

Эксперимент по поиску ЭДМ нейтрона методом УХН

На реакторе института Лауэ-Ланжевена в Гренобле выполнен новый этап эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона .

На величину ЭДМ нейтрона установлено ограничение: $d_n \leq 5.5 \cdot 10^{-26} \text{e} \cdot \text{cm}$ (C.L. 90%).

Участники работы:

ПИЯФ

А.П.Серебров, Э.А.Коломенский, А.Н.Пирожков,
И.А.Краснощёкова, А.В.Васильев, А.О.Полюшкин,
М.С.Ласаков, А.Н.Мурашкин, В.А.Соловей,
А.К.Фомин, И.В.Шока, О.М.Жеребцов

ФТИ

Е.Б.Александров, С.П. Дмитриев, Н.А. Доватор

ИЛЛ

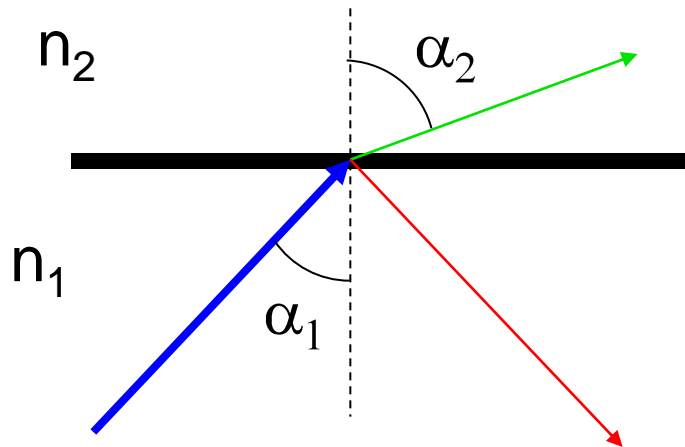
П.Гельтенборт, О.Циммер, С.Н.Иванов.

Что такое УХН ?

- Энергия $< 250 \text{ neV}$, скорость $< 7 \text{ m/s}$, $T < 3 \text{ mK}$
- Отражаются от поверхности некоторых материалов при любых углах падения
- Могут храниться в материальных и магнитных ловушках длительное время (до нескольких минут)

Ферми-потенциалы и граничные
скорости некоторых
материалов:

Полное внутреннее отражение



$$n_1 > n_2$$
$$\sin(\alpha_1) / \sin(\alpha_2) = n_2 / n_1$$

Be	254 neV	6,9 m/c
Ni	250 neV	6,85 m/c
⁵⁸ Ni		8,1 m/c
Нерж. сталь	200 neV	6,0 m/c
Cu		5,6 m/c
Al	54 neV	3,2 m/c

УХН используются для высокоточных измерений свойств самого нейтрона:

Время жизни
свободного нейтрона

$$LT = 878.5 \pm 0.7 \pm 0.3 \text{ s}$$

- Serebrov A. et al., *Phys. Lett.*, B605, 72, (2005)

EDM – электрический
дипольный момент

$$EDM \leq 2,9 \cdot 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm} \text{ (90\% C.L.)}$$

- C.A. Baker et al., *Phys. Rev. Lett.*, 97, 131801 (2006)

Для чего нужно более точно измерять эти величины?

- Существование ЭДМ у элементарной частицы возможно только при одновременном нарушении Р и Т-симметрии (СР – в рамках СРТ-теоремы).
- В Стандартной Модели (СМ) наблюдаемое в распадах **K** и **B** мезонов СР-несохранение объясняется в полной мере. При этом ЭДМ нейтрона предсказывается на уровне меньше, чем $10^{-31} \text{ e} \cdot \text{cm}$, что на несколько порядков ниже существующего ограничения и недоступно для эксперимента.
- Трудности СМ: нет объяснения барионной асимметрии Вселенной.
 Наблюдаемая Ожидаемая в рамках СМ

$$\frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \approx 10^{-9}$$

$$\frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \approx 10^{-18}$$

- Только теории за пределами СМ предлагают новые каналы СР нарушения, так же как и барионного числа (А.Д.Сахаров, 1967г.), необходимых для объяснения барионной асимметрии Вселенной.
- В таких теориях ЭДМ нейтрона оказывается на уровне, близком к экспериментально установленному порогу.
- Измерение ЭДМ нейтрона – важный аргумент для выбора вариантов расширения СМ

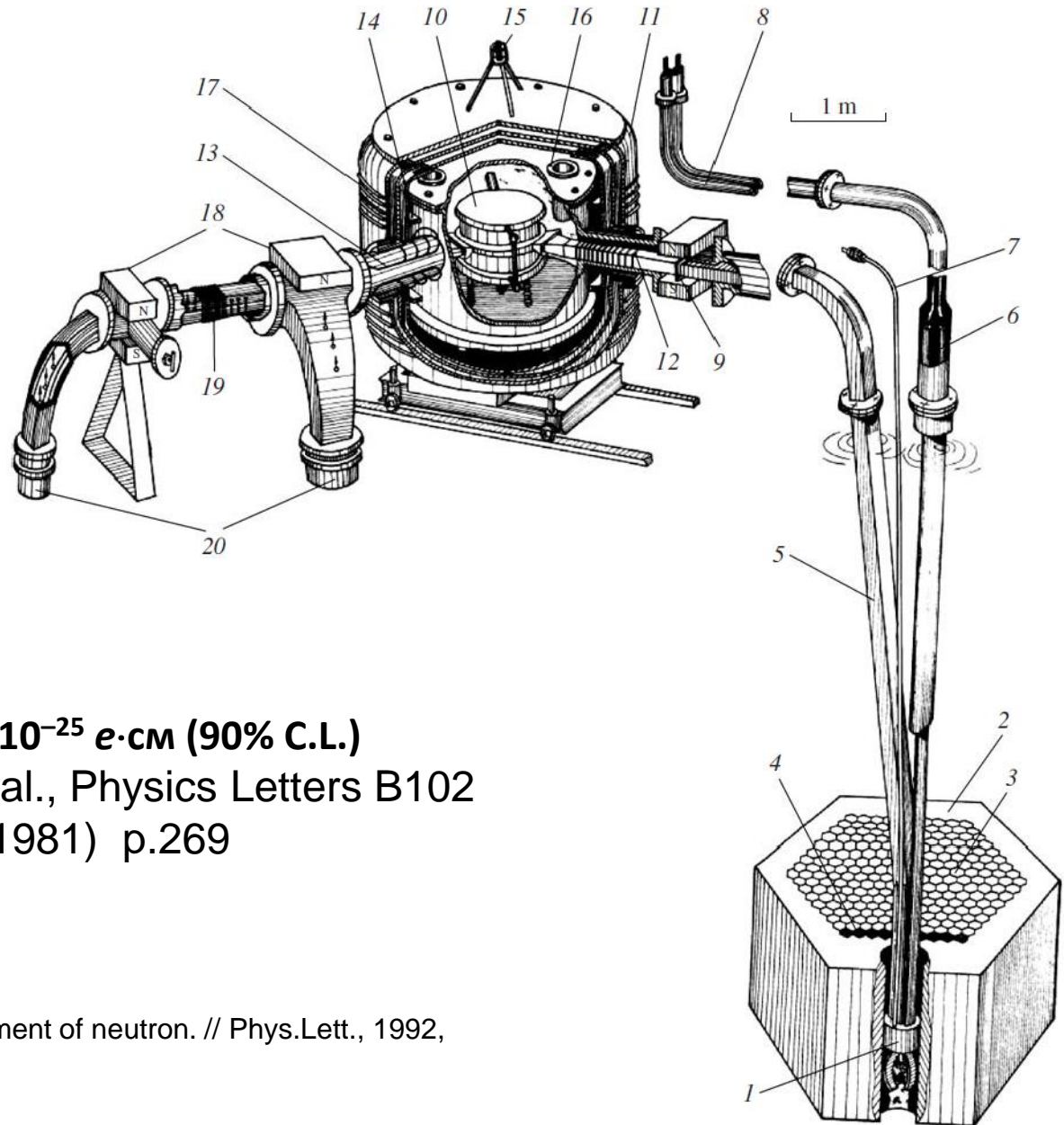
Gatchina EDM spectrometer 1975



**The first result for nEDM
with UCN method**
 $|d_n| < 1.6 \cdot 10^{-24} \text{ e} \cdot \text{cm}$
(90% C.L.)

Altarev I.S. et al.,
Nuclear Physics A341 (1980)
269-283

Gatchina EDM
spectrometer
with UCN
liquid hydrogen
source
in berillium
reflector of
WWR-M reactor



$$|d_n| < 6 \cdot 10^{-25} \text{ e} \cdot \text{cm} \text{ (90\% C.L.)}$$

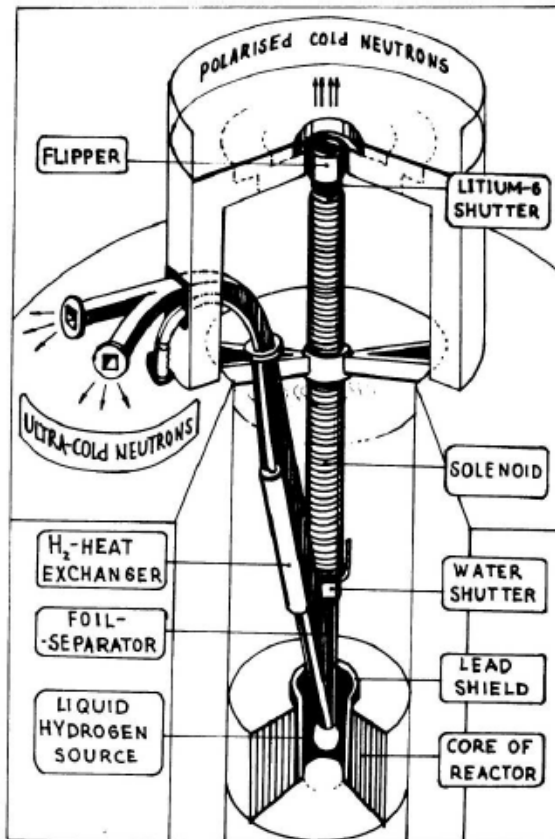
Altarev I.S. et al., Physics Letters B102
(1981) p.269

Altarev I.S et al.,
New measurement of electric dipole moment of neutron. // Phys.Lett., 1992,
B276, p.242-246.

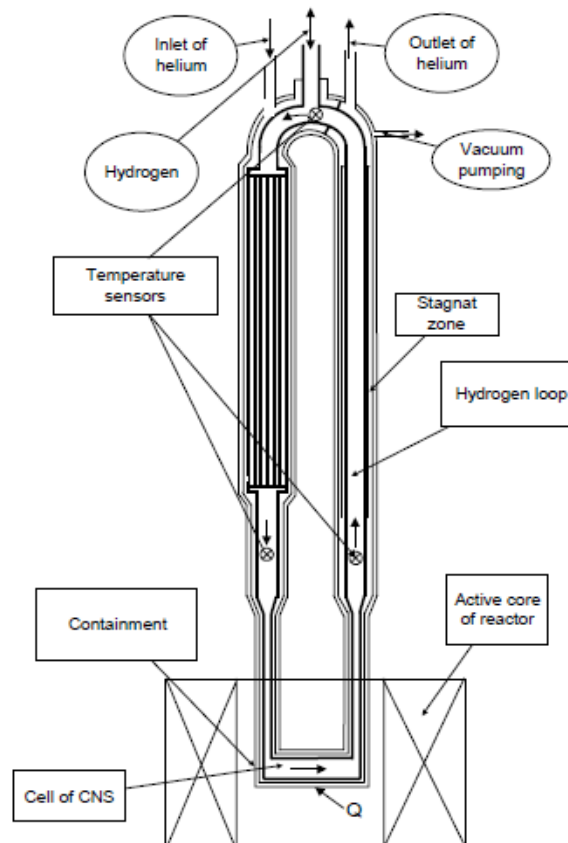
27-31 октября 2014г.

Universal source of cold and ultracold neutrons at reactor WWR-M PNPI

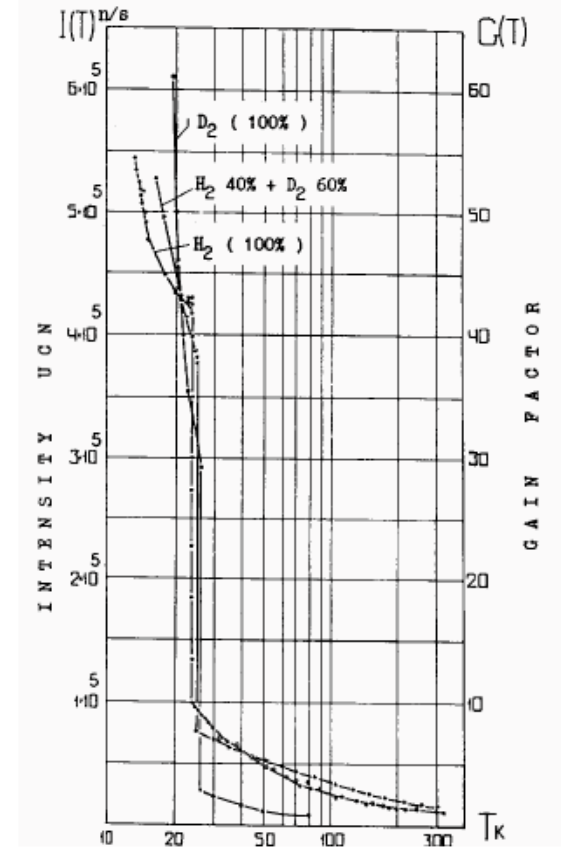
Universal cold neutron source



Subcooled liquid hydrogen thermosiphon

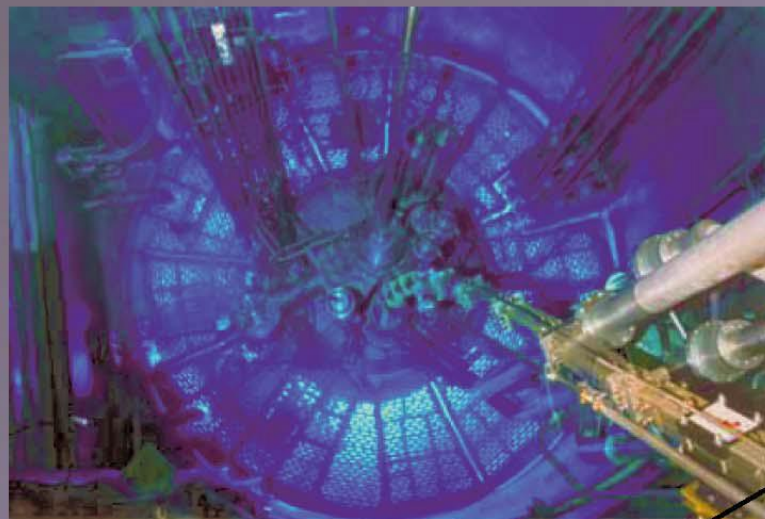


Gain factors in UCN production at the lower temperature



Temperature dependence of the yield of ultracold neutrons for different moderators

