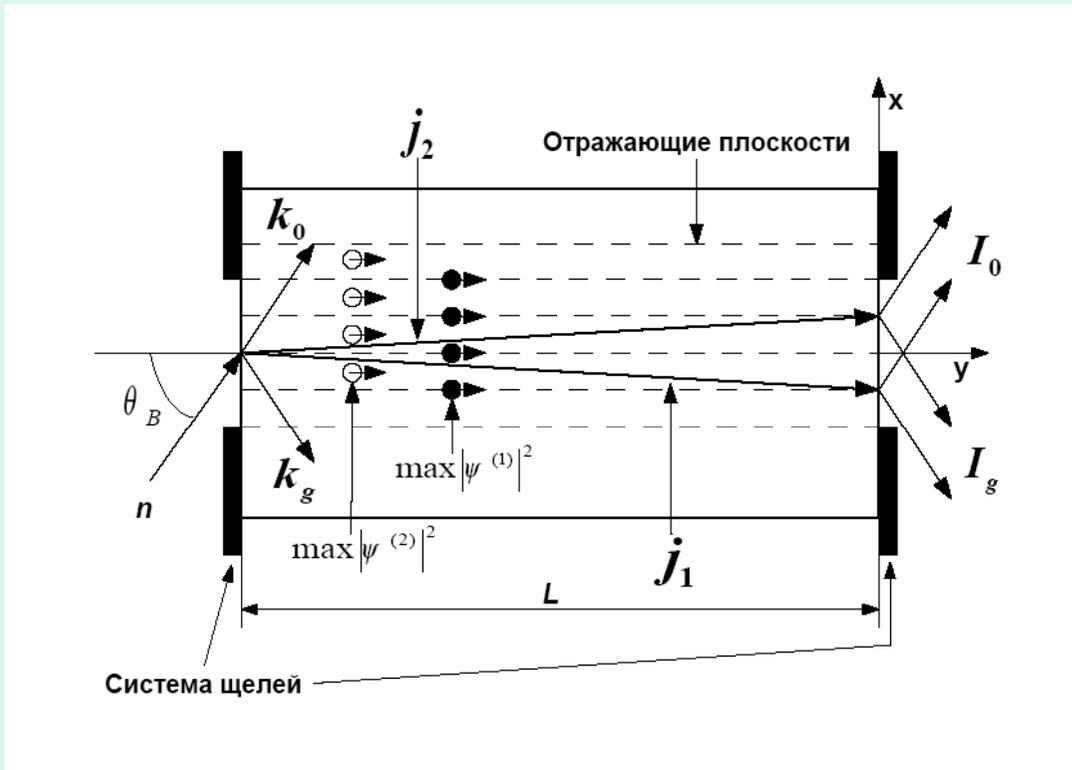
*A. Zeilinger et.al. PRL **57**, 3089 (1986)

** V.V. Fedorov et.al. JETP Lett. **85**, 82 (2007)

Распространение нейтронных волн в совершенном кристалле



$$V(\vec{r}) = \sum_g V_g \exp(i\vec{g}\vec{r}) = V_0 + \sum_g 2v_g \cos(\vec{g}\vec{r} + \phi_g)$$



Можно показать, что если кристалл обладает центром симметрии (Si), то:

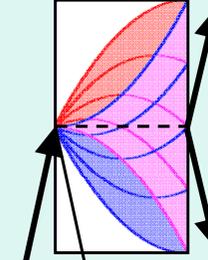
$$V_g = V_g^* \text{ и } \phi_g \rightarrow 0$$

При дифракции по Лауэ ВФ нейтрона есть суперпозиция двух Блоховских волн, обладающих разными симметриями (двухволновое приближение).

$$|\psi^{(1)}|^2 = 1 + \cos(\vec{g}\vec{r})$$

$$|\psi^{(2)}|^2 = 1 - \cos(\vec{g}\vec{r})$$

Влияние поглощения. Эффект Бормана*



$$V(\vec{r}) \rightarrow V(\vec{r}) + iV'(\vec{r})$$

Тогда ВФ нейтрона представляется следующим образом:

