

Эксперимент по поиску ЭДМ нейтрона кристалл- дифракционным методом

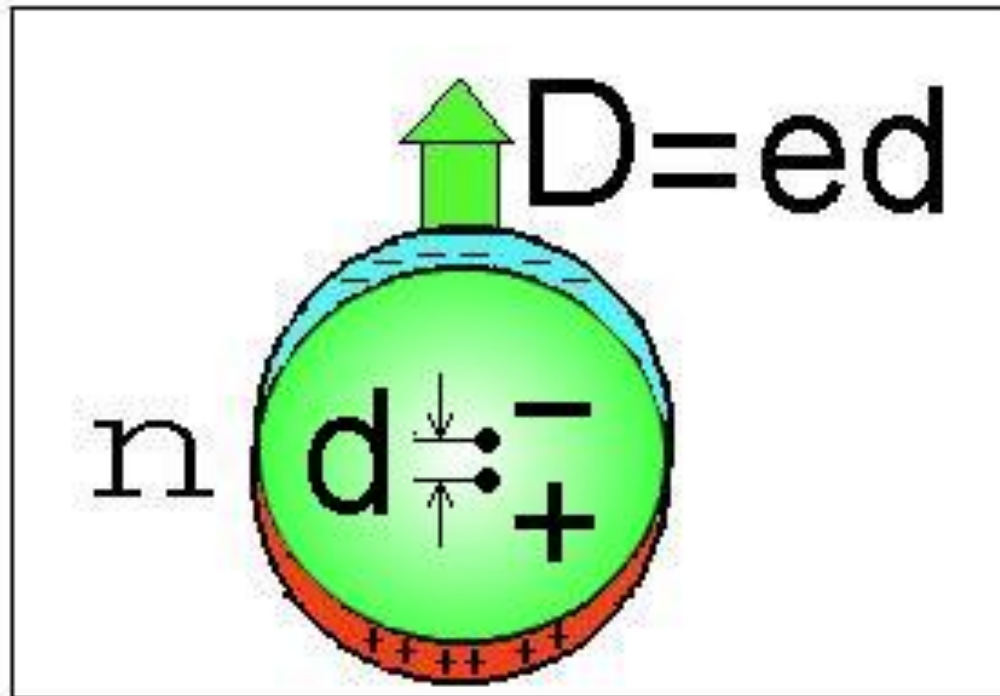
*В.В. Воронин^{1, 2, 3}, Ю.П. Брагинец^{1, 2}, Е.О. Вежлев^{1, 2}, И.А. Кузнецов¹,
Е.Г. Лапин¹, М.В. Ласица^{1, 2}, С.Ю. Семенихин¹, В.В. Федоров^{1, 2, 3}*

¹ *Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова*

² *Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

³ *Санкт-Петербургский государственный университет*

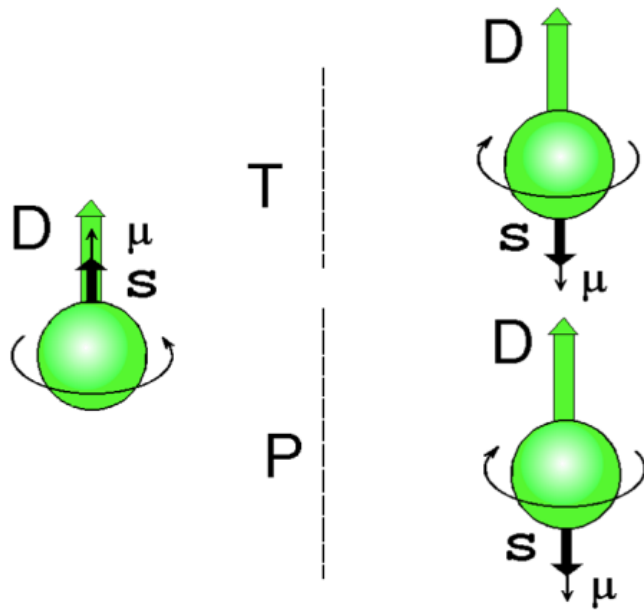
ЭДМ нейтрона



e – заряд электрона,

d – вектор, соединяющий центры шариков и направленный от положительного заряда к отрицательному.

