

Поляризационные эксперименты на ВЭПП-3.

Дмитрий Топорков

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера, пр. Ак.
Лаврентьева 11, Новосибирск, 630090, Россия,
Новосибирский государственный университет,
Новосибирск, Россия*

**Вопросы поляризационной физики легких ядер –
Гатчина, 27-30 Июня 2022**



Содержание

- Введение – короткий обзор центров и экспериментов по электро/фото-ядерной физике
- Источник поляризованных атомов со сверхпроводящими магнитами
- Получение поляризации
- Блоки ВЧ переходов
- Поляриметр Лэмбовского сдвига
- Измерение эффективности работы ВЧ блоков
- Фоновые условия в поляриметре Лэмбовского сдвига
- Поляриметр для измерения поляризации мишени
- Результаты измерения, сравнение с Geant4
- Заключение

Электро/фото-ядерные установки на средние/большие энергии в мире

Действующие экспериментальные установки

Установка	E_{\max}	I_e	
① Jefferson Lab, США	11 ГэВ	200 мкА	поляризованные электроны, меченные тормозные фотоны
② MAMI, Германия	1.5 ГэВ	100 мкА	поляризованные электроны, меченные тормозные фотоны
③ ELSA, Германия	3.5 ГэВ		меченные поляризованные фотоны
④ LEPS, Япония	2.4 ГэВ		фотоны из ОКР
⑤ ELPH, Япония	1.3 ГэВ		тормозные меченные фотоны
⑦ Дейтрон@ВЭПП-3	2 ГэВ	100 мА	электроны, позитроны, меченные квази-реальные фотоны, внутренняя мишень

Нишевые эксперименты на Дейтроне

- Наш подход связан с использованием **внутренней мишени**. В настоящее время на электронных накопителях таких установок больше нет.
- В отличие от стандартной постановки с выведенным на внешнюю мишень пучком у нас пучок многократно пересекает мишень, значит для той же светимости мишень может быть на много порядков тоньше, или меньше частиц в пучке.
- Поэтому наша ниша – это эксперименты в которых:
 - используются экзотические мишени, например, с чистым, **тензорно-поляризованным** дейтроном
 - используются уникальные пучки - у нас это **позитронный** пучок
 - регистрируются медленные продукты реакции – протоны, дейтроны, α -частицы, легкие ядра

Эксперименты с тензорно-поляризованной дейтериевой мишенью

ABS + storage cell

- Измерение T_{20} в фотодезинтеграции дейтрона $\gamma + d \rightarrow p + n$ для энергии фотона $E_\gamma = 600 - 1500$ МэВ
- Измерение T_{20} в фоторождении дибарионных резонансов в реакции $\gamma + d \rightarrow d^* \rightarrow d + \pi^0 + \pi^0$