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

μ_0 – линейный коэффициент поглощения

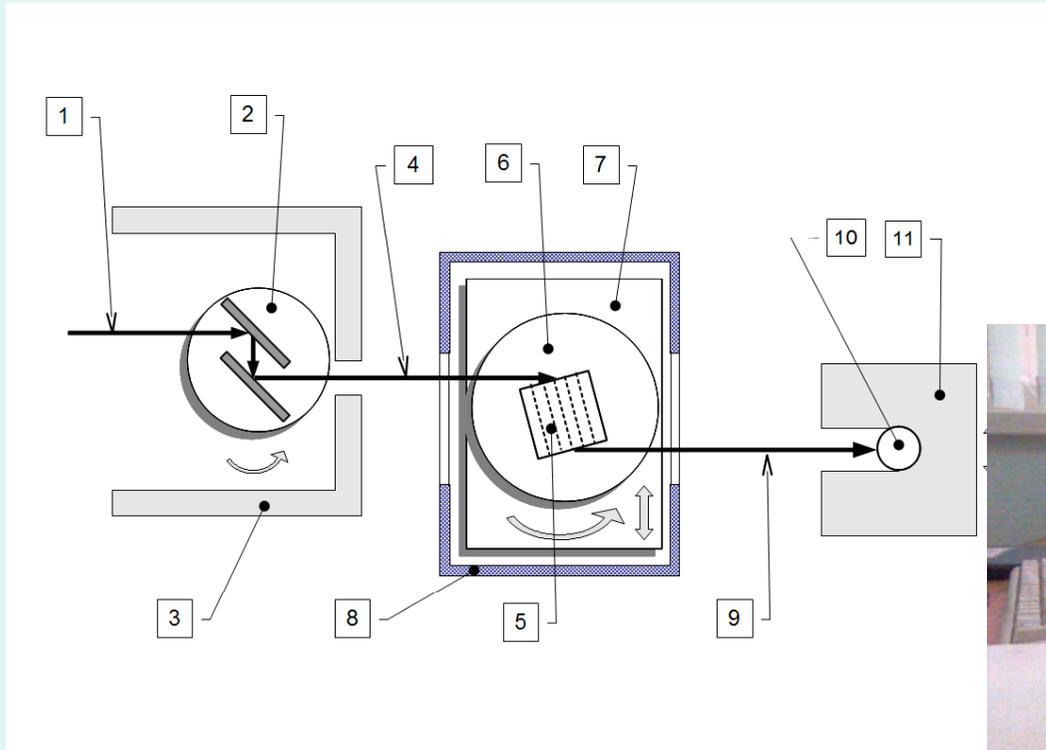
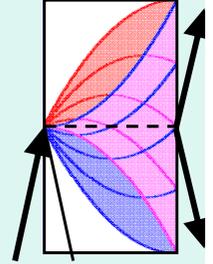
ε_g – параметр, характеризующий величину эффекта Бормана (аномального поглощения)

$$|\varphi^{(1,2)}|^2 \sim \exp \left[-\mu_0 L_{eff} (1 \pm \varepsilon_g) \right], \quad 0 < \varepsilon_g < 1$$

$\varepsilon_g \sim 1 \Rightarrow$ практически нулевое поглощение

*G. Borrmann, Z. Physik **42**, 157 (1947)

Эксперимент



Большой кристалл кремния
(220 mm)