The UCN/VCN facility PF2

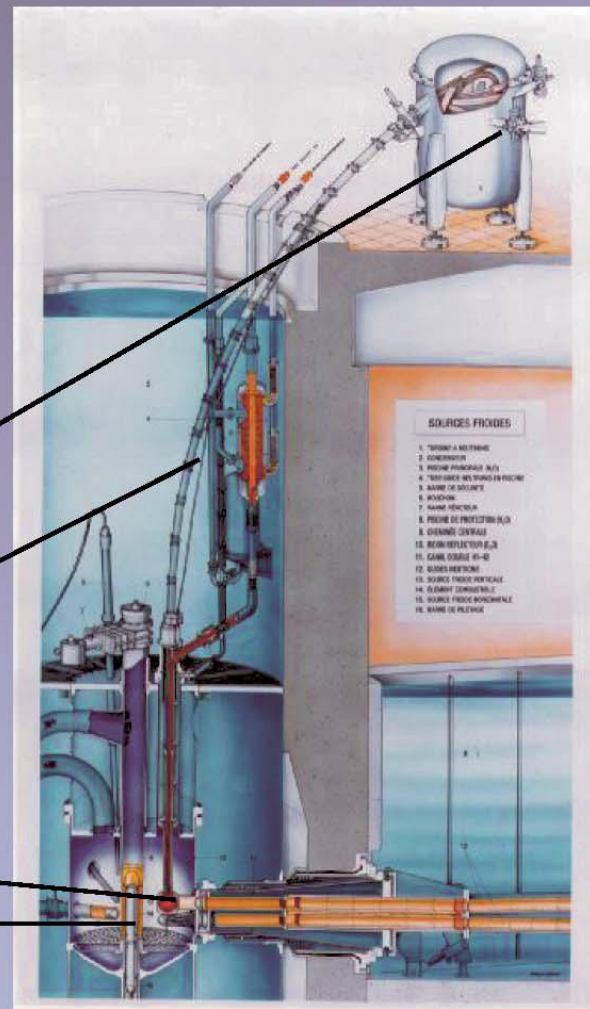


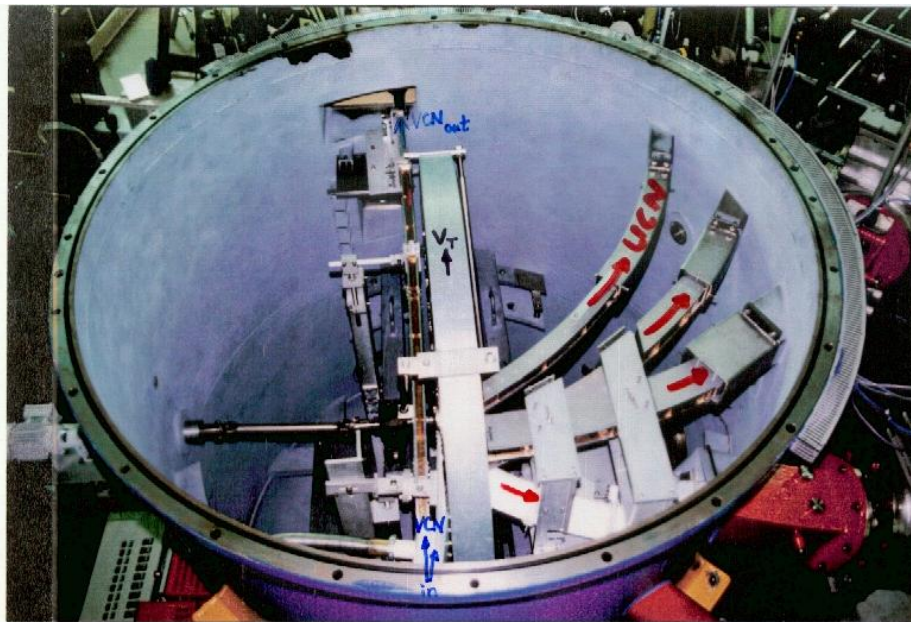
Neutron turbine
A. Steyerl (TUM - 1985)

Vertical guide tube

Cold source

Reactor core

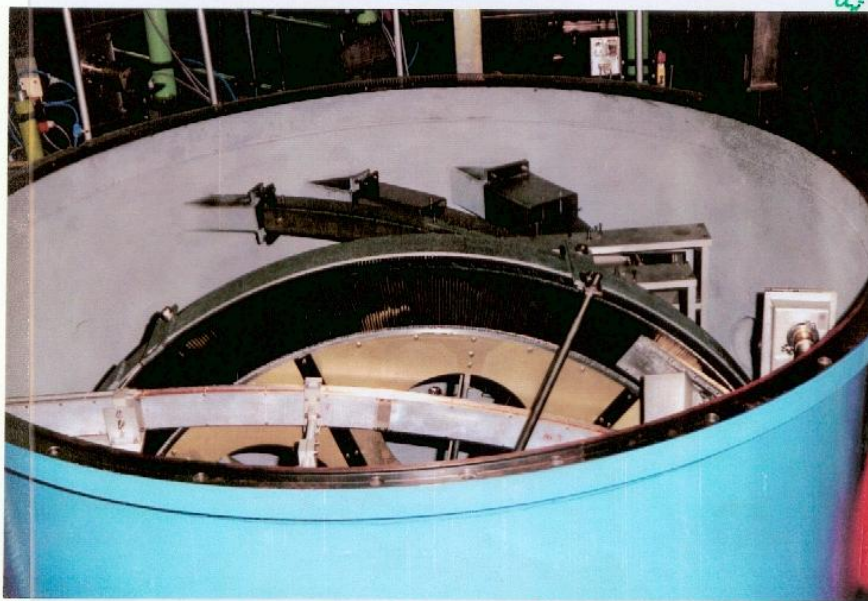




Top View

STEYERL'S TURBINE @ ILL

$\sim 250 \text{ rpm}$
 $d_f = 1.7 \text{ m}$

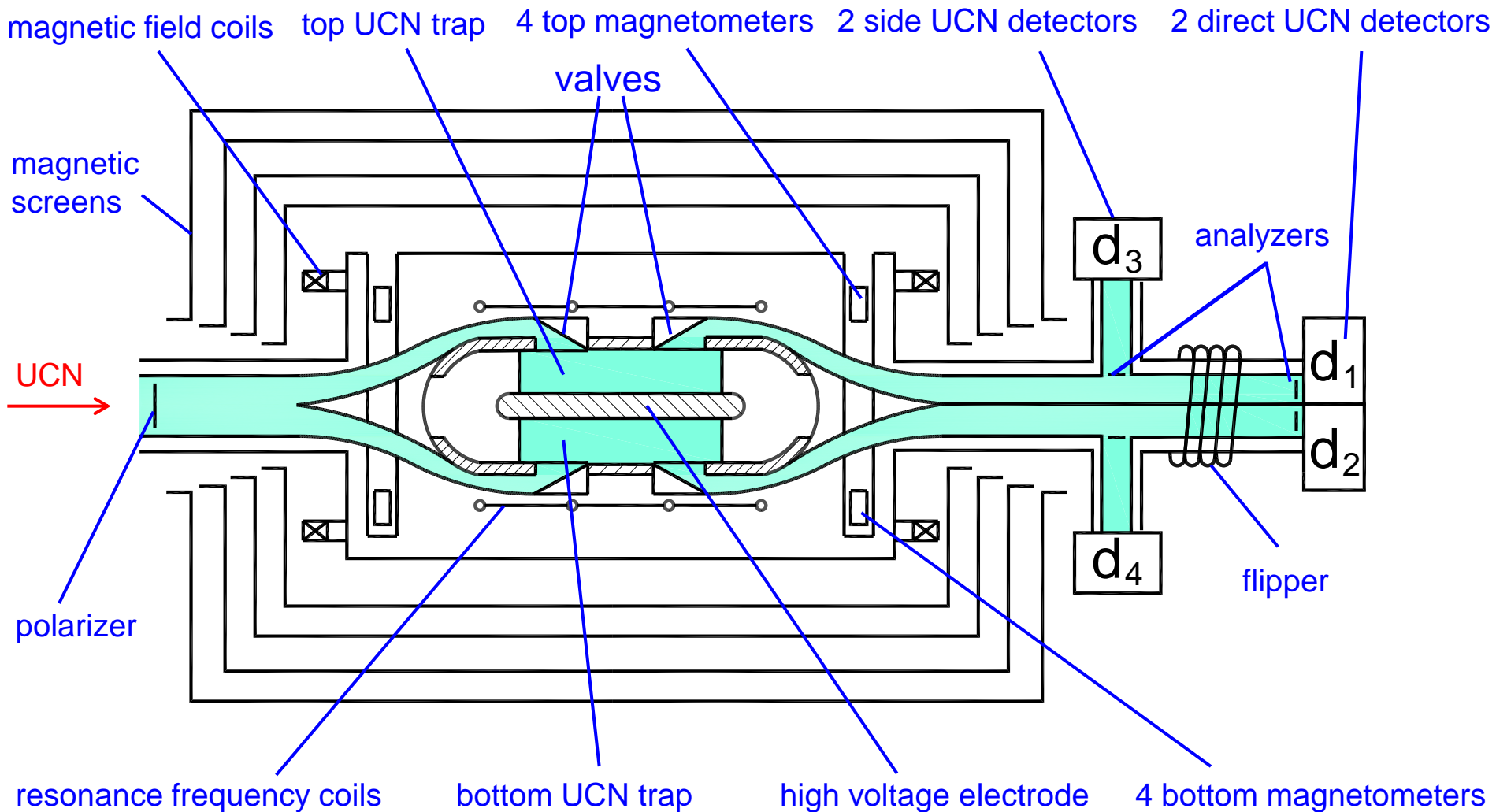


Side View

690 thin Ni curved blades, spacing 7 mm
w/ REPLICA technique

27-31 октября 2014

Схема двухкамерного EDM спектрометра

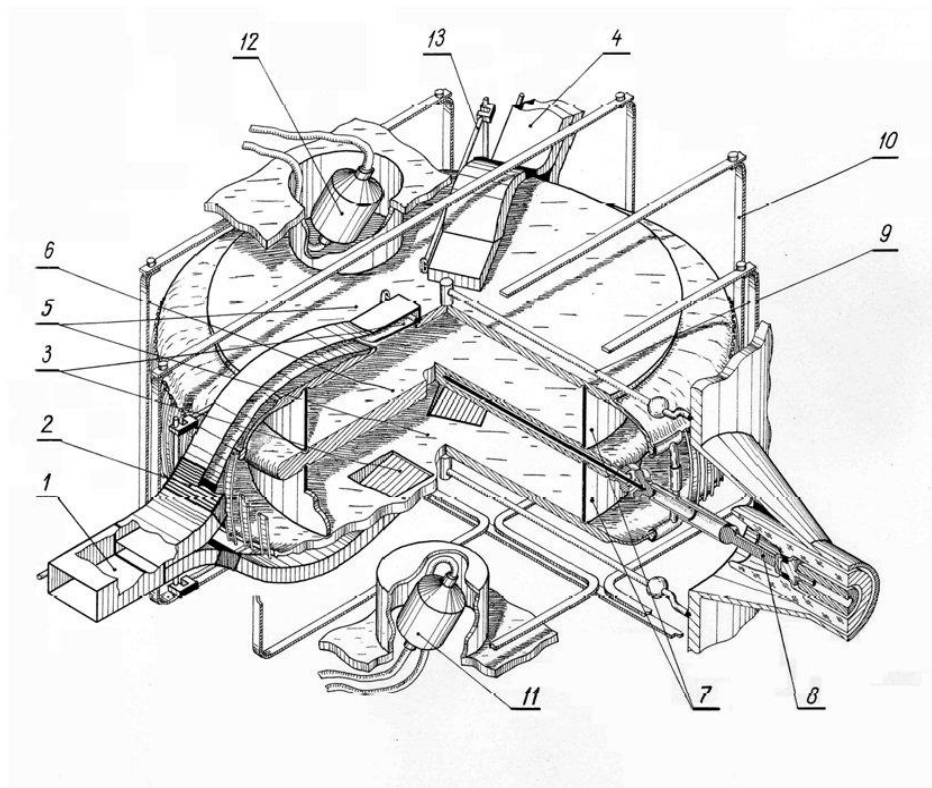


27-31 октября 2014г.

С-Петербург, РНЦИ-КС

Двухкамерный магниторезонансный ЭДМ спектрометр ПИЯФ

Поляризация и анализ поляризации нейтронов осуществляется во входном и выходном нейтронотодах соответственно, вне магнитных экранов, методом пропускания УХН через пленки из сплава Fe(50%)Co(50%), толщиной 200 нм и намагниченные до насыщения в поле постоянных магнитов. Поляризация нейтронов после прохождения пленки поляризатора составляет ~90%.