ЭДМ и нарушение CP -симметрии



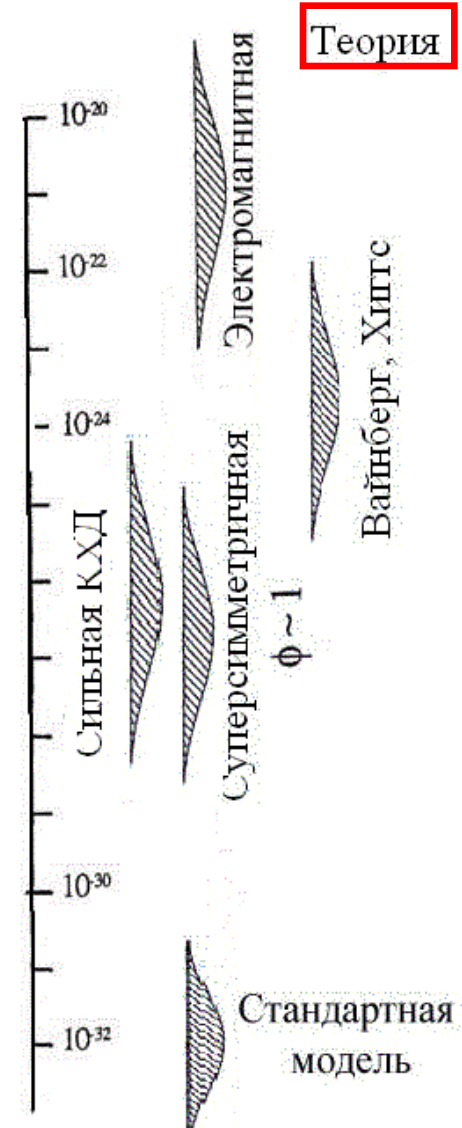
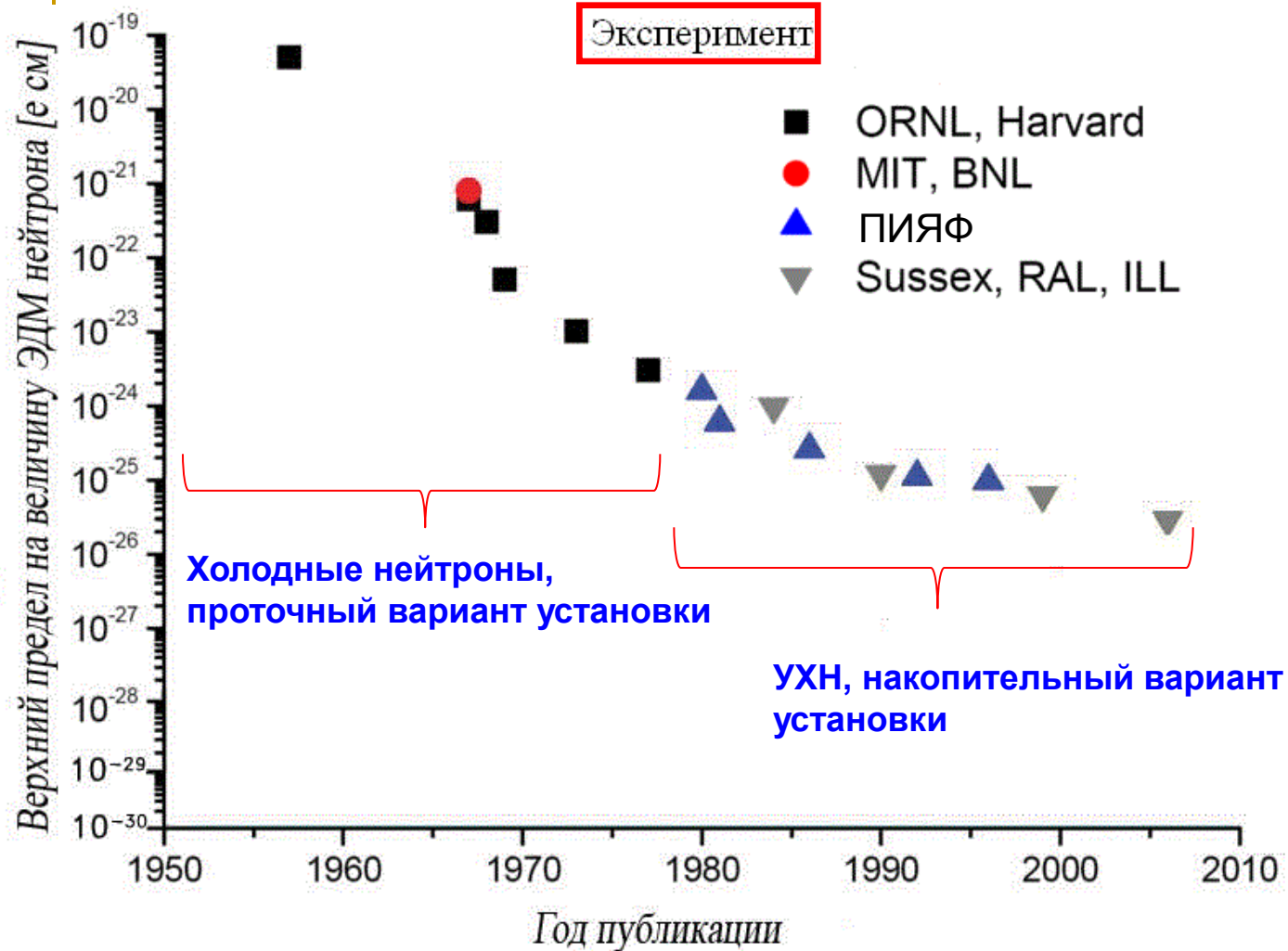
Не нулевой ЭДМ требует одновременное нарушение временной (T) и пространственной (P) инвариантностей, а в силу CPT -теоремы и CP -инвариантности.

Барионная асимметрия Вселенной

- **1967** г. А.Д. Сахаров ввел три условия возникновения Вселенной:
- существует взаимодействие, не сохраняющее барионное число
- существует взаимодействие, нарушающее CP-инвариантность
- отсутствует термодинамическое равновесие при расширении