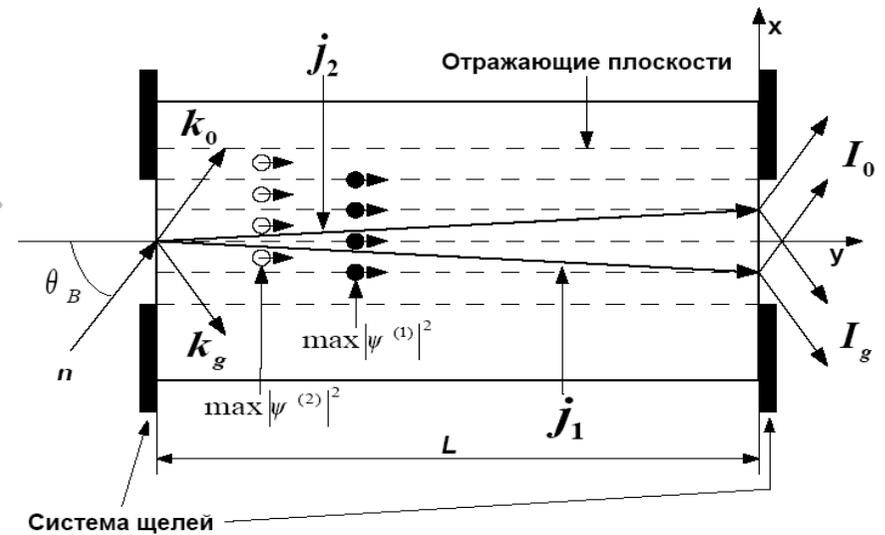
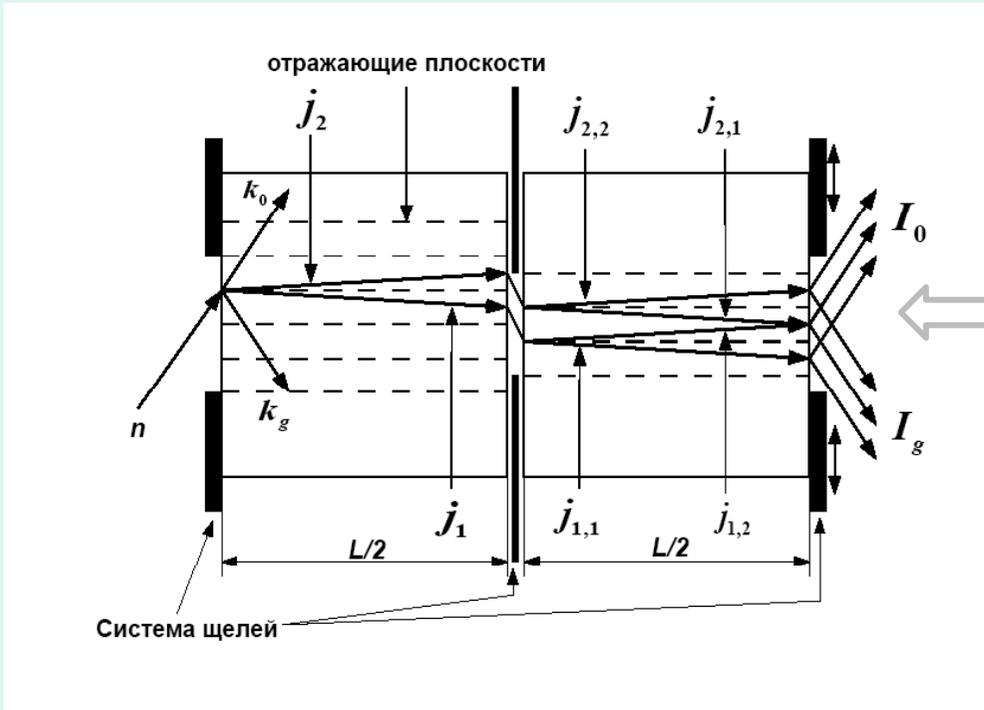
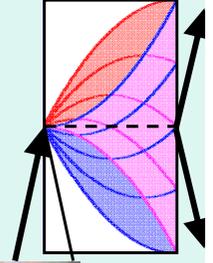


Working crystallographic plane is (220)