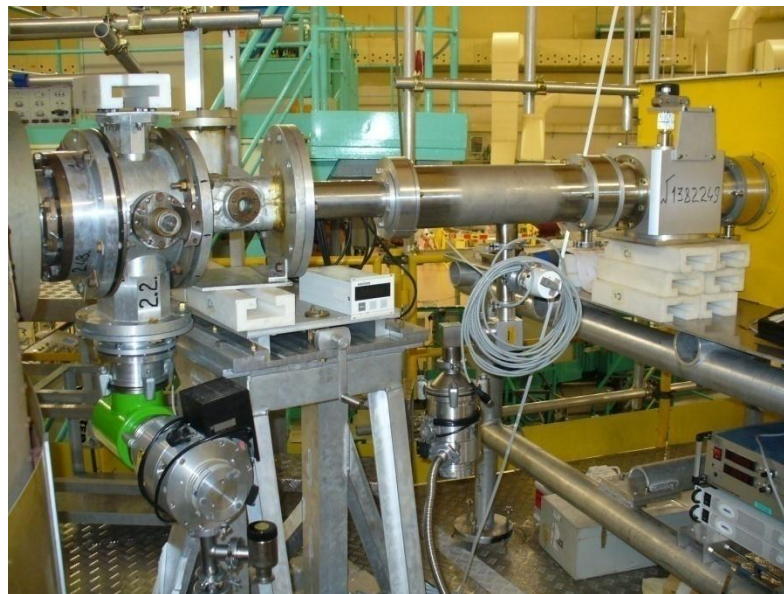
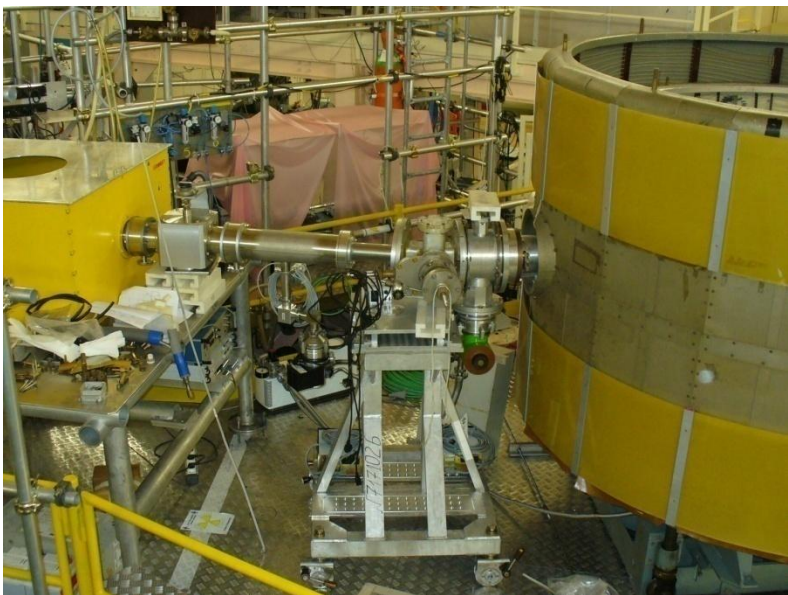
1 – входной нейтронотод; 2 – стеклянный участок нейтронотода (изолятор); 3 – входные шторки камер хранения нейтронов; 4 – выходной нейтронотод; 5 – заземленные электроды; 6 – высоковольтный электрод; 7 – титановые боковые стенки камер хранения нейтронов; 8 – узел высоковольтного ввода в вакуумную камеру; 9 – стержень заземления; 10 – виток катушки осциллирующего поля; 11, 12 – датчики магнитометров; 13 – штанга привода механизма выходных шторок.

Монтаж двухкамерного ЭДМ спектрометра на реакторе ILL



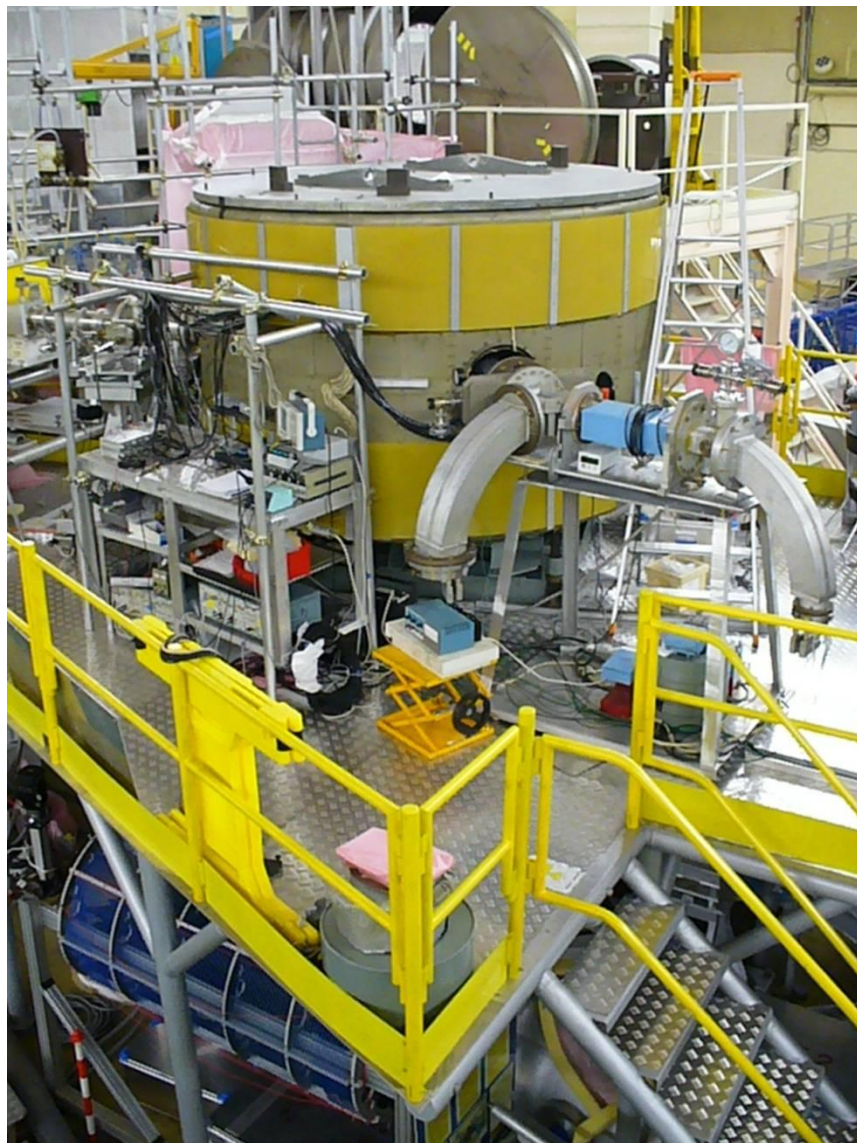
27-31 октября 2014г.

С-Петербург, РНСИ-КС



бур,

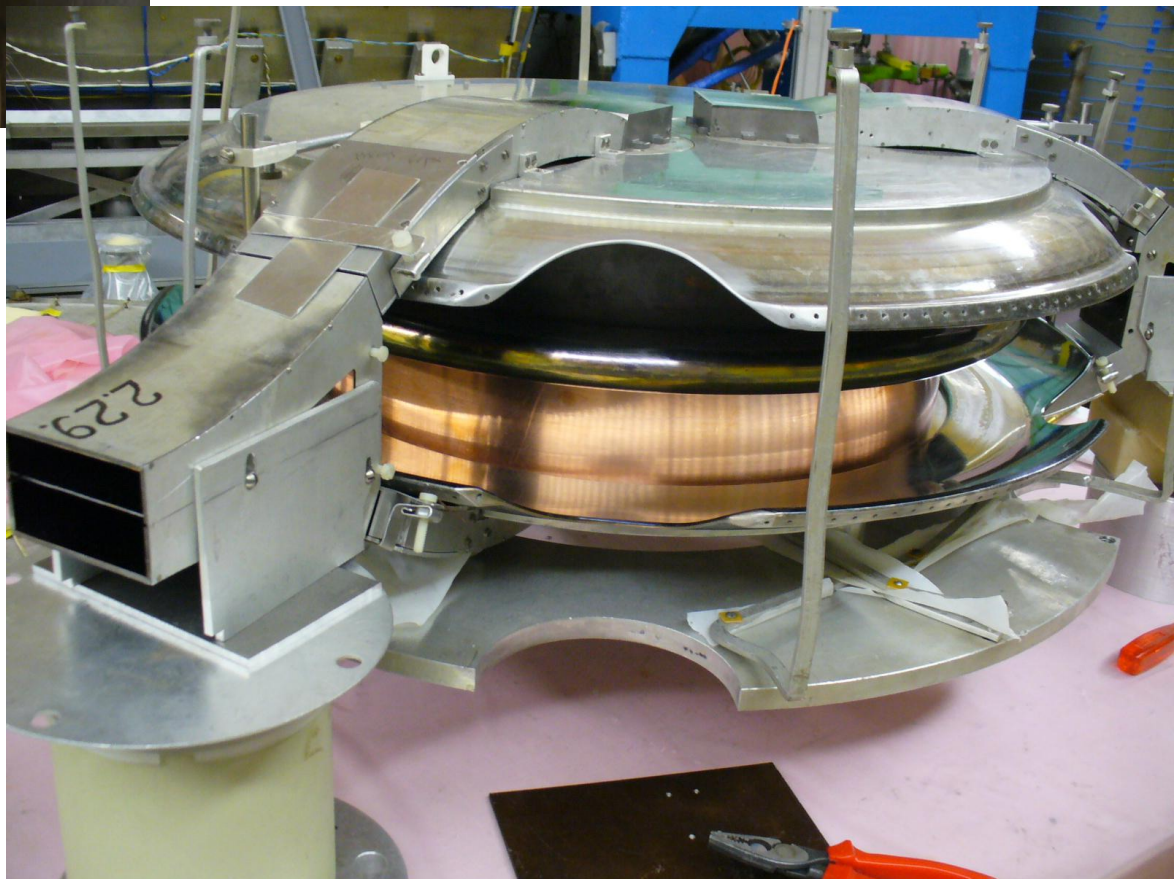
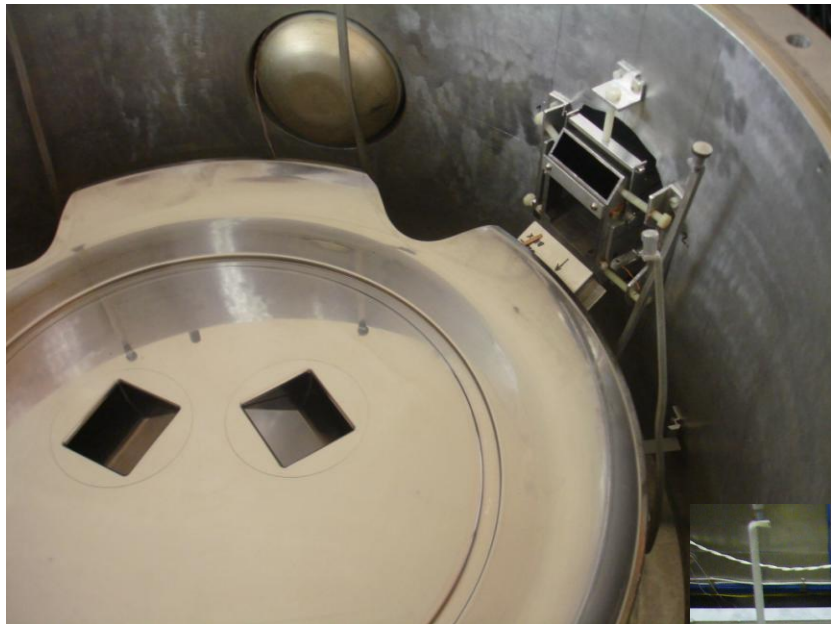
ЭДМ спектрометр ПИЯФ на позиции RF2 МАМ



27-31 октября 2014г.