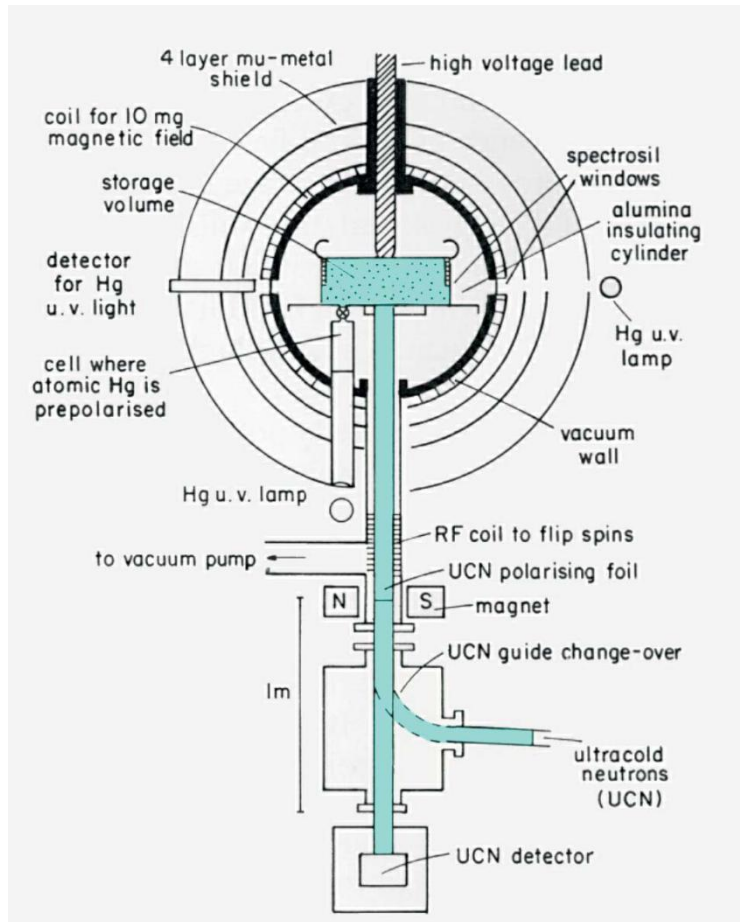
Начало поиска ЭДМ нейтрона

- **1950** г. – Парселл и Рамзей анализируя работы о нейтрон-электронному взаимодействию предположили существования ЭДМ у нейтрона порядка $3 \cdot 10^{-18}$ е·см.
- **1951** г. – Смит, Парселл и Рамзей первый эксперимент $D < 5 \cdot 10^{-20}$ е·см.
- **1957** г. – группа Ву обнаружили нарушение пространственной четности предсказанное Ли и Янгом.
- **1964** г. непосредственное обнаружение нарушения CP-симметрии в распаде нейтрального K-мезона.
- **2004** г. Belle, BaBar обнаружение нарушения CP-симметрии в распаде нейтрального B-мезона.

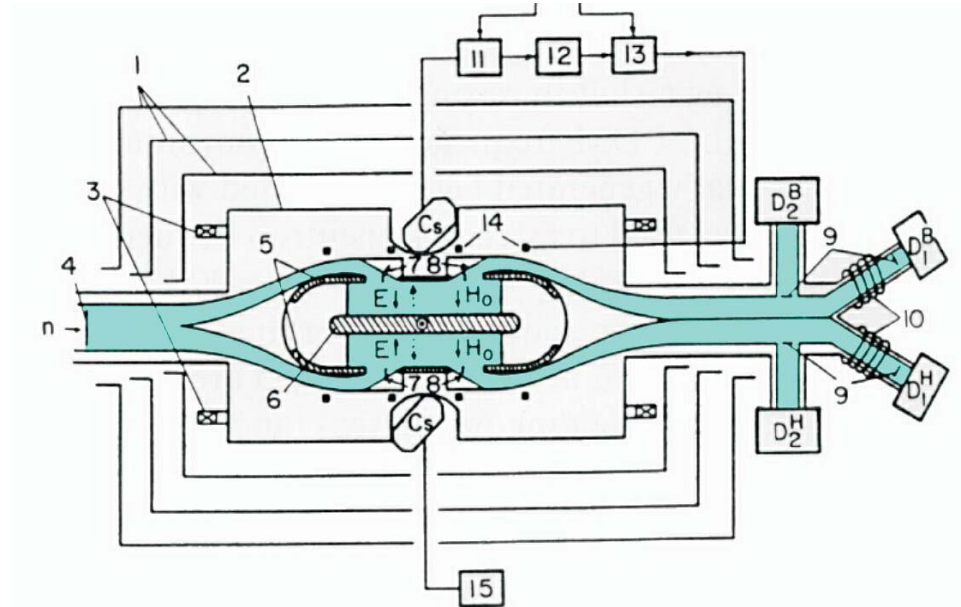


Эксперименты по поиску ЭДМ на УХН

ILL, Sussex, RAL



ПНЯФ



1995 г. $D < 9,7 \cdot 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$, $\tau \sim 100 \text{ c}$, $E = 15 \text{ кВ/см}$.

2006 г. $D < 2,9 \cdot 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$, $\tau \sim 150 \text{ c}$, $E = 10 \text{ кВ/см}$.