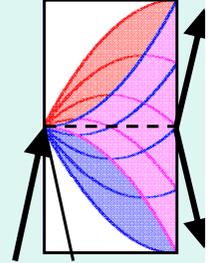
$$d = 1,92 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$$

$$\Delta d / d \sim 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$$

Эксперимент



Эксперимент



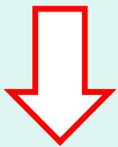
**220 silicon
plane intensity
reflex**

$$N_{1,2} \sim \exp(-L_{eff} \mu_{1,2})$$

$$\mu_{1,2} = \mu_0 (1 \pm \varepsilon_g)$$

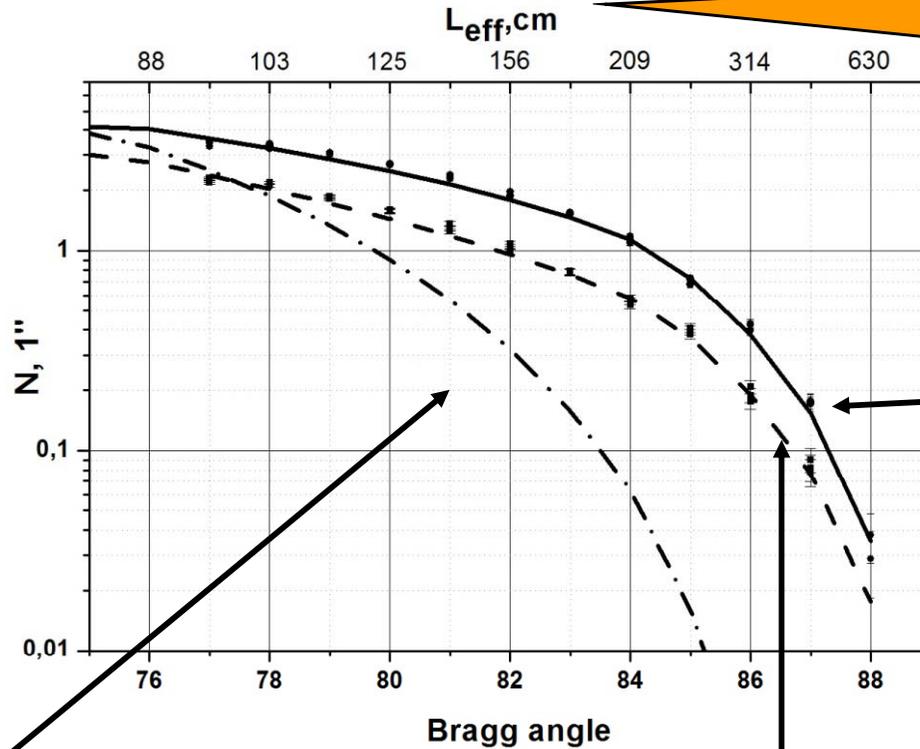
$$\mu_1 = 0,05$$

$$\mu_2 < 0,003$$