С-Петербург, РИСИ-КС



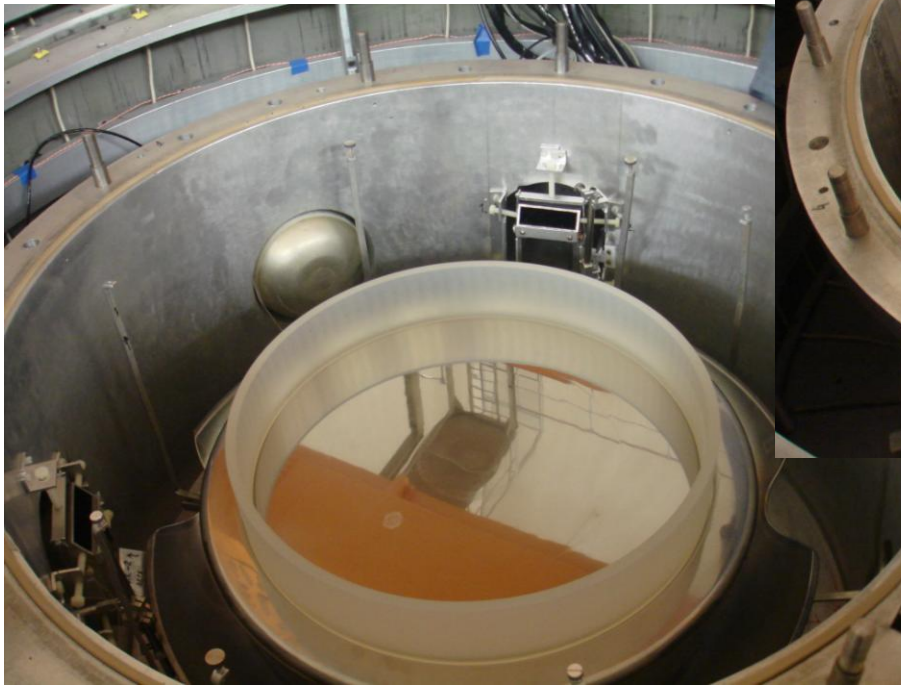
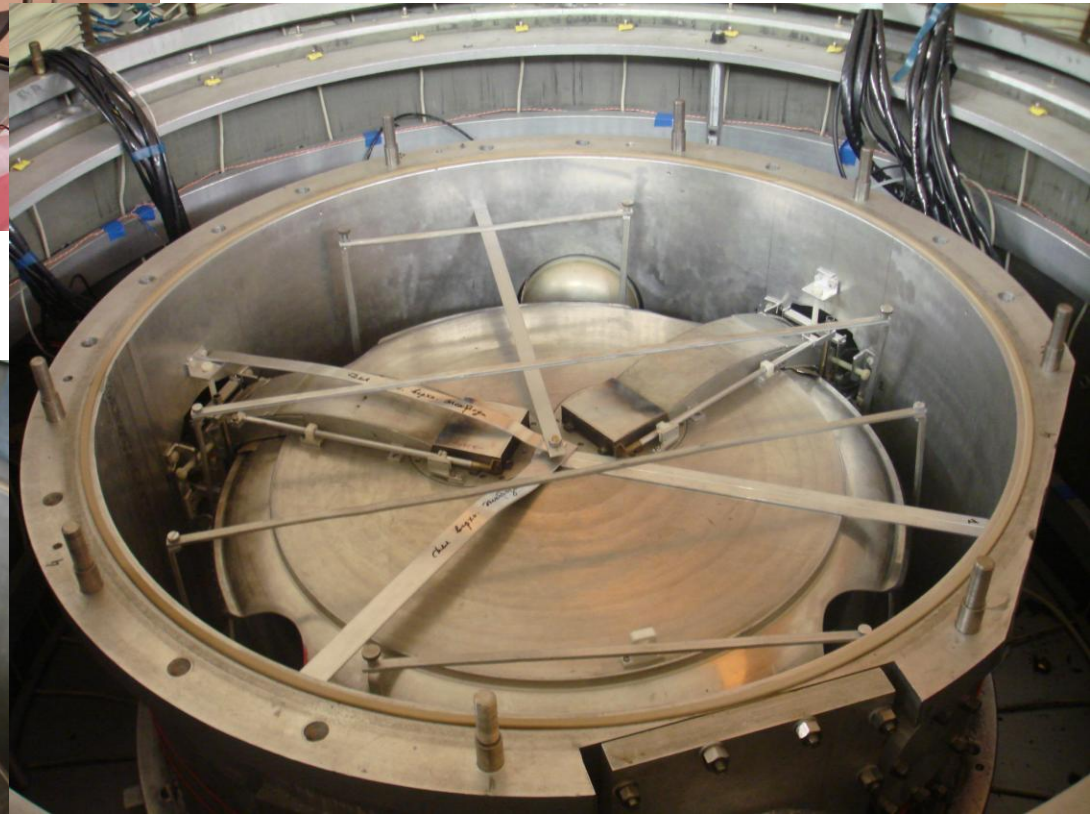
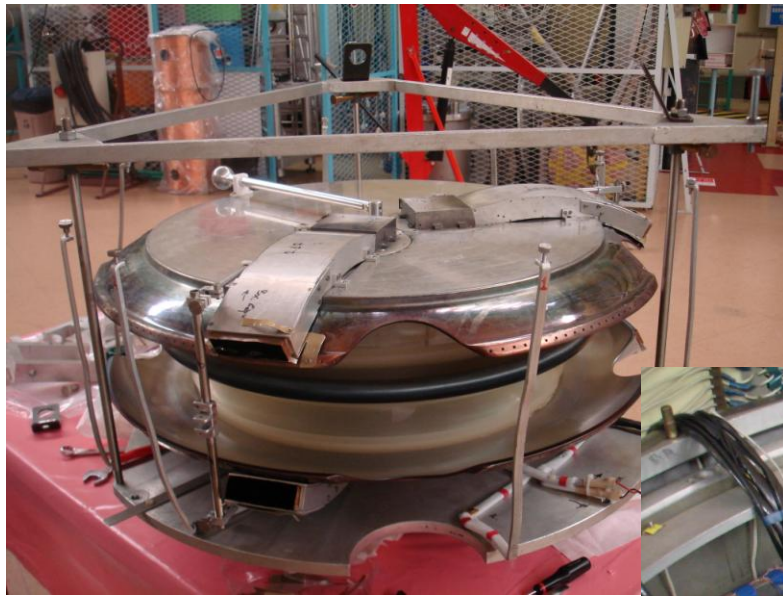


27-31 октября 2014г.

Покрытие рабочих
поверхностей:

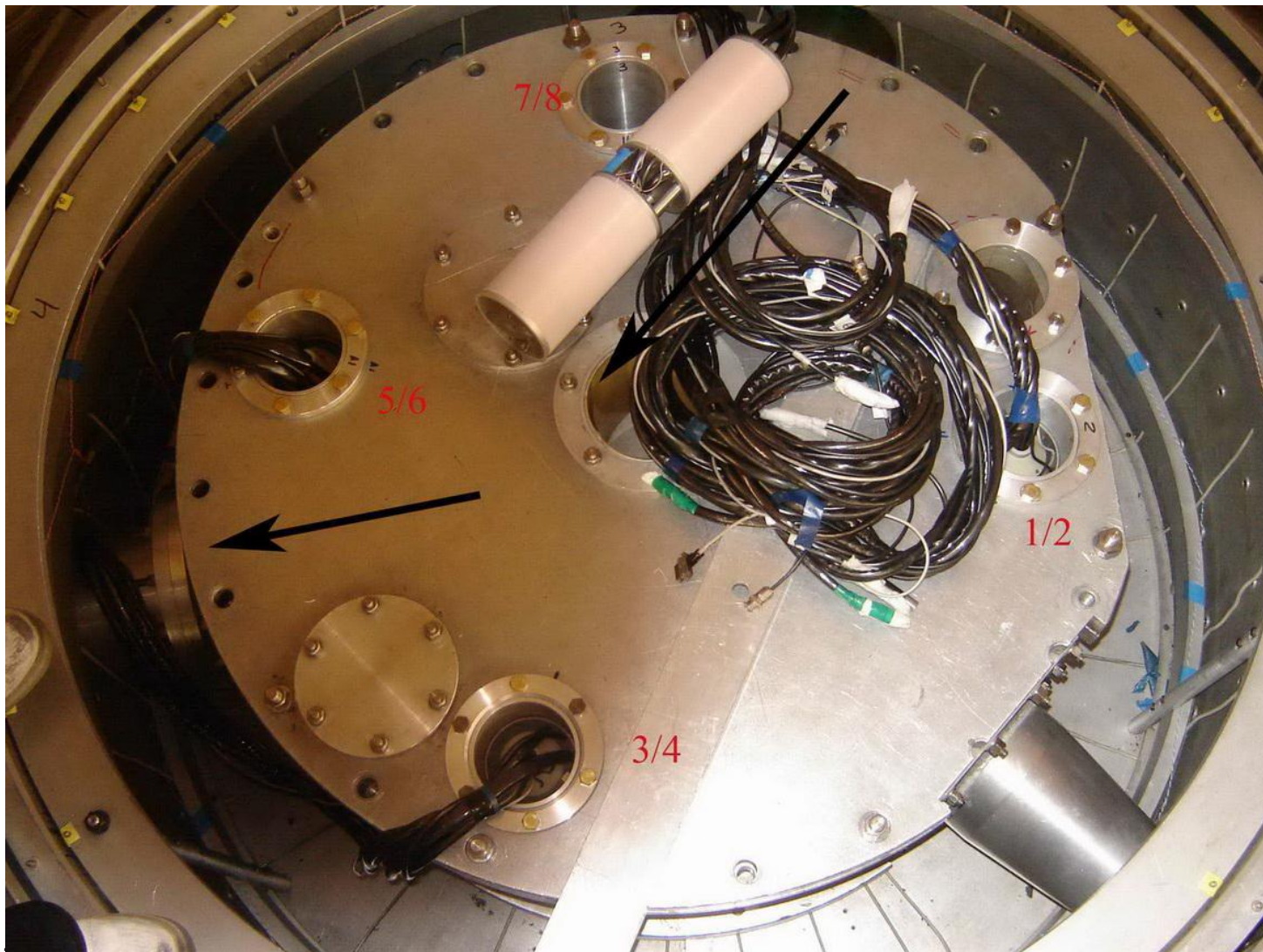
Электроды – Ве

Изоляторы – ВеО или
композиция оксидов Ni и Mo



РНСИ-КС

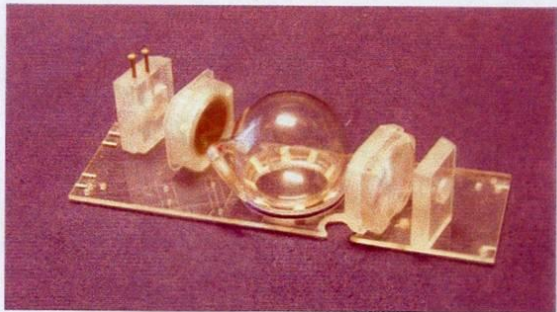
8 (4x2) Cs-магнитометров внутри EDM спектрометра



27-31 октября 2014г.

С.-Петербург, ГПСИ-КС

Подготовка Cs- магнитометров в ФТИ





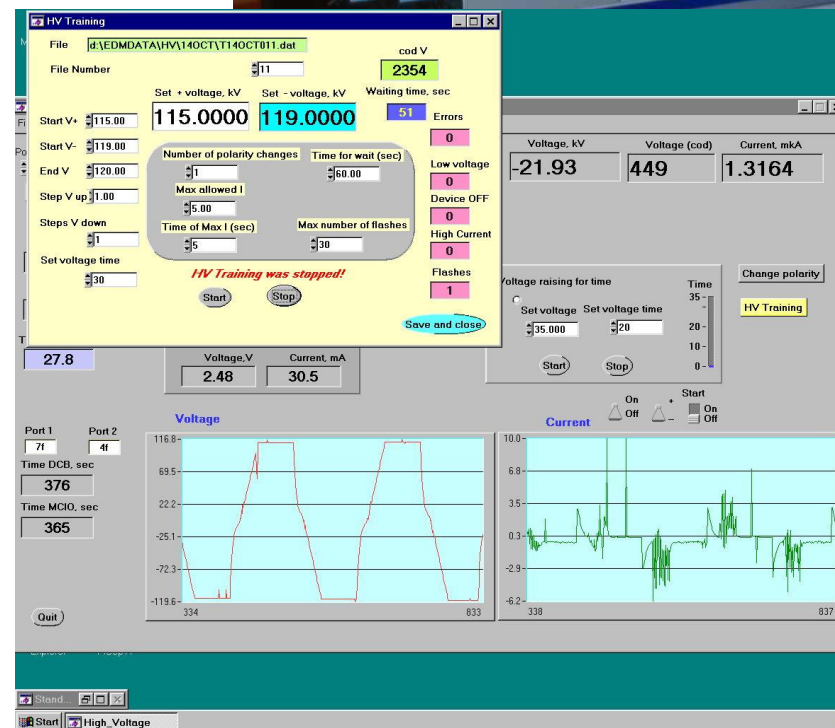
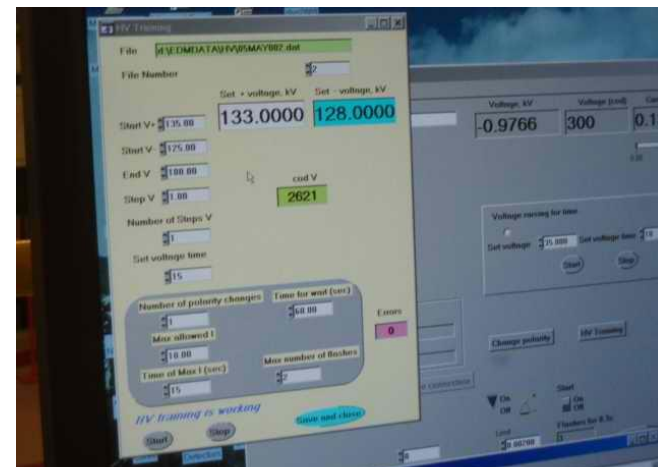
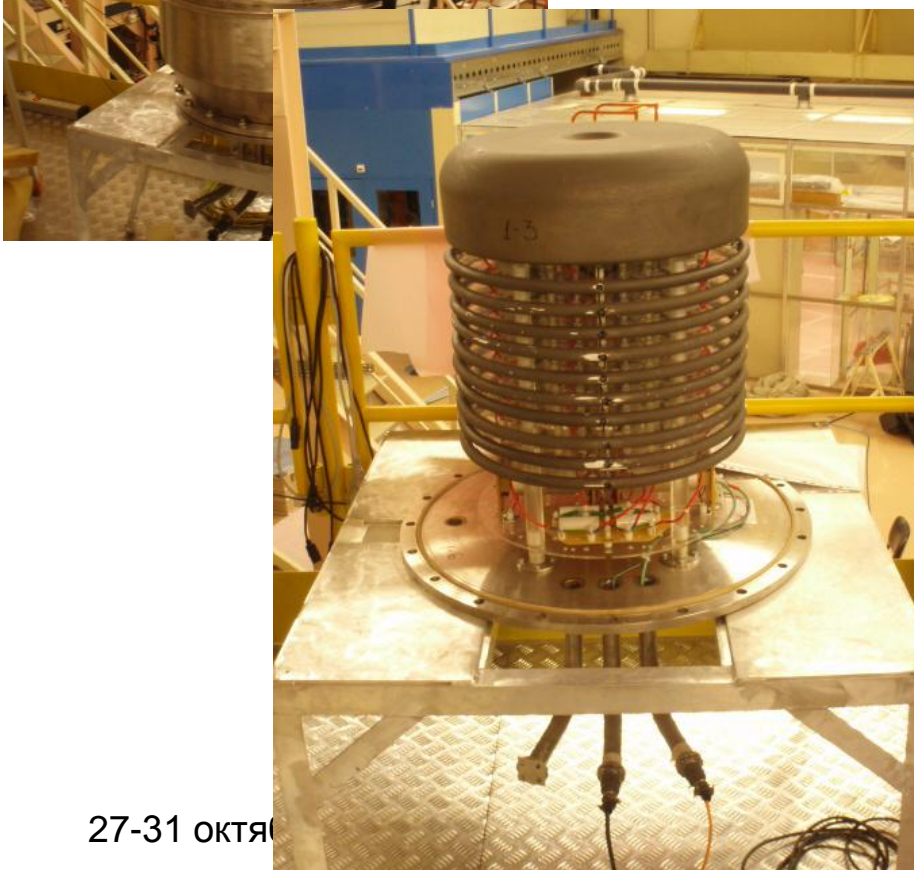
НВ- источник в ИЛЛ

$V = \pm 200 \text{ kV}$.