Phys. Lett., 2006, v.97, 131801

Phys. Lett., 1996, v.59, pp.1204-1224

Чувствительность к ЭДМ

$$\sigma^{-1} \sim E\tau\sqrt{N}$$

Для **УХН**

$$E \sim 10 \text{ кВ/см}$$

$$\tau \sim 1000 \text{ с}$$

Максимальная чувствительность

$$E\tau \sim 10^7 (\text{В}\cdot\text{с})/\text{см}$$

Достигнутая

$$E\tau \approx 10^6 (\text{В}\cdot\text{с})/\text{см}$$

Для **кристалл-дифракционного метода**

$$E \sim (10^8\text{-}10^9) \text{ В/см},$$

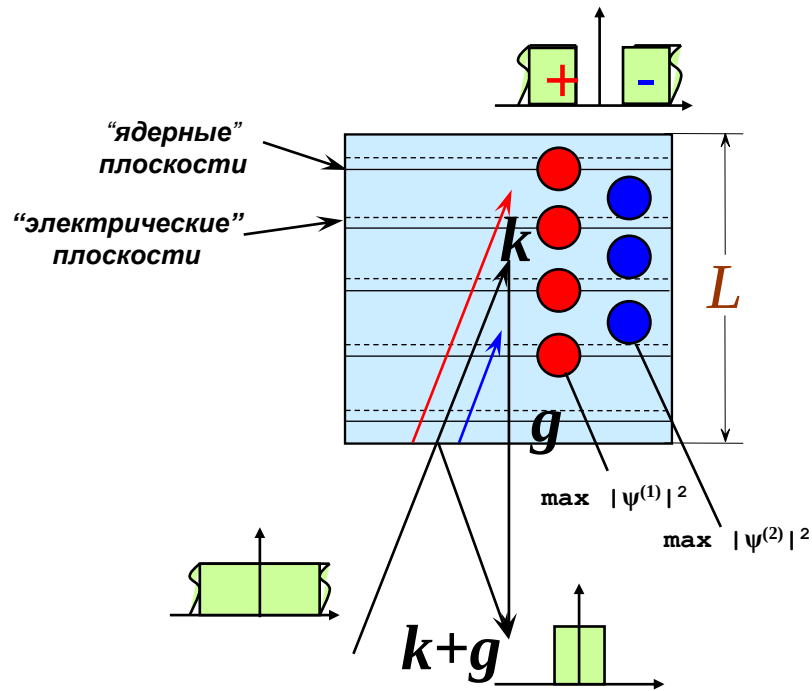
$$\tau_a \sim 0.01 \text{ с (поглощение)}$$

Чувствительность метода к ЭДМ

$$E\tau \sim 10^7 (\text{В}\cdot\text{с})/\text{см}.$$

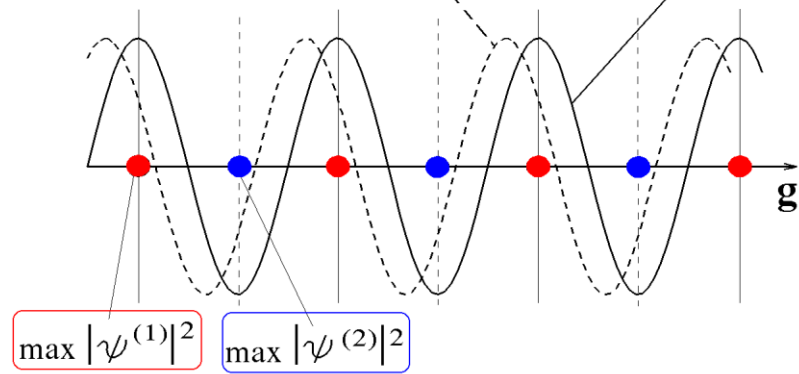
Кристалл-дифракционный метод

Проходя через нецентросимметричный кристалл нейтрон оказывается под действием сильных 10^8 - 10^9 В/см межплоскостных электрических полей противоположного знака $\pm E$.