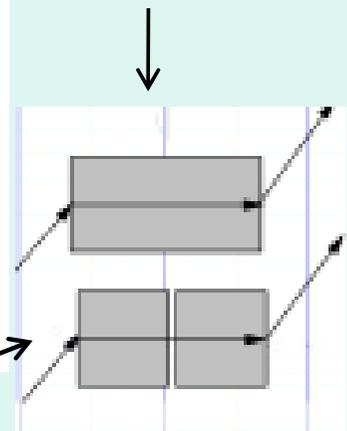
$$L_{abs}^{\psi(2)} \sim 10 L_{abs}$$

**Theoretical prediction without
taking Borrmann effect into
account**



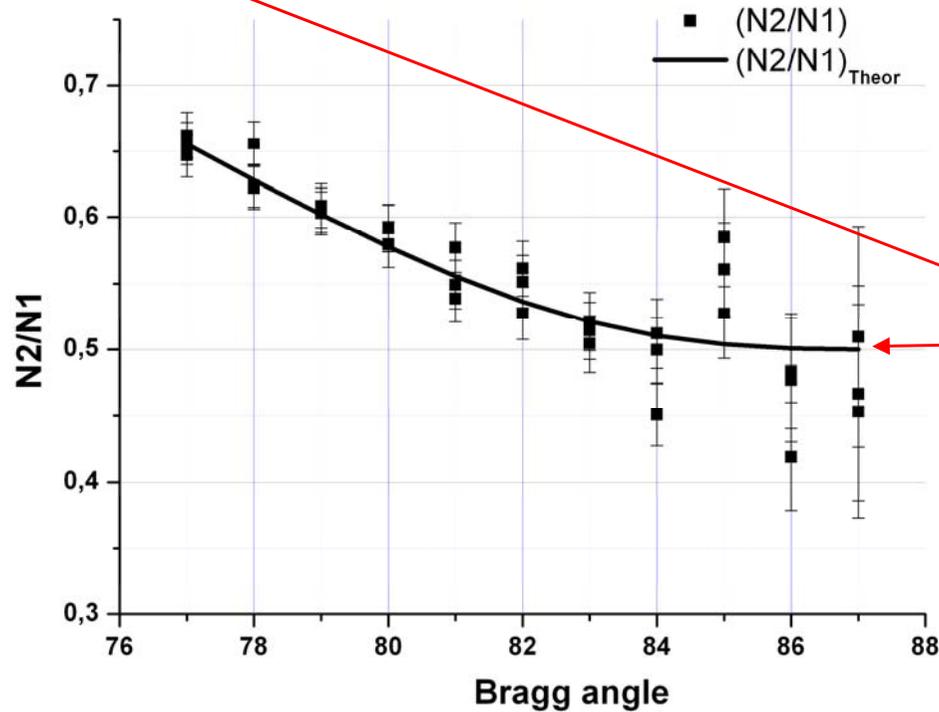
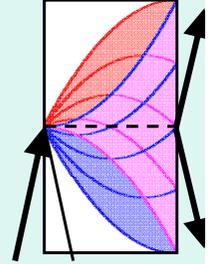
**Effective
crystal length
($L/\cos(\theta_B)$)
can reach
few meters**

One-crystal scheme



Two-crystal scheme

Эксперимент

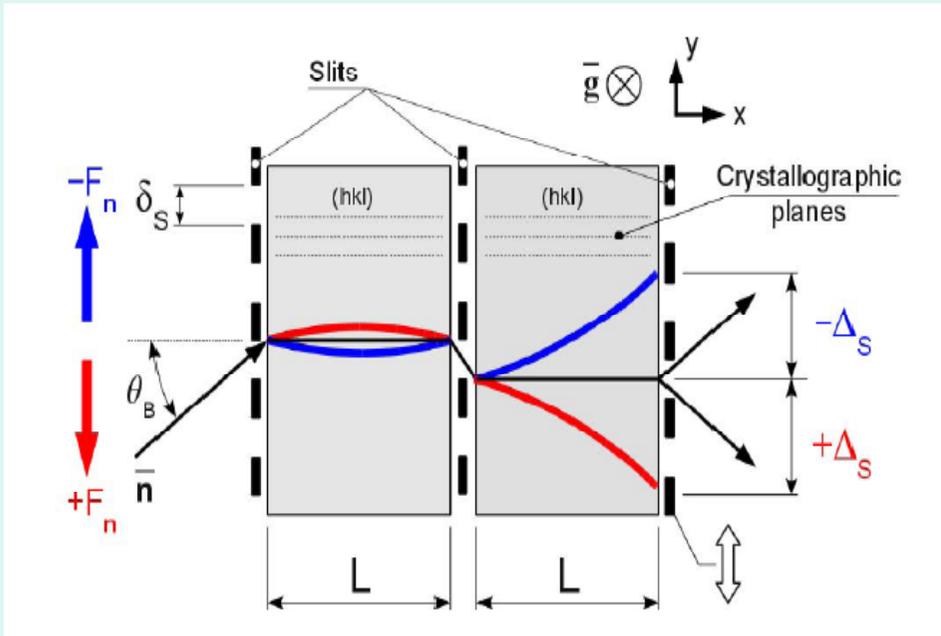
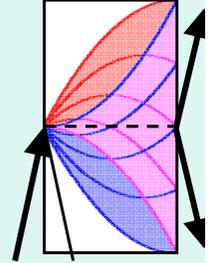