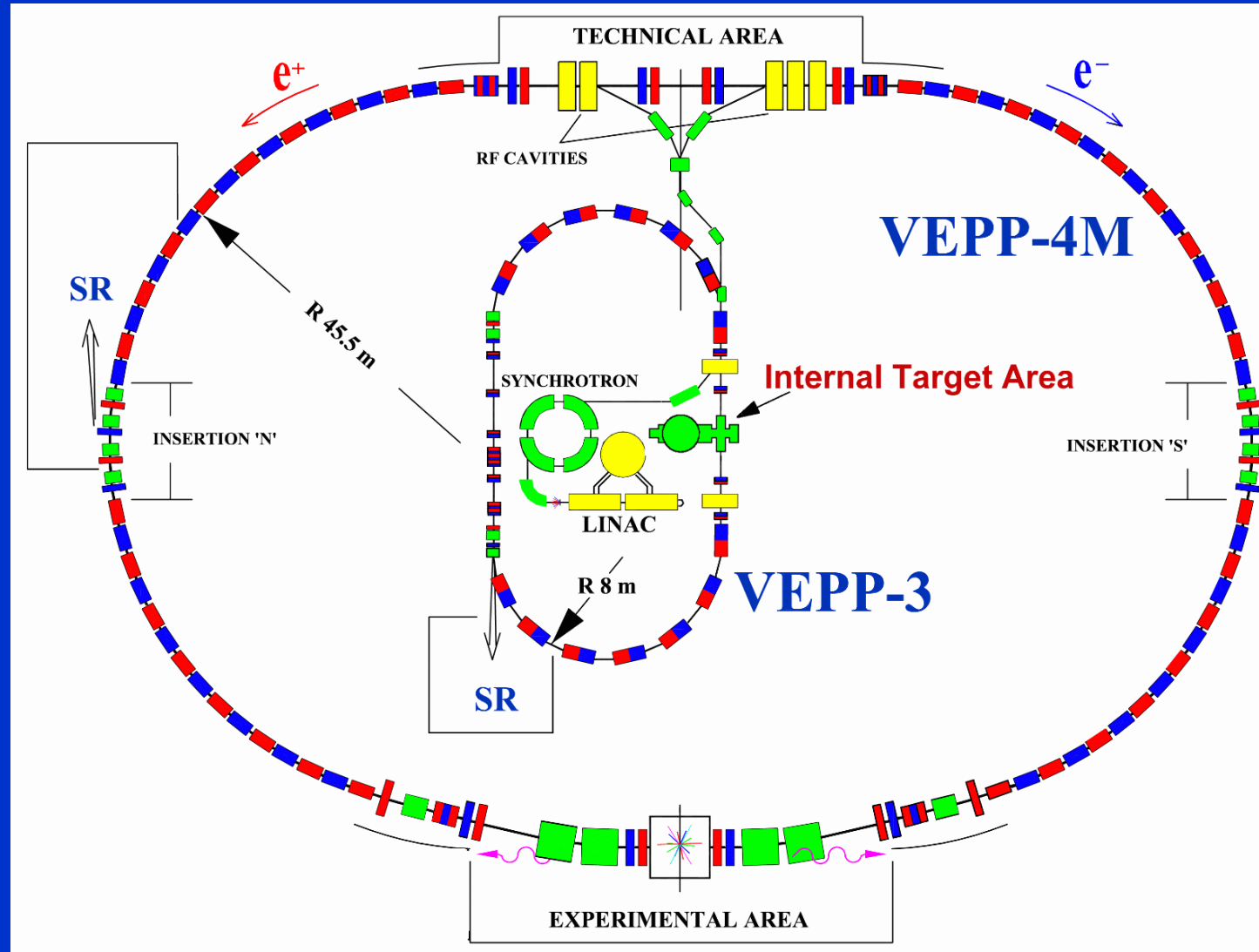
струи из ABS

- Абсолютное измерение T_{20} в упругом рассеянии $e + d \rightarrow e + d$ при малом переданном импульсе

Зарядовая асимметрия в упругом рассеянии

- Измерение вклада боксовых диаграмм в упругое рассеяние электрона/позитрона на легких ядрах – дейтроне, гелии ...
- Точное измерение радиуса протона методом e^+p/e^-p рассеяния
- Специальный случай: измерение двух-фотонного вклада в упругое рассеяние на азоте ^{14}N – тест EWRC.

Новосибирский электрон-позитронный комплекс

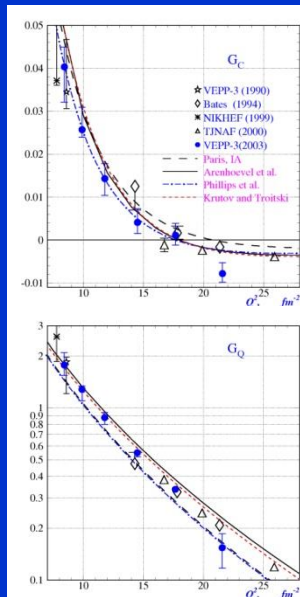
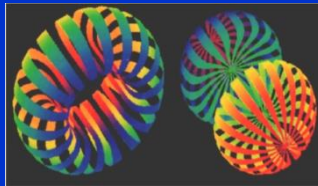