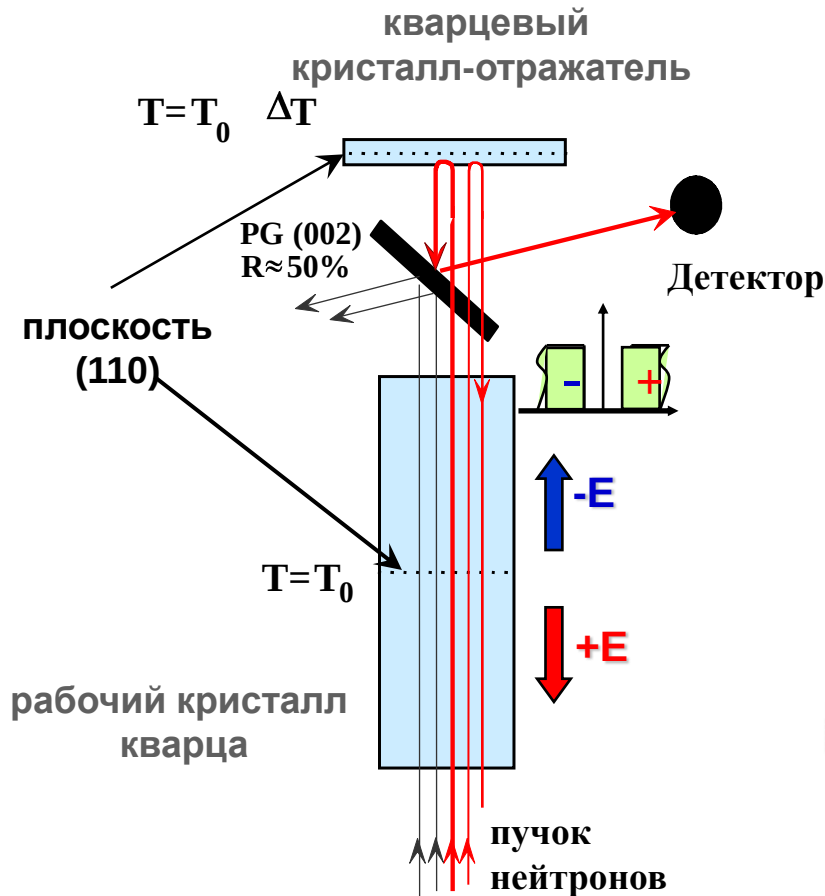


$$V^E(\vec{r}) = 2V_g^E \cos(\vec{g}\vec{r} + \Delta\phi_g)$$

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



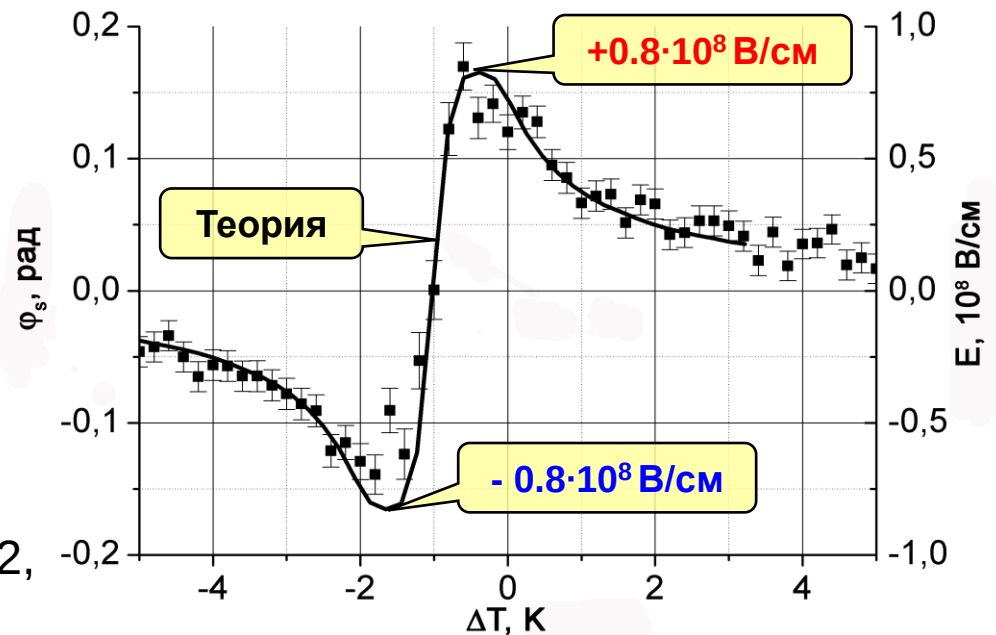
Основная идея эксперимента



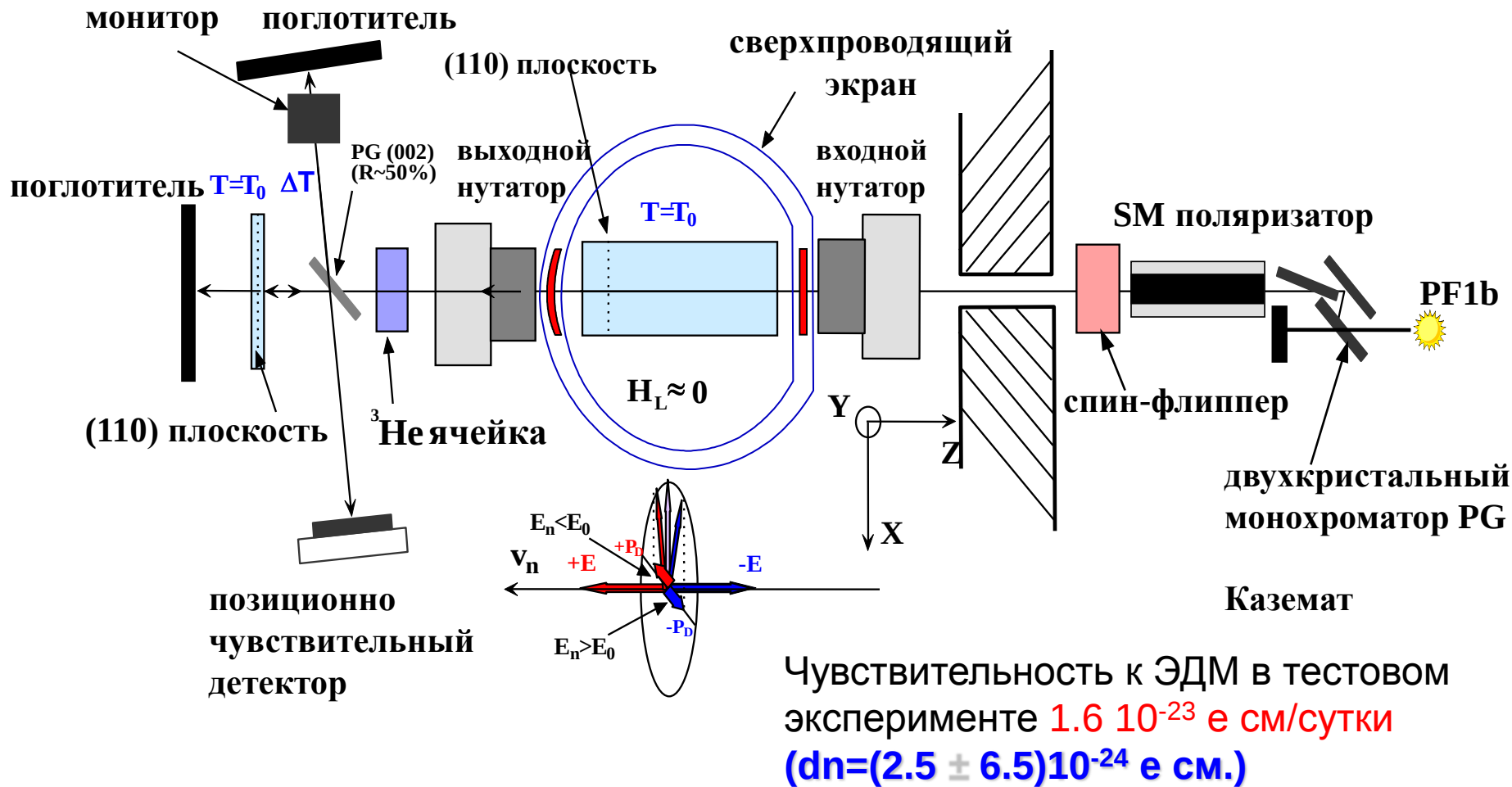
$$\tilde{d} = d_0 (1 + \alpha_T \Delta T)$$

где α_T – коэффициент теплового расширения кварца в направлении перпендикулярном отражающим плоскостям.