Реверс полярности – без
разрыва цепи нагрузки.

Рабочая атмосфера – элегаз,

$P < 1,5 \text{ атм.}$



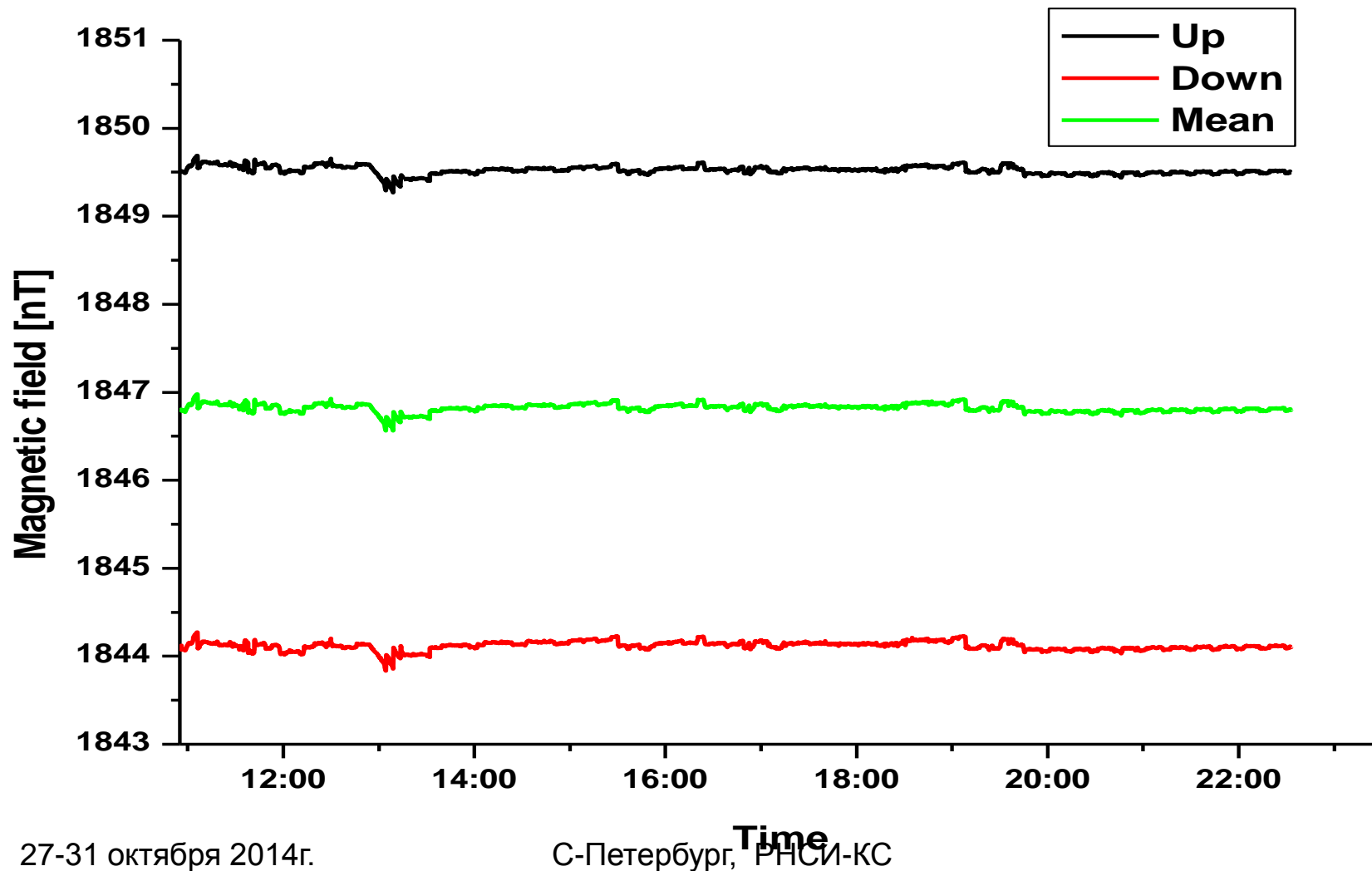
Интерактивное окно программы управления
высоковольтным источником

27-31 октября

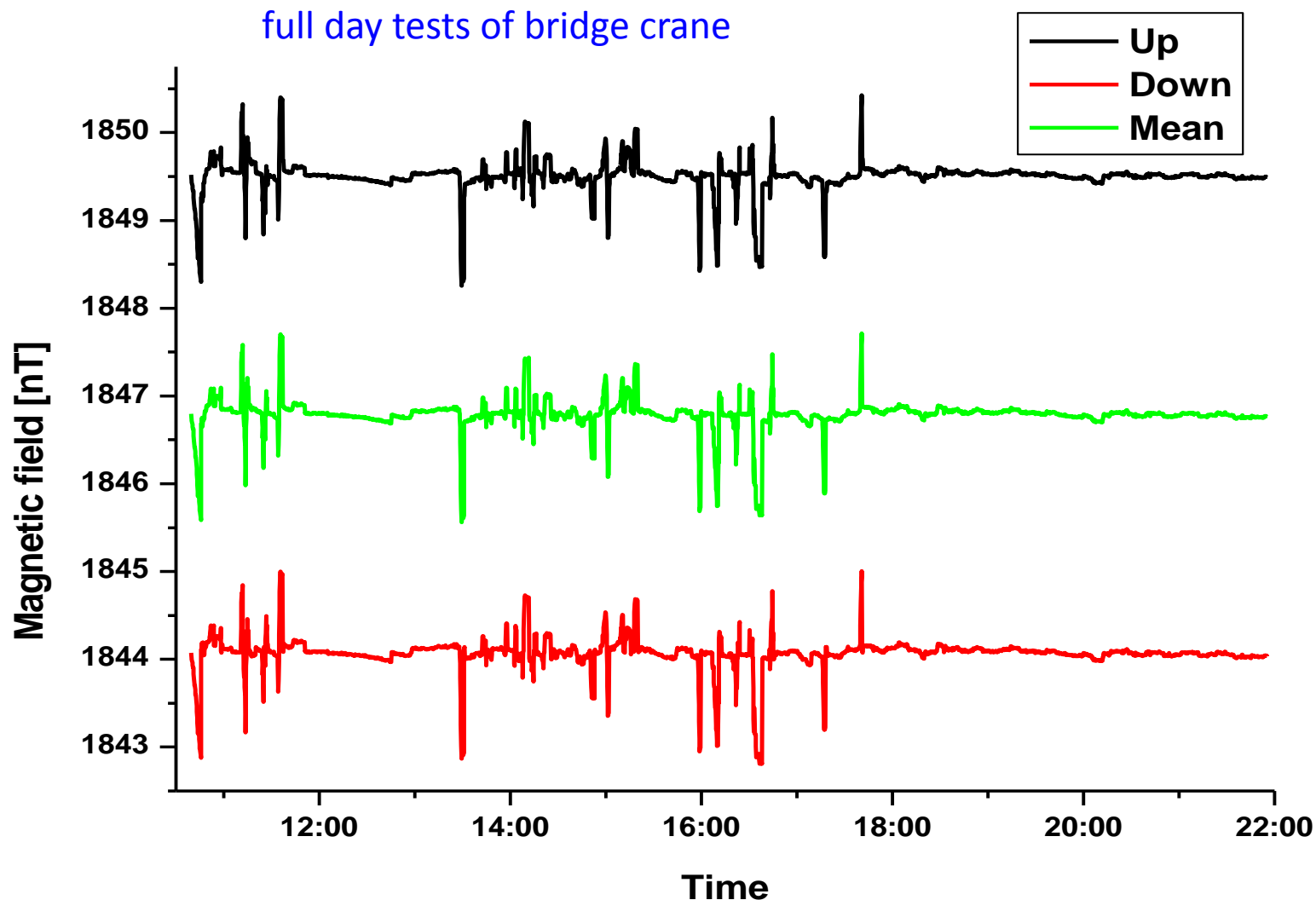
ог, РНСИ-КС

Стабильность магнитного поля в объеме хранения УХН при «тихой» магнитной обстановке

quiet magnetic situation



Стабильность магнитного поля в объеме хранения УХН при работе мостового крана экспериментального зала



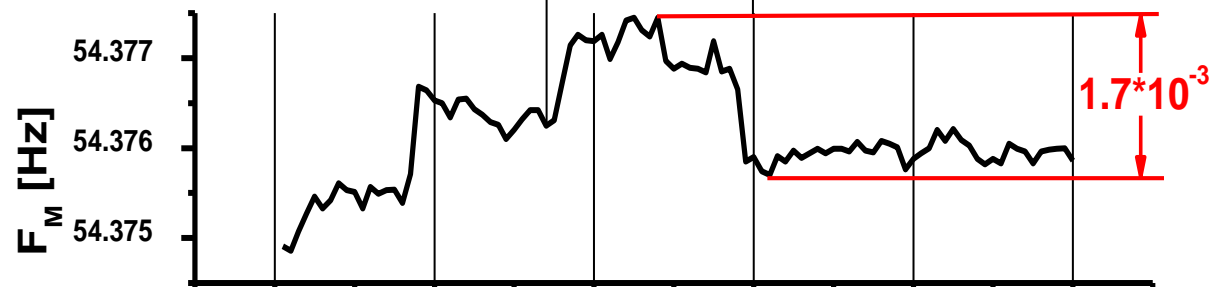
27-31 октября 2014г.

С-Петербург, РНСИ-КС

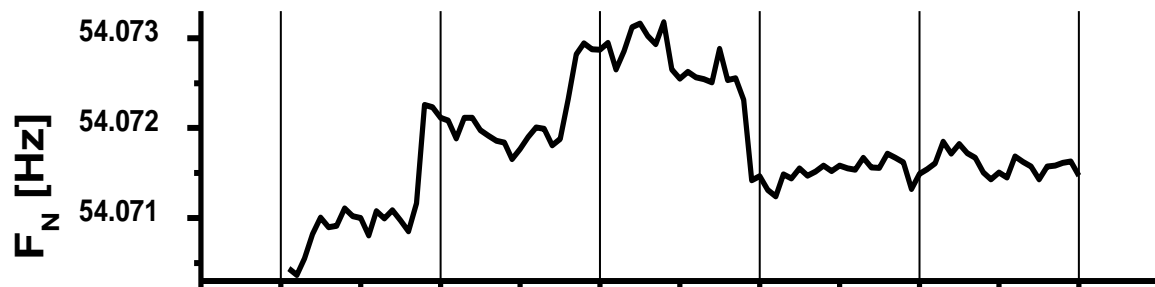
Влияние внешних магнитных флуктуаций на стабильность резонансных условий в ЭДМ спектрометре

(фактор стабилизации посредством 8 Cs-магнитометров составляет величину 10 – 15 раз)

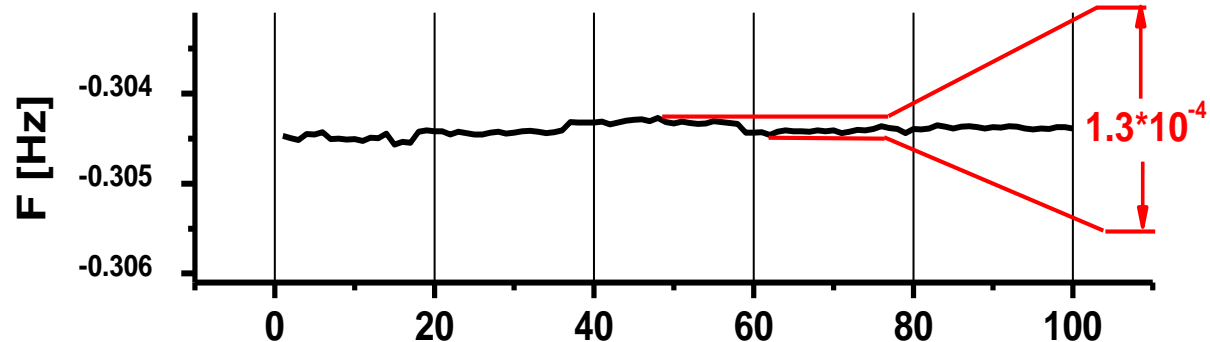
crane operation



a) F_M - средняя частота 8-ми Cs магнитометров



b) F_N – частота, измеренная добавочным Cs магнитометром в рабочем объеме;

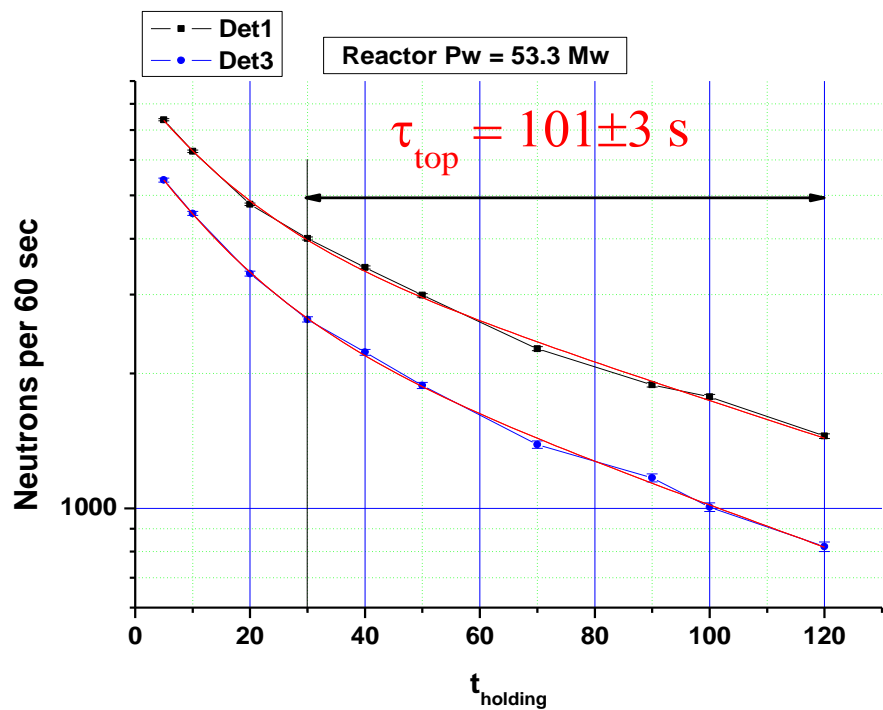


c) Разница $F_N - F_M$.