VEPP-3

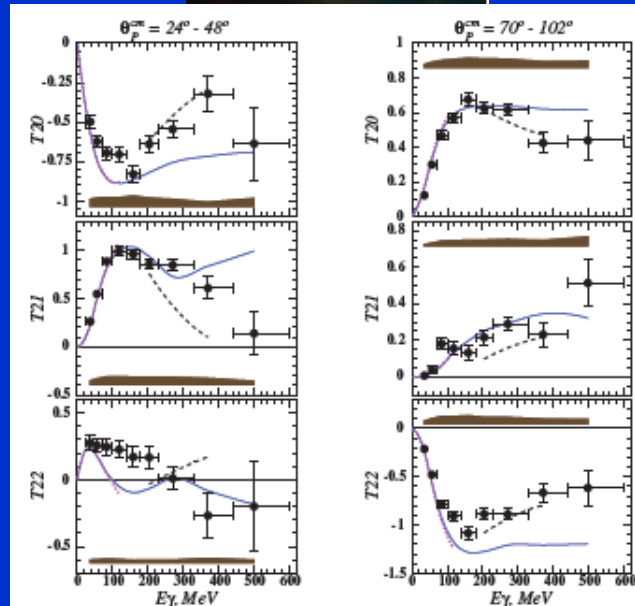
Energy : 2000 MeV
Lifetime : 20000 s
Av. current : 100 mA
Bunch : 0.7x0.3 mm

- В ИЯФ экспериментальное изучение **Электро- и Фото- ядерных** процессов базируется на использовании **Метода Сверхтонкой Внутренней Мишени** в накопителе.
- Метод предложен, развит в ИЯФ.
- Позволяет проводить уникальные эксперименты с **экзотическими мишенями** и/или с **уникальными пучками**

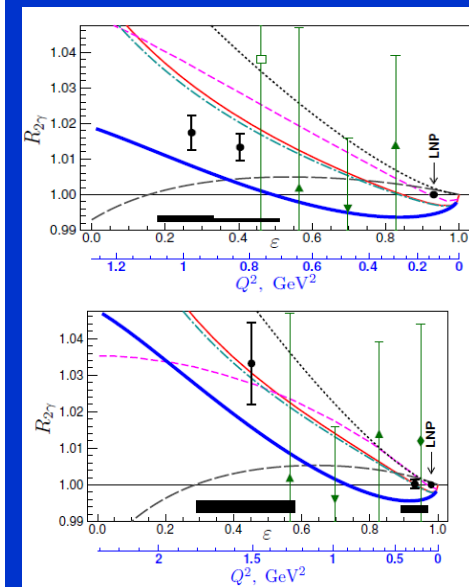
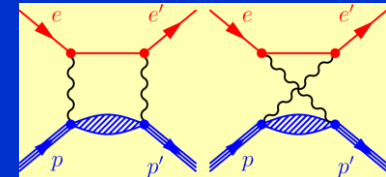
упругие форм факторы