Отметим, что при угле дифракции $\pi/2$, $E \parallel v_n$ $H_s \sim [E \ v_n] \approx 0$



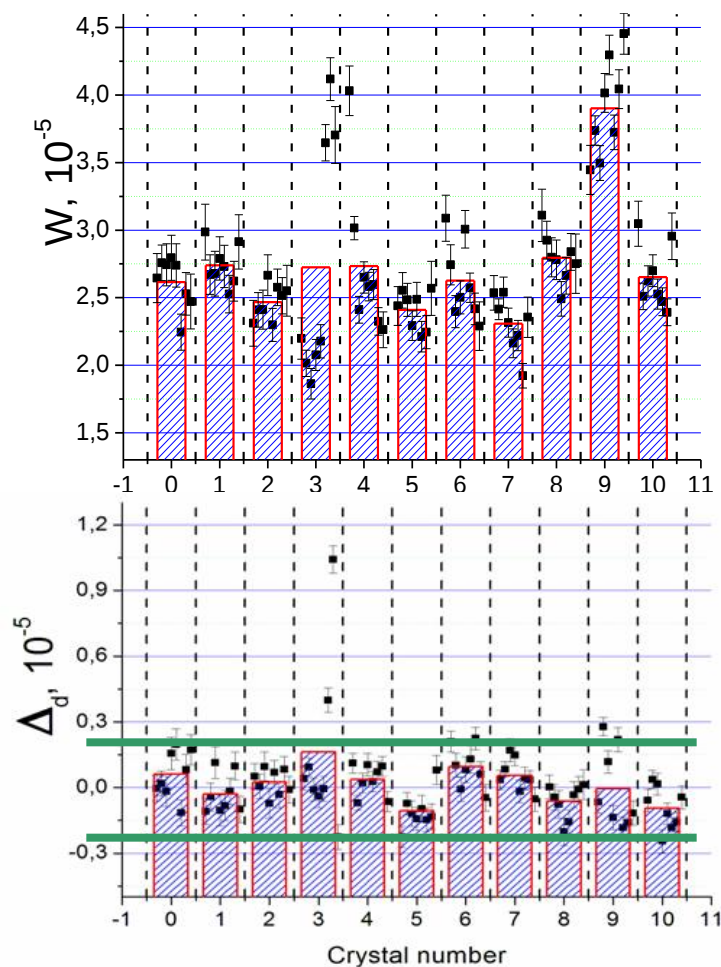
Тестовый кристалл-дифракционный эксперимент (ПИЯФ, ILL)



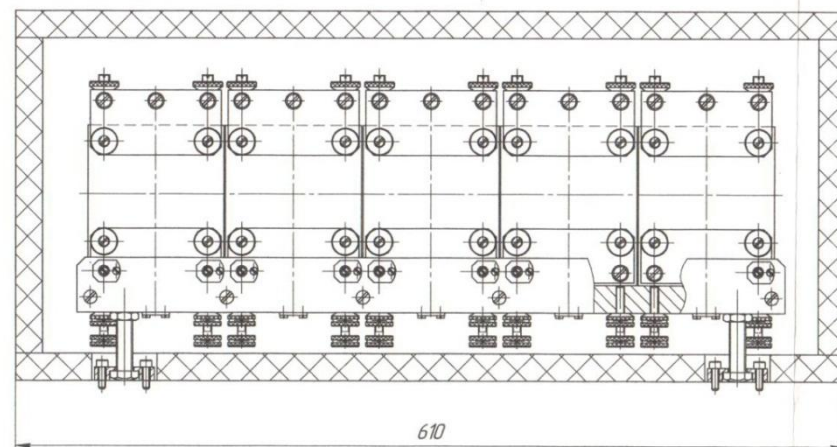
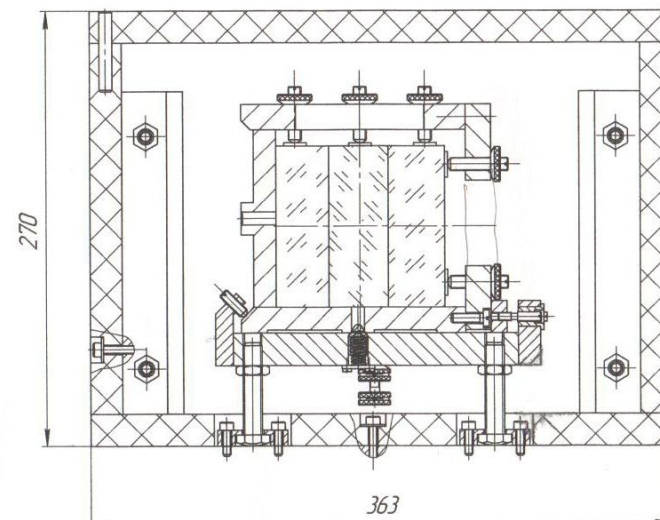
Тестирование кристаллов кварца



Отобраны кристаллы суммарным
размером **105x100x500 мм³**
(15 кристаллов 35x100x100 мм³)
и разбросом межплоскостного
расстояния **$\Delta d/d \sim 4 \cdot 10^{-6}$**