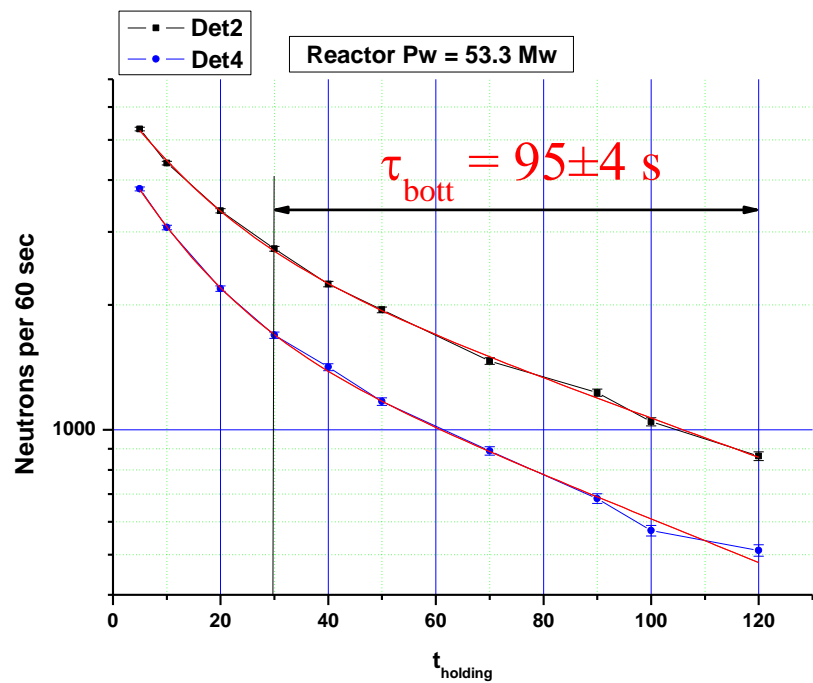
27-31 октября 2014г.

С-Петербург, РНЦИ-КС
Number of measurement 24

Время хранения УХН в ловушках

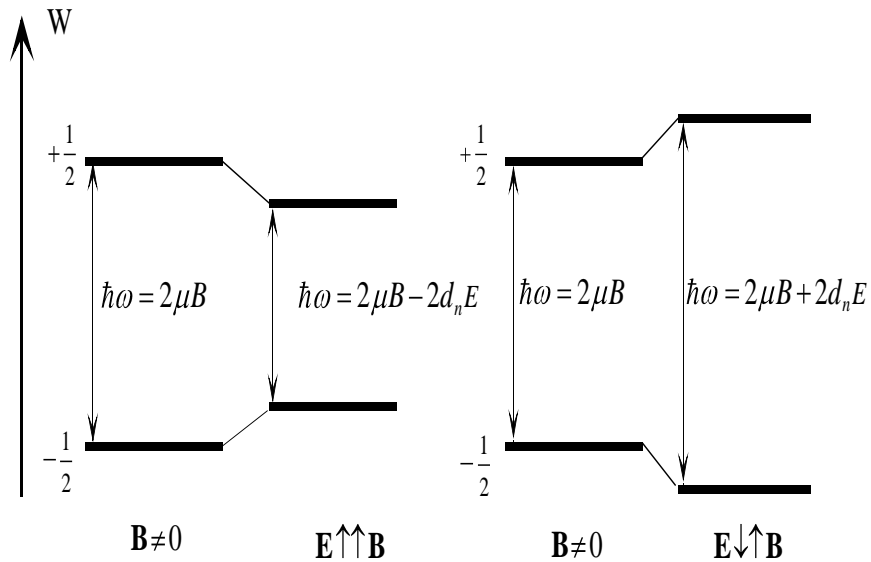


Верхняя камера



Нижняя камера

$$W = -(\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}_0) - (\mathbf{d}_n \cdot \mathbf{E}).$$



На эксперименте определяется
сдвиг резонансной кривой в
зависимости от направления
электрического поля

Измеряемая величина:

$$d_n = \frac{h(N^+ - N^-)}{2(E^+ + E^-) \cdot \frac{\partial N}{\partial f}}$$

Чувствительность ЭДМ эксперимента:

В ИЛЛ была достигнута чувствительность установки

$$\delta d_n = 1,7 \cdot 10^{-25} \text{ е}\cdot\text{см/сутки}$$

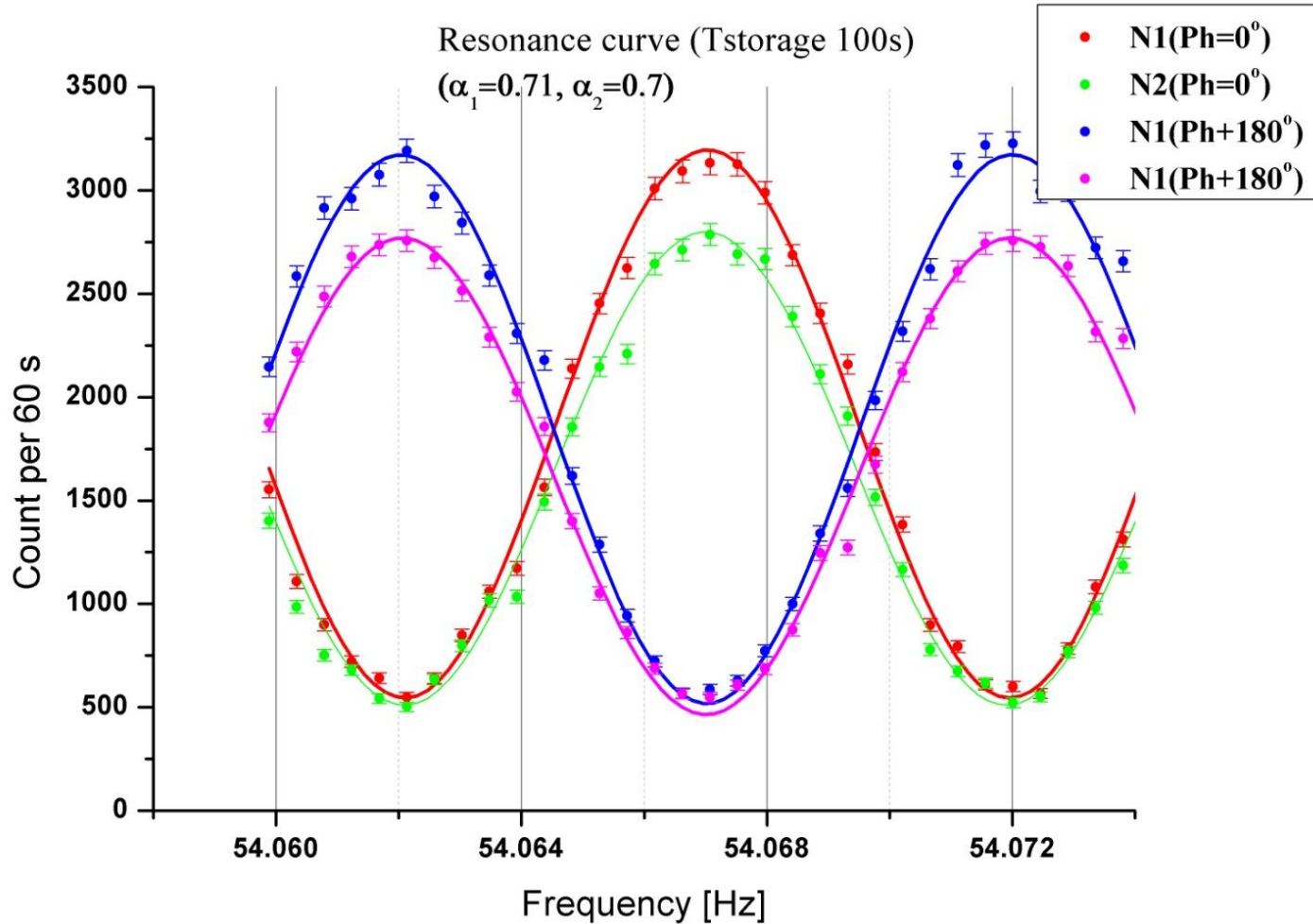
для параметров: $E=18 \text{ kV/cm}$, T (хранение) = 100с, 4 детектора

(Было в Гатчине: $\sim 3 \cdot 10^{-25} \text{ е}\cdot\text{см/сутки}$)

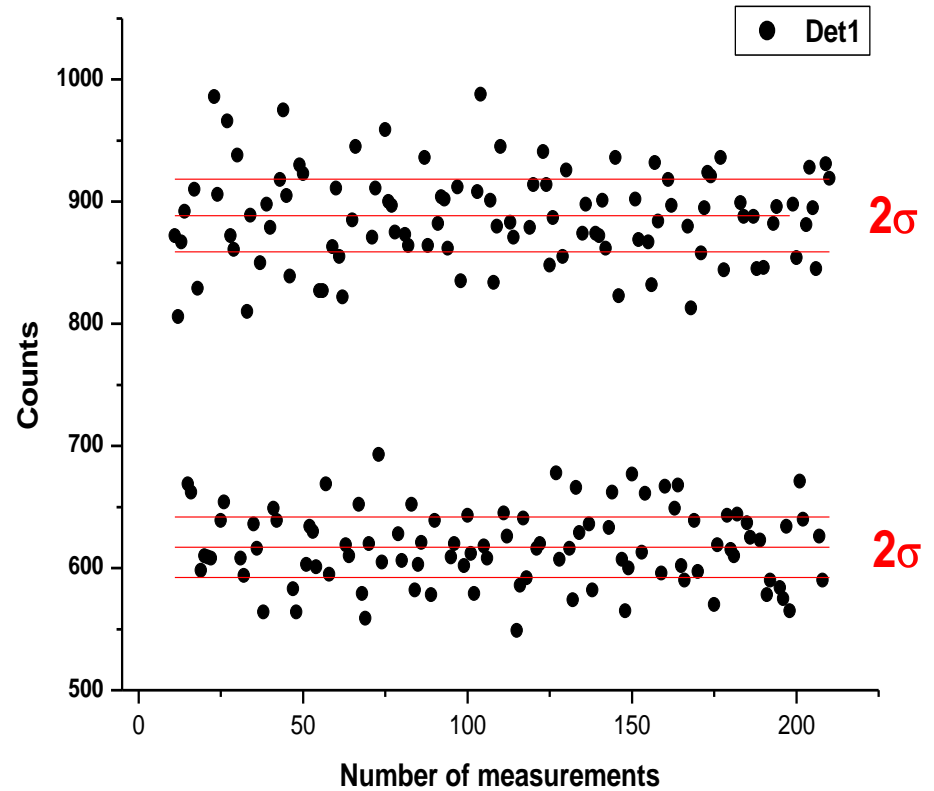
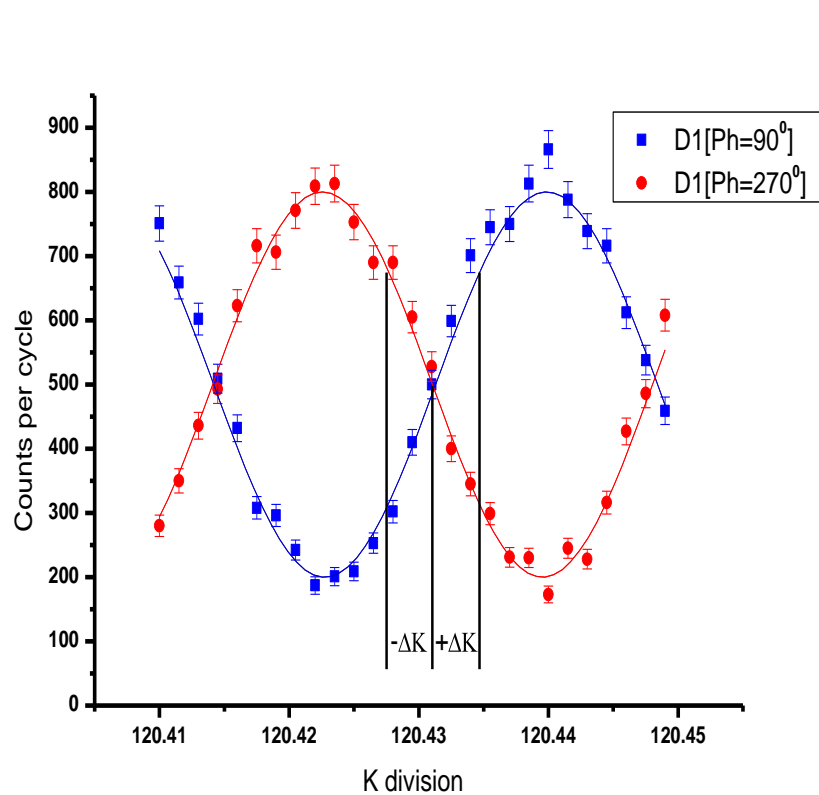
Резонансные кривые для времени хранения **нейтронов 100 с**