фотодезинтеграция



вклад 2γ в упругое ер рассеяние



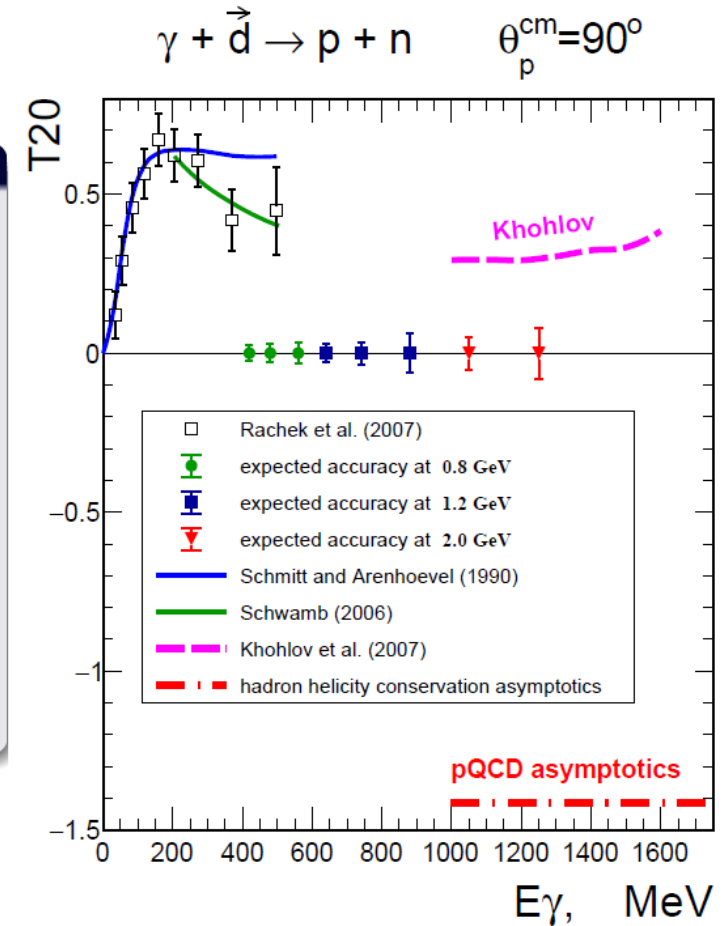
T₂₀ в фотодезинтеграции дейтрона $\gamma + d \rightarrow p + n$

- ... T₂₀ измерена нами до $E_\gamma \approx 500$ МэВ: *Phys.Rev.Lett.* **98** (2007) 182303
- диапазон по энергии фотона $400 \div 1600$ МэВ можно перекрыть в три захода:

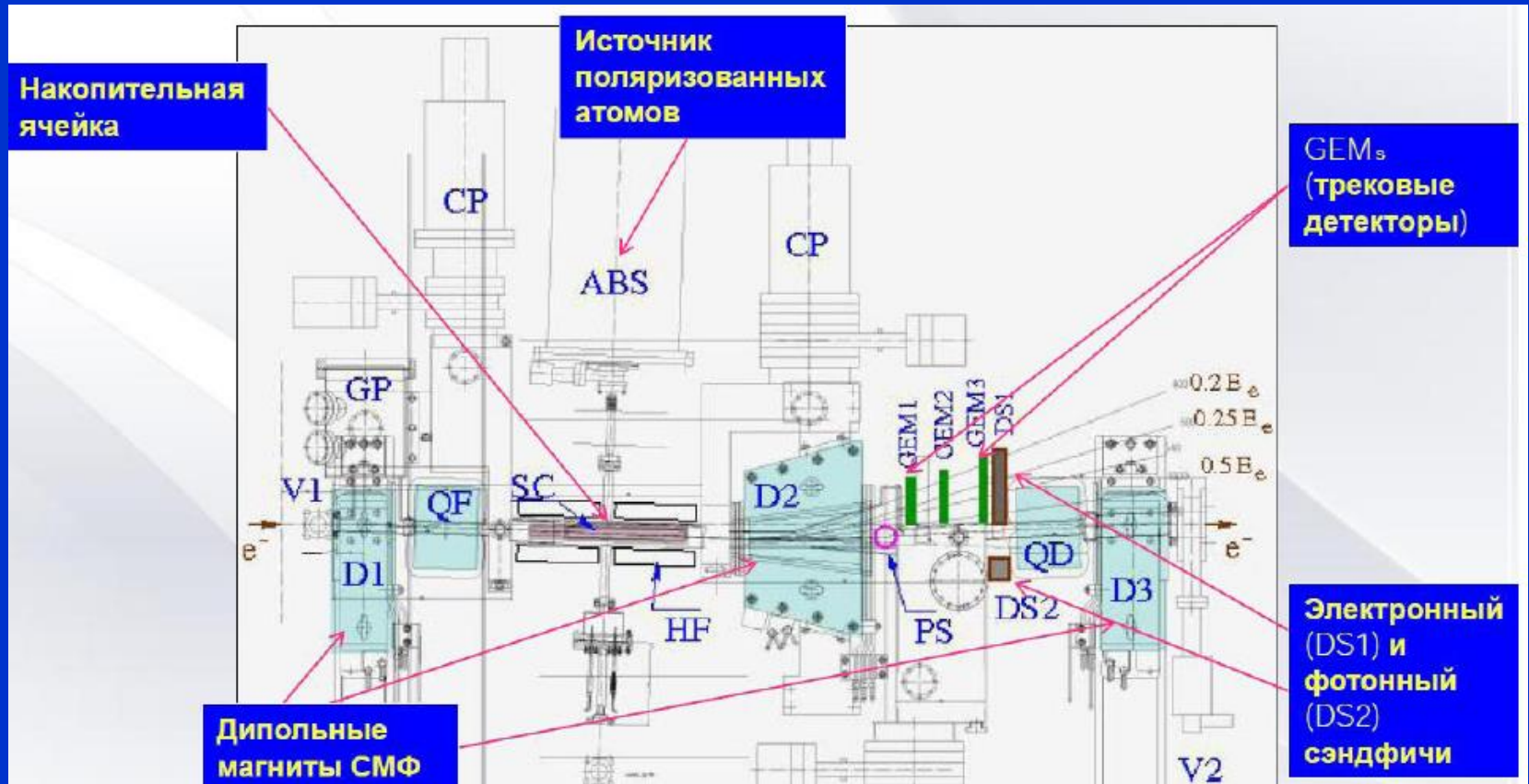
три этапа

Этап:	1	2	3
энергия пучка [МэВ]	800	1250	2000
E_γ [МэВ]	400 ÷ 650	620 ÷ 1000	1000 ÷ 1600
$\frac{d\sigma_{\gamma d}}{d\Omega}(90^\circ)$, [nb/sr]	2030 ÷ 405	450 ÷ 44	44 ÷ 3.2
интеграл [pb ⁻¹]	28	63	120
эффективность по n [%]	35 ÷ 42	46 ÷ 60	63 ÷ 72
эффективность по p [%]	80	70	80
неотделимый фон [%]	1 ÷ 4	5 ÷ 15	8 ÷ 10
время набора	4 недели	2 месяца	4 месяца

Заход 2021 года: набрано 17 pb^{-1} за 6 недель после 2-недельного запуска.



Экспериментальный промежуток на ВЭПП-3

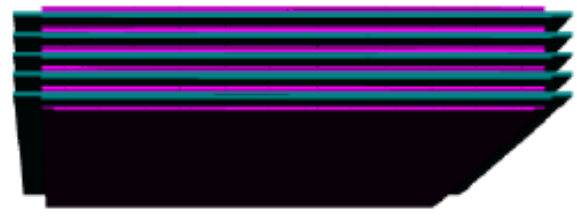


Магнит D2 и трековые детекторы образуют магнитный спектрометр электронов, потерявших энергию на излучение фотона.

Реконструируя энергию и угол рассеянного электрона можно определять энергию и плоскость поляризации фотона, вызвавшего ядерную реакцию.

Детектор «Дейтрон»

адронный сэндвич



протонные
сцинтилляторы



дейтронные
сцинтилляторы
и вето заряженных



дрейфовые камеры



мишень



электронные
сцинтилляторы

электронные
сцинтилляторы

дрейфовые камеры



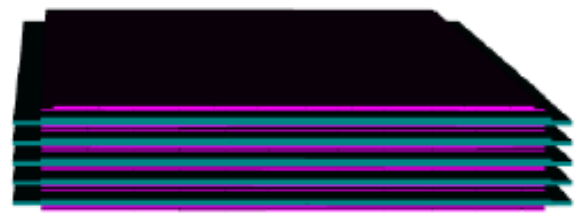
дейтронные
сцинтилляторы
и вето заряженных