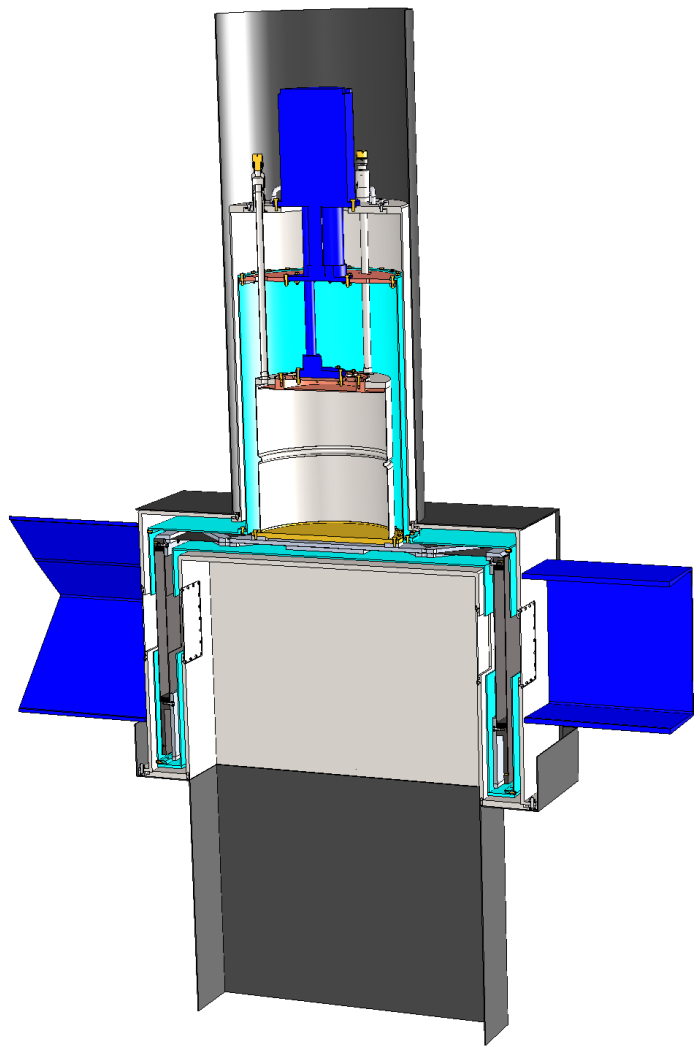


Кристаллодержатель



Водяной термостат
стабилизация температуры $\sim 0,01^{\circ}\text{C}$

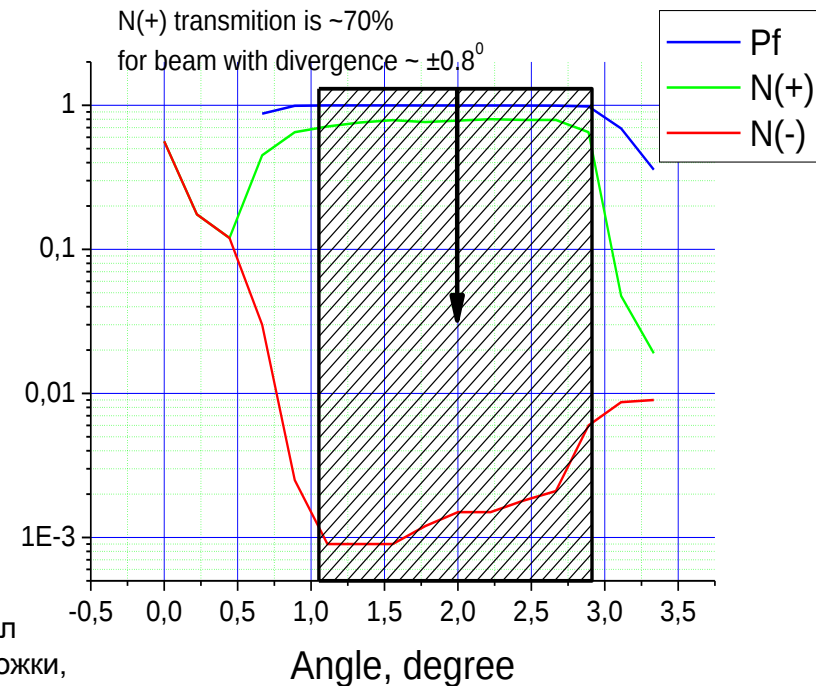
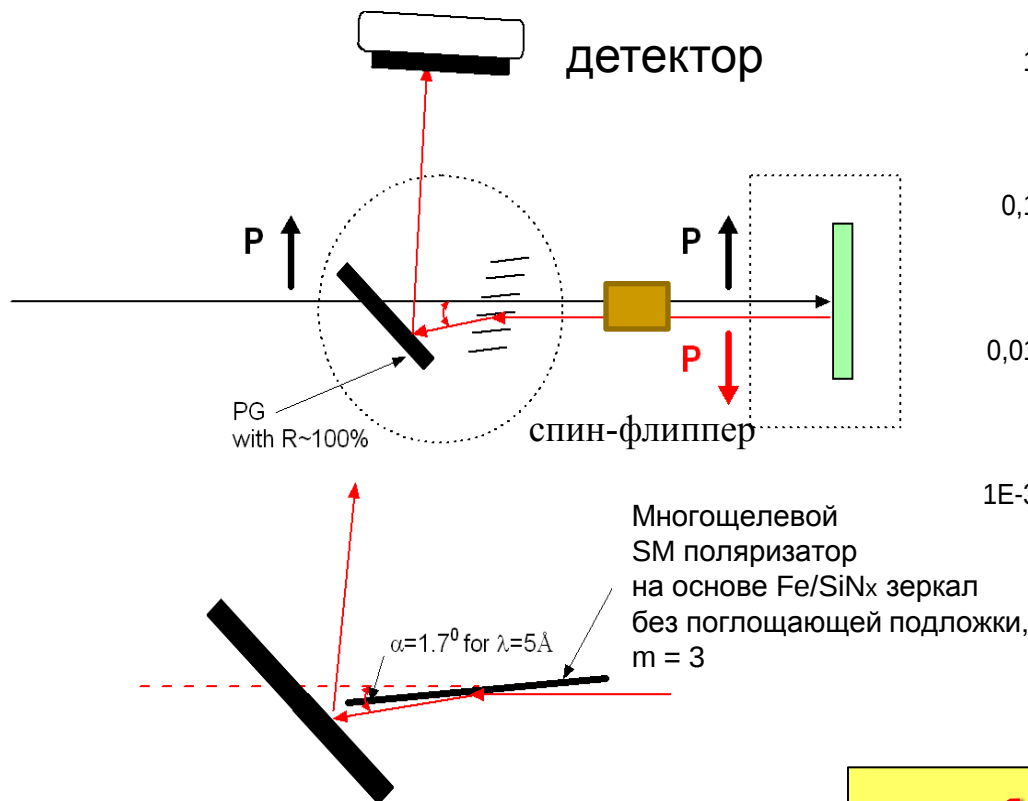
CRYOPAD для ЭДМ эксперимента