$$\alpha = \frac{N_{\max} - N_{\min}}{N_{\max} + N_{\min}}$$

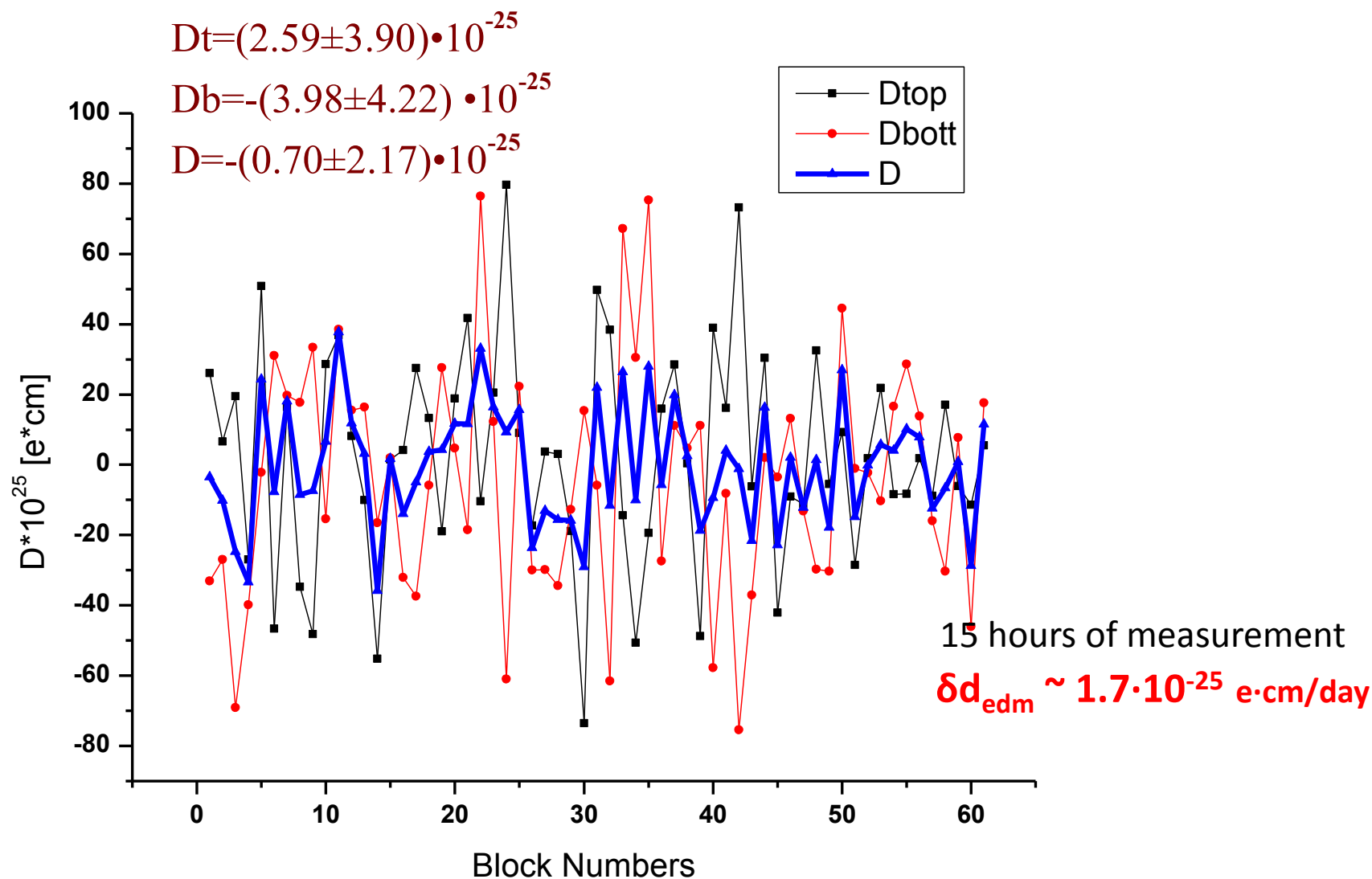
$$\alpha_1 = 0.71; \quad \alpha_2 = 0.70$$



Прямые измерения производной резонансной кривой в ходе набора данных в ЭДМ-эксперименте



Измерения чувствительности EDM спектрометра с плотностью УХН
 $\sim 4 \text{ н/см}^3$ (на входе) и электрическим полем 18 kV/cm при $T(\text{хр}) = 100 \text{ с}$



27-31 октября 2014г.

С-Петербург, РНСИ-КС

Схема измерений с контролем ложных эффектов

d_1 – верхняя камера

d_2 – нижняя камера

d_3 – верхняя камера

d_4 – нижняя камера

} direct detectors

} side detectors

$$EDM = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} d_1 + d_2 & + & d_3 + d_4 \end{bmatrix}$$

EDM – эффект от истинного EDM;

$$\nu = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} d_1 - d_2 & + & d_3 - d_4 \end{bmatrix}$$

ν – эффект влияния переключения полярности электрического поля на резонансные условия (магнитное поле или частота);

$$N^* = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} d_1 - d_2 & - & d_3 - d_4 \end{bmatrix}$$

N – эффект влияния переключения полярности электрического поля на счет детекторов;

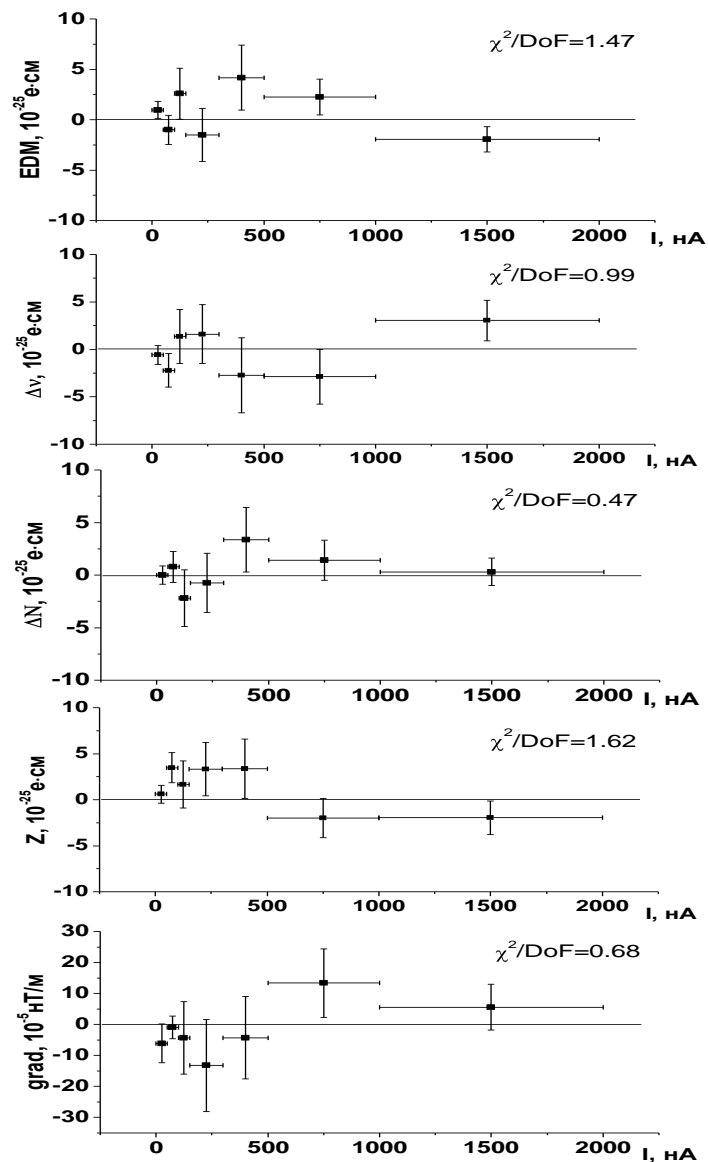
$$z = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} d_1 + d_2 & - & d_3 + d_4 \end{bmatrix}$$

z – компенсация всех эффектов, включая nEDM.

27-31 октября 2014г.

С-Петербург, РНСИ-КС

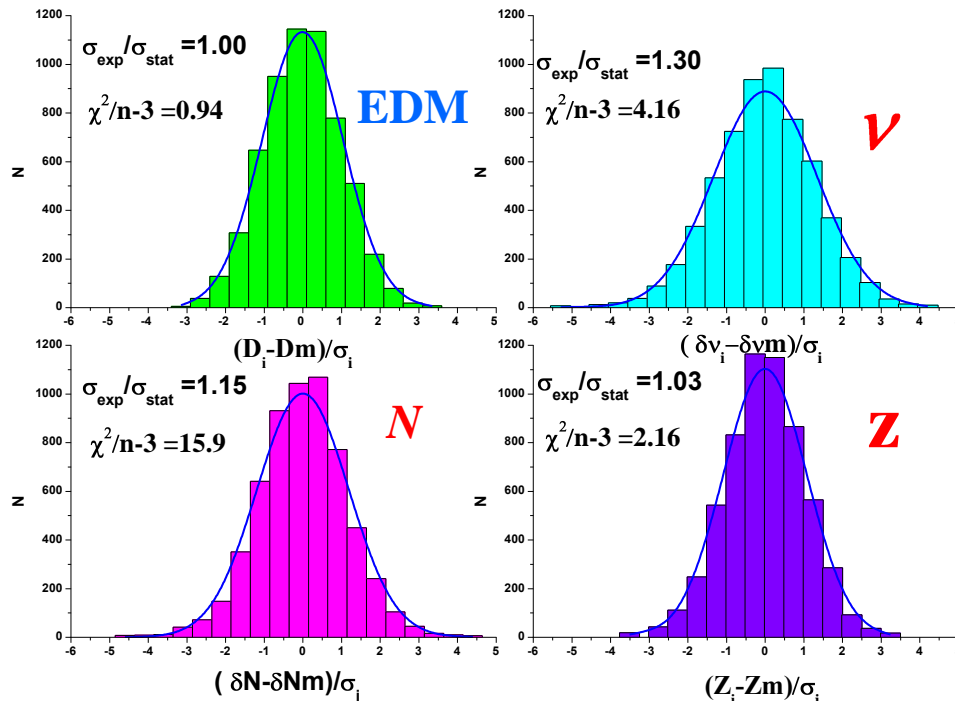
(*) Difference of measurements for 90° and 180°



Результаты измерений величин EDM, $\Delta\nu$, ΔN , и Z для различных интервалов тока утечки.

Результаты измерений в единицах 10^{-26} е·см

	Old	New	All
EDM	0.7 4.0	0.363 4.68	0.56 3.04
ν	-22.8 9.2	-10.04 5.98	-13.8 5.01
N	-14.5 4.4	18.62 5.15	-0.53 3.35
Z	-0.8 4.0	3.68 4.72	1.05 3.05



$$/nEDM/ \leq 5.5 \cdot 10^{-26} \text{ е·см}$$

90% CL

27-31 октября 2014г.

С-Петербург, РНСИ-КС

Чувствительность EDM спектрометра на позиции PF2 “EDM”

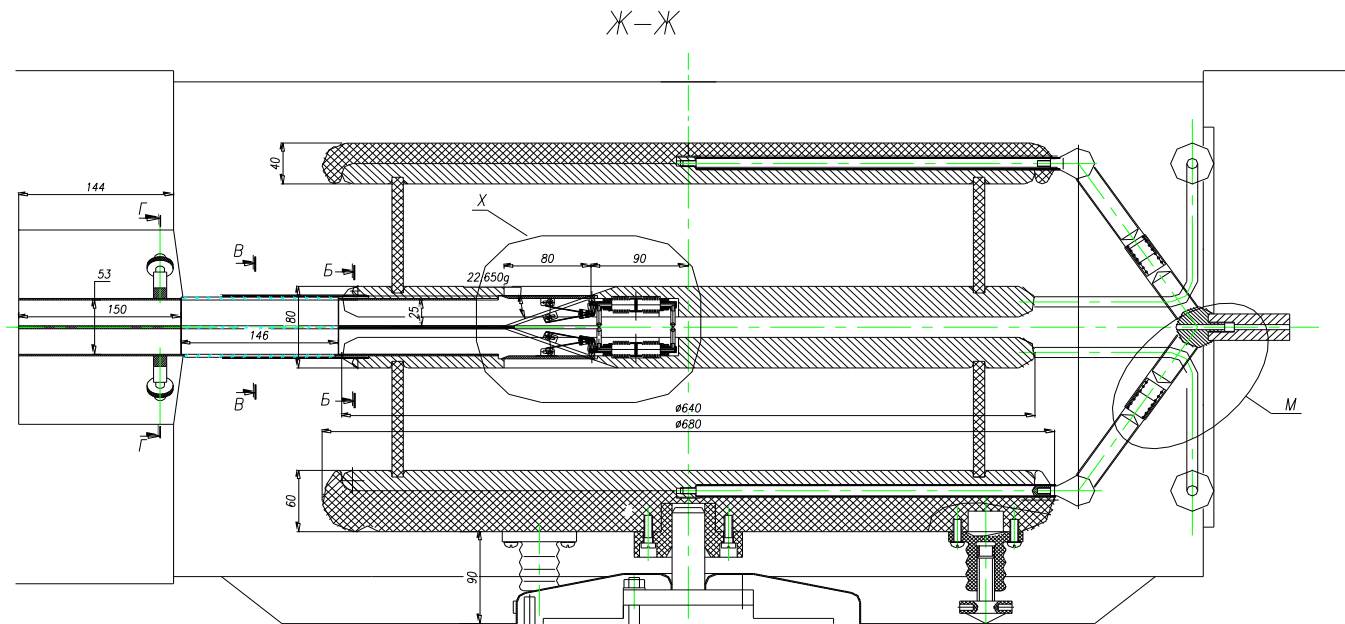
2015 г.

Наши планы: фактор увеличения плотности УХН на входе в спектрометр приблизительно 3 – 4 раза по сравнению с позицией “МММ” турбины УХН.

Дополнительно увеличение интенсивности УХН ожидается за счет применения новой схемы ввода и вывода нейтронов в камеры хранения спектрометра.

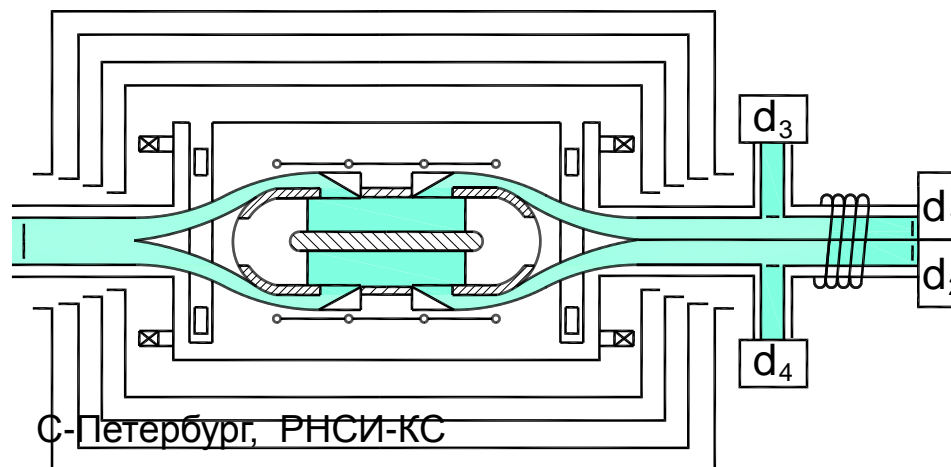
Ожидаемая nEDM-чувствительность :
 $(0.8 - 0.9) \cdot 10^{-26}$ e·cm/100 days

Новая схема ловушки УХН в ЭДМ спектрометре



Новая схема

Старая схема



27-31 октября 2014г.