протонные
сцинтилляторы



адронный сэндвич



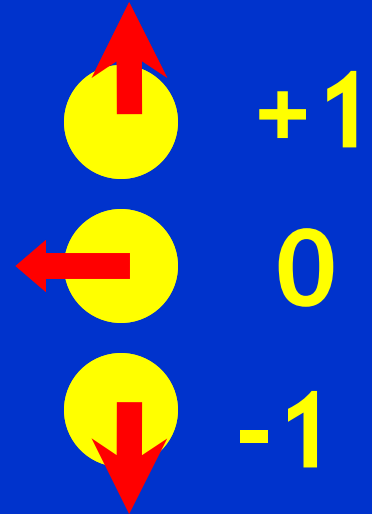
пучок e-



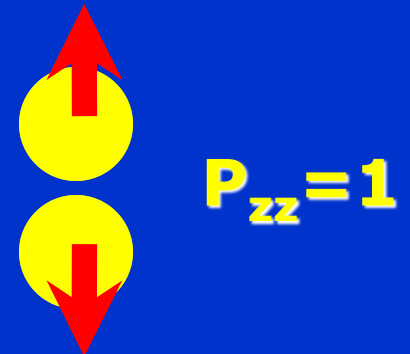
Поляризация ансамбля частиц со спином 1

$$P_z = \frac{N_{\uparrow} - N_{\downarrow}}{N_{\uparrow} + N_0 + N_{\downarrow}} = n_{\uparrow} - n_{\downarrow}$$

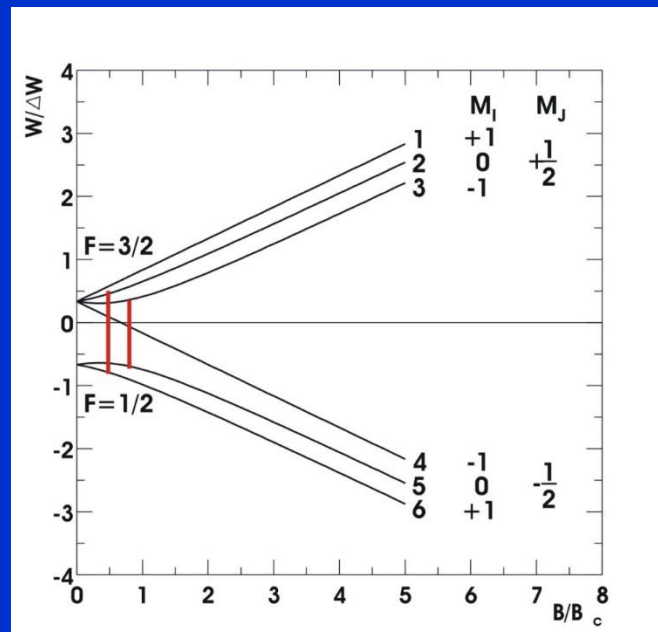
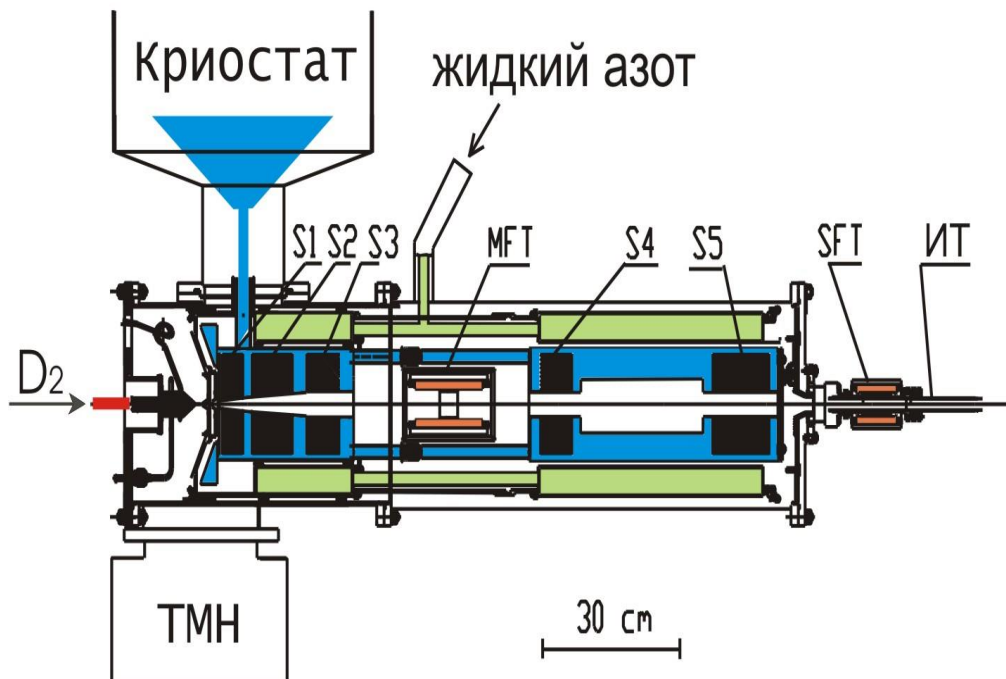
$$P_{zz} = \frac{N_{\uparrow} + N_{\downarrow} - 2N_0}{N_{\uparrow} + N_0 + N_{\downarrow}} = 1 - 3n_0$$