- Внутренний диаметр – 642×256 мм
- Размер входного и выходного окна - 120×120 мм²
- Входное и выходное окна плоскопараллельны друг другу с точностью не хуже $\sim 10^{-3}$ рад
- Точность и однородность поворота поляризации по всей апертуре пучка должны быть не хуже $\sim 10^{-3}$ рад
- Остаточные магнитные поля $\sim 10^{-4}$ Гс
- Время стабилизации 10^{-5} Гс / час

$$\sigma_d \sim 3 \cdot 10^{-25} \text{ е см/сутки}$$

Многощелевой SM поляризатор на основе Fe/SiN_x зеркал



$$\sigma_d \sim 1.8 \cdot 10^{-25} \text{ e cm/сутки}$$

Параметры нецентросимметричных кристаллов

Crystal	Symmetry group	hkl	d, (Å)	E_g , 10^8V/cm	τ_a , ms	$E_g \tau_a$, (kV·s/cm)
α -quartz (SiO ₂)	32(D ⁶ ₃)	111	2.236	2.3	1	230
		110	2.457	2.0		200
Bi₁₂SiO₂₀	123	433	1.75	4.3	4	1720
		444	1.46	4.65		1860
Bi₁₂GeO₂₀	123	433	1.74	4.65	1	465
		444	1.46	4.8		480
PbO	P c a 21	002	2.94	10.4	1	1040
		004	1.47	10		1000
BeO	6mm	011	2.06	5.4	7	3700
		201	1.13	6.5		4500

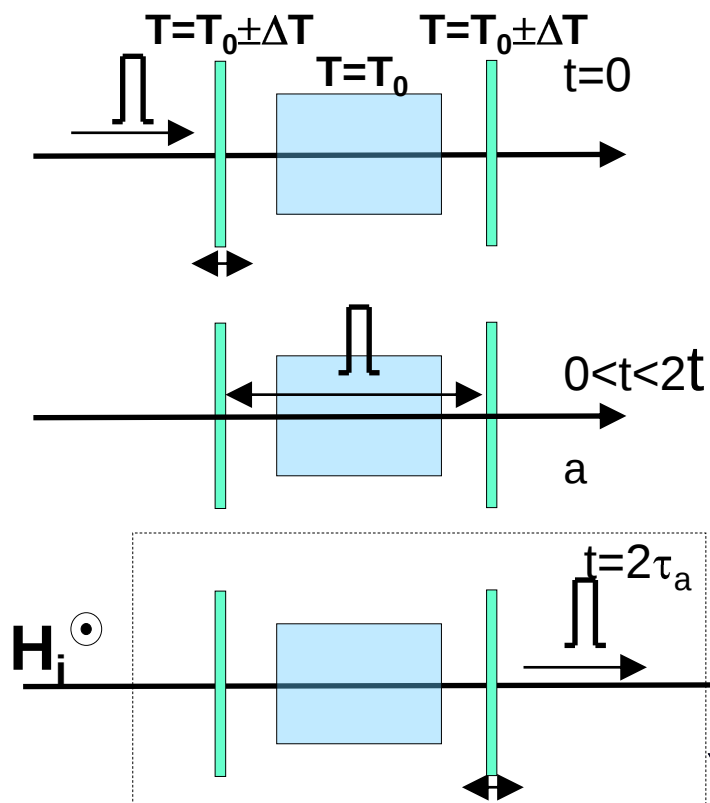
Накопительный вариант установки для импульсного источника нейтронов

Брэгговская ширина

$$\Delta v_B = \frac{4\hbar F_g d}{mV_c} \xrightarrow{(444)Bi_{12}SiO_{20}} 0.6 \text{ см/с}$$

Время прохождения импульса через
кристалл и обратно

$$\tau_r \sim 2L / v_n \xrightarrow{L=15\text{см}} \sim 0.2 \text{ мс}$$



τ_a – время поглощения нейтронов в кристалле

Ускорение кристалла

$$a_c = \Delta v_B / \tau_r \sim 30 \text{ м/с} = 3g$$

$$\sigma_d \sim 2 \cdot 10^{-26} \text{ е см/сутки}$$

для ESS

Заключение

- Использование кристаллов кварца суммарным размером $105 \times 100 \times 500$ мм³ и CRYOPAD с плоскопараллельными входным и выходным окном позволяет достичь чувствительности $\sim 3 \cdot 10^{-25}$ е см/сутки
- Использование многоцелевого SM поляризатора на основе Fe/SiN_x зеркал без поглощающей подложки $\sim 1.8 \cdot 10^{-25}$ е см/сутки
- Дальнейшее усовершенствование метода может быть связано с использованием других нецентросимметричных кристаллов и накопительного варианта установки позволит достичь чувствительности на уровне $\sim 2 \cdot 10^{-26}$ е см/сутки