С-Петербург, РНСи-КС

ЭДМ спектрометр и «Большая гравитационная ловушка» на пучках турбины УХН в ИЛЛ

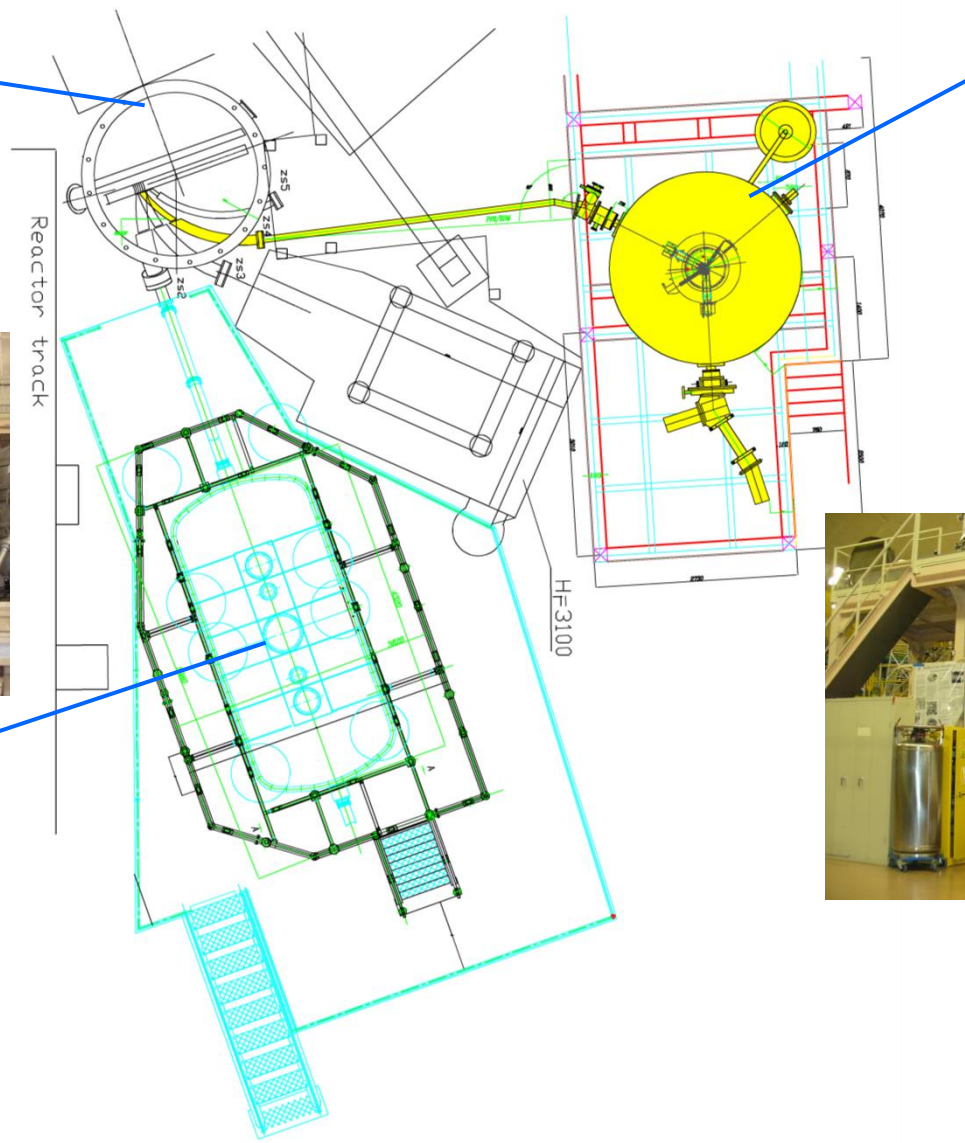
(планы на 2014-2015гг.)

turbine

EDM
spectrometer



installation
“Big gravitrap”



27-31 октября 2014г.

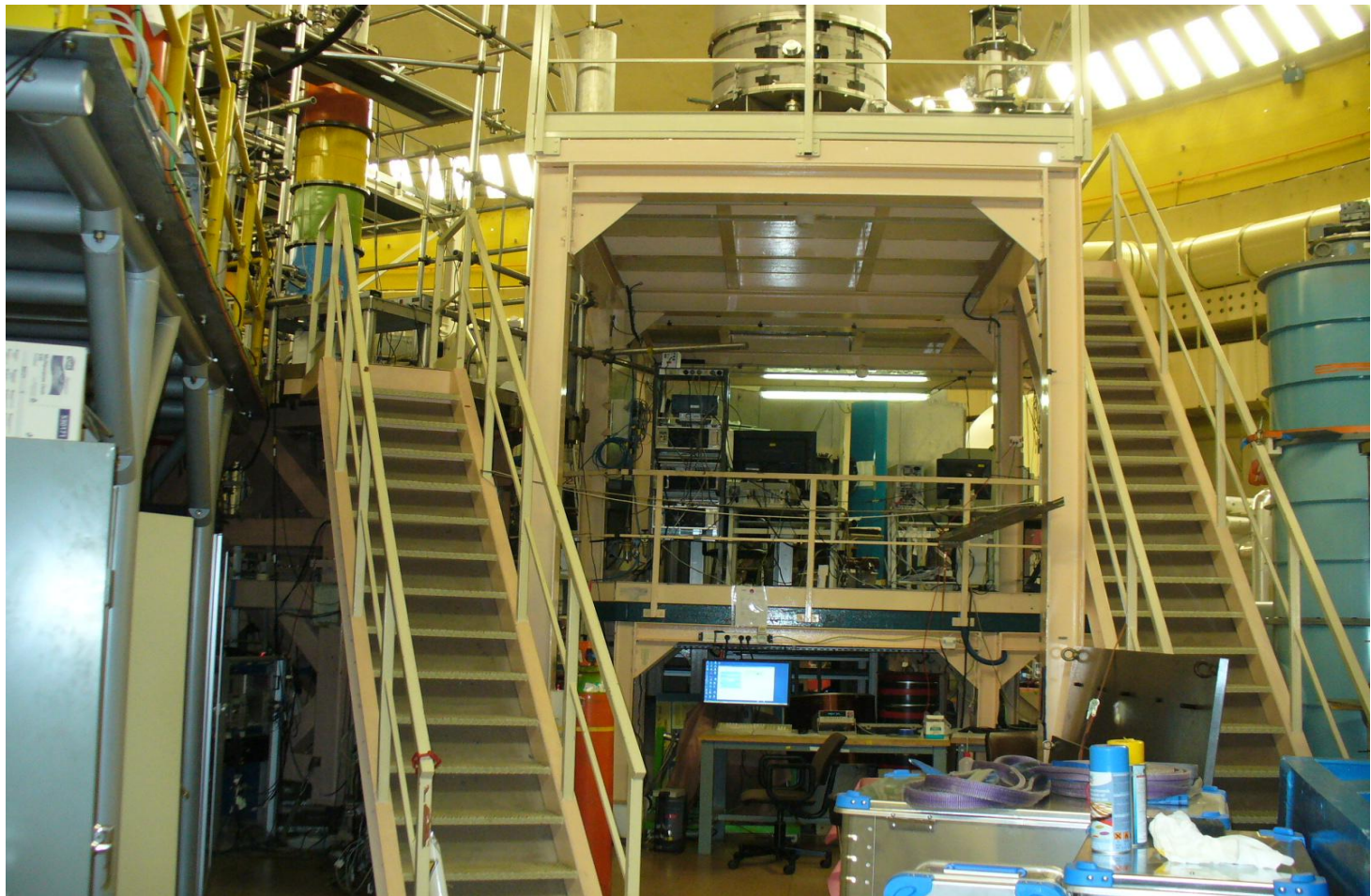
Позиция RF2 EDM



27-31 октября 2014г.

С-Петербург, РНСИ-КС

Позиция RF2 EDM

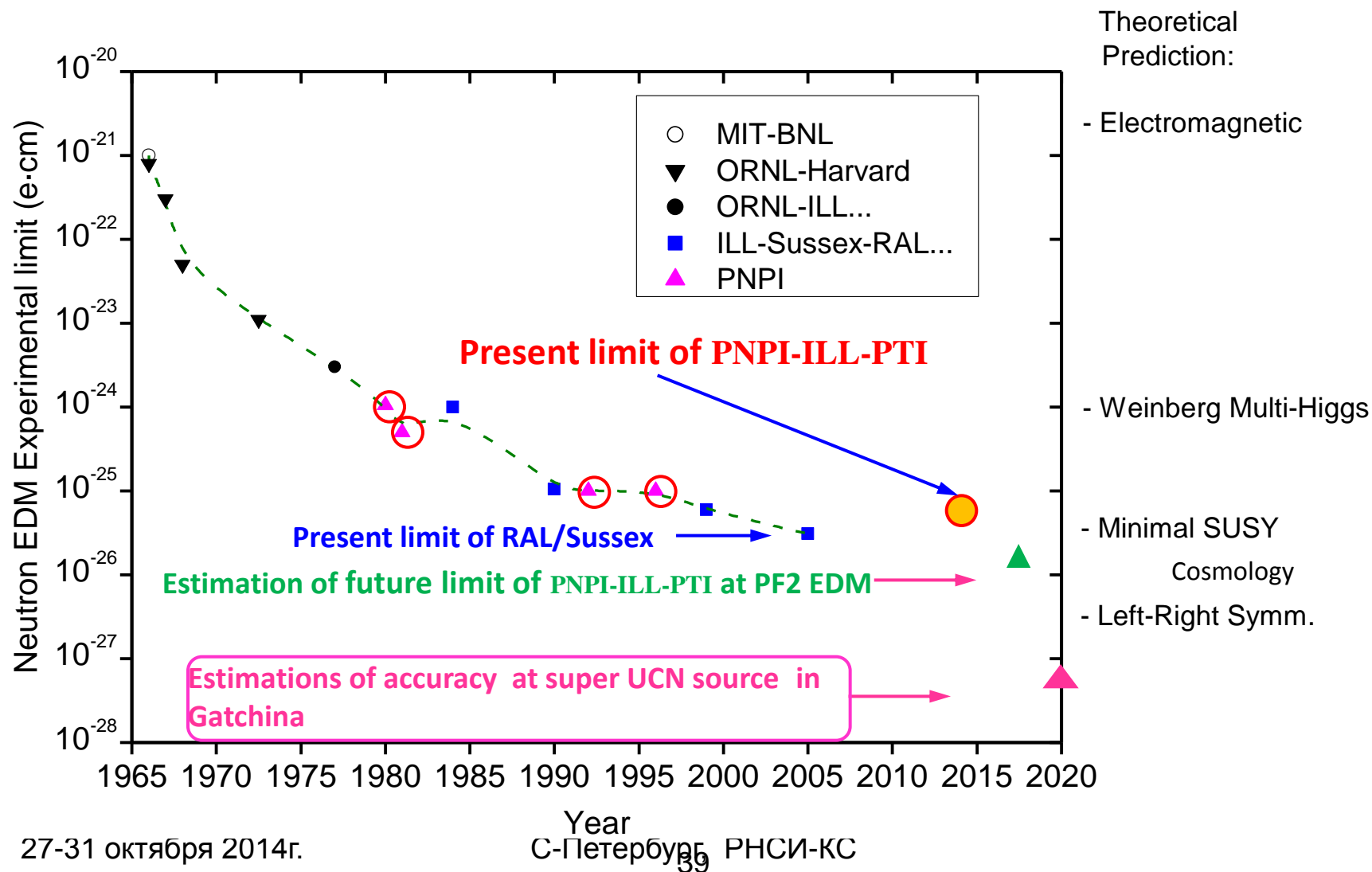


27-31 октября 2014г.

С-Петербург, РНСИ-КС

История поиска ЭДМ нейтрона.

Результаты и проекты ПИЯФ-ИЛЛ-ФТИ коллаборации



Перспективы увеличения плотности УХН и чувствительности ЭДМ-эксперимента

1. Новая позиция на PF2 (EDM). Фактор в плотности УХН $\sim (3 \div 4)$ раза по сравнению с позицией MAM.

$$\rho_{\text{uch}} \sim 20 \text{ ucn/cm}^3, \quad \delta D_{\text{edm}} \sim 1 \cdot 10^{-25} \text{ e} \cdot \text{cm/day}$$

$$\text{Upper limit} : \sim 1 \cdot 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$$

2. Новая позиция на H172B; новый источник УХН на сверхтекучем He в ИЛЛ. Фактор в плотности УХН ~ 10 раз по сравнению с позицией PF2 EDM.

$$\rho_{\text{uch}} \sim 200 \text{ ucn/cm}^3, \quad \delta D_{\text{edm}} \sim 3,5 \cdot 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm/day}$$

$$\text{Upper limit} : 4 \cdot 10^{-27} \text{ e} \cdot \text{cm}$$

3. Новый источник на сверхтекучем He в ПИЯФ (ВБР-М, проект А.П.Сереброва). Фактор в плотности УХН $\sim (20-30)$ раз по сравнению с позицией H172B ИЛЛ.

$$\rho_{\text{uch}} \sim (4-6) \cdot 10^3 \text{ ucn/cm}^3, \quad \delta D_{\text{edm}} \sim 0,7 \cdot 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm/day}$$

$$\text{Upper limit} : < 1 \cdot 10^{-27} \text{ e} \cdot \text{cm}$$

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