The intensities ratio for one- and two-crystal schemes of the setup

Ratio varies from 3/2 to 1/2

- **Ratio depends on two-crystal scheme setup geometry**
- **Experimental results coincide with the theory**

Двухкристальная схема дифракции в присутствии внешней силы



External force shifts the spot of the neutron beam at the exit surface:

$$\Delta_F^1(1,2) = \pm \frac{\pi \tan^2(\theta_B) L^2}{m_0 d E_n} F_n \equiv \pm \Delta_F^1$$

The resolution for this setup is:

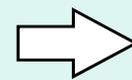
$$W_F = \frac{m_0 E_n d}{\pi \tan^2(\theta_B) L^2} \delta_S,$$

δ_S – slit size

For (220) plane of Silicon:

$$L = 10 \text{ cm}, \delta_S = 2 \text{ mm}, \theta_B = 86^\circ \Rightarrow W_F \approx 5 \cdot 10^{-13} \text{ eV / cm} \approx 5 \cdot 10^{-4} m_n g$$

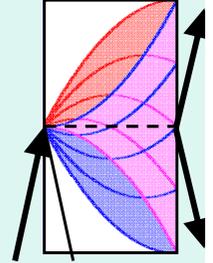
The possible sensitivity of the setup for 100 days of statistic accumulation (with high flux neutron beam):



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

$$100 \text{ kg} \longleftrightarrow 1 \text{ metre}$$

Эксперимент по проверке слабого принципа эквивалентности для нейтрона*



Value of the external force in m^i/m^g experiment:

$$F_m \equiv F_G - F_r = G \cdot \frac{m_\otimes m_n^g}{R^2} \left(1 - \frac{m_n^i / m_n^g}{m_\otimes^i / m_\otimes^g} \right) \Bigg|_{m_\otimes^i / m_\otimes^g \equiv 1} \approx 6 \cdot 10^{-13} \left(1 - \frac{m_n^i}{m_n^g} \right) eV / cm$$

The possible sensitivity of the setup:

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



$$\delta_{i/G} \left((m_G - m_i) / m_G \right) \sim 10^{-5}$$

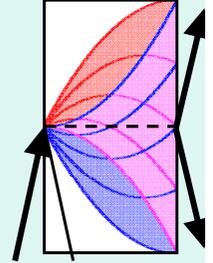
Present accuracy $2 \cdot 10^{-4}$ (Schmiedmayer, 1989)

More than one order of magnitude superior to the present-day value

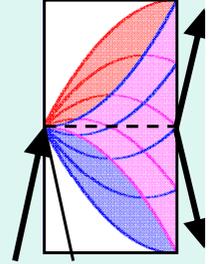
*В.В. Воронин и др., ЯФ **72**(2), 1 (2009)

V.V. Voronin et al., Physics Procedia **17**, 232 (2011)

Основные результаты



- Показано, что при дифракции по Лауэ (Si, 220) благодаря эффекту аномального прохождения (эффекту Бормана), длина поглощения одной из блоховских волн почти на порядок превосходит среднюю величину
- Это позволяет работать при «экстремальных» углах Брэгга и создает новые перспективы по использованию двухкристальной схемы дифракции по Лауэ
- Возможное разрешение двухкристальной установки во внешней силе может достигать 10^{-13}eV/cm
- Такое высокое разрешение позволит, например, достичь точности в определении отношения инертной и гравитационной масс нейтрона на уровне 10^{-5}



Спасибо!