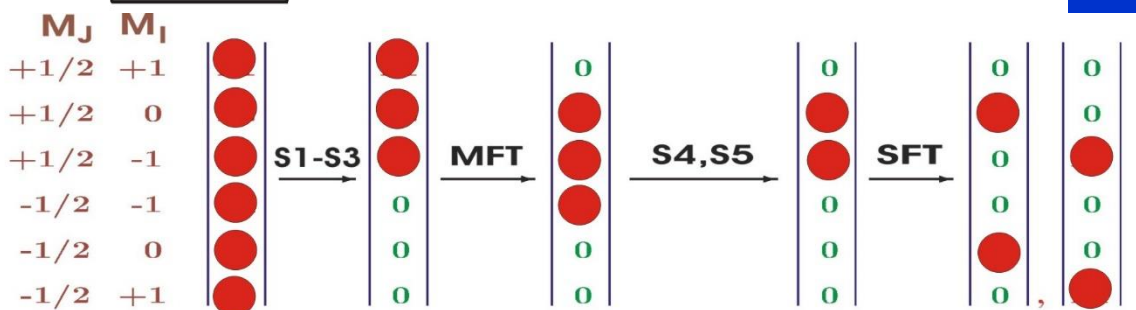
Поляризационные эксперименты позволяют уточнить детали картины нуклон-нуклонного и нуклон-мезонного взаимодействий, вклады релятивистских поправок и другие вопросы квантовой теории.



Источник поляризованных атомов со сверхпроводящими магнитами



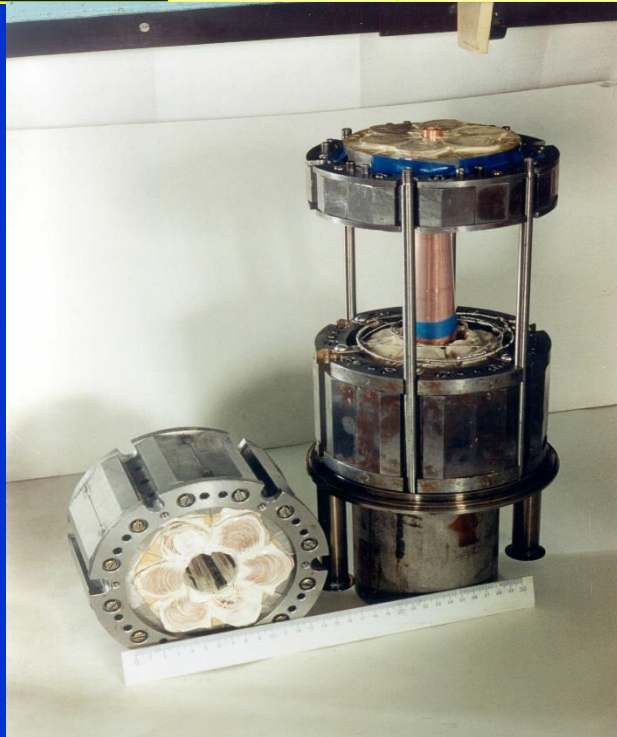
Энергетические уровни
основного состояния
атома дейтерия в
магнитном поле



Тензорная поляризация $P_{zz}=1-3n_0 = -2, +1$.
Векторная поляризация $P_z=n_+-n_- = 0$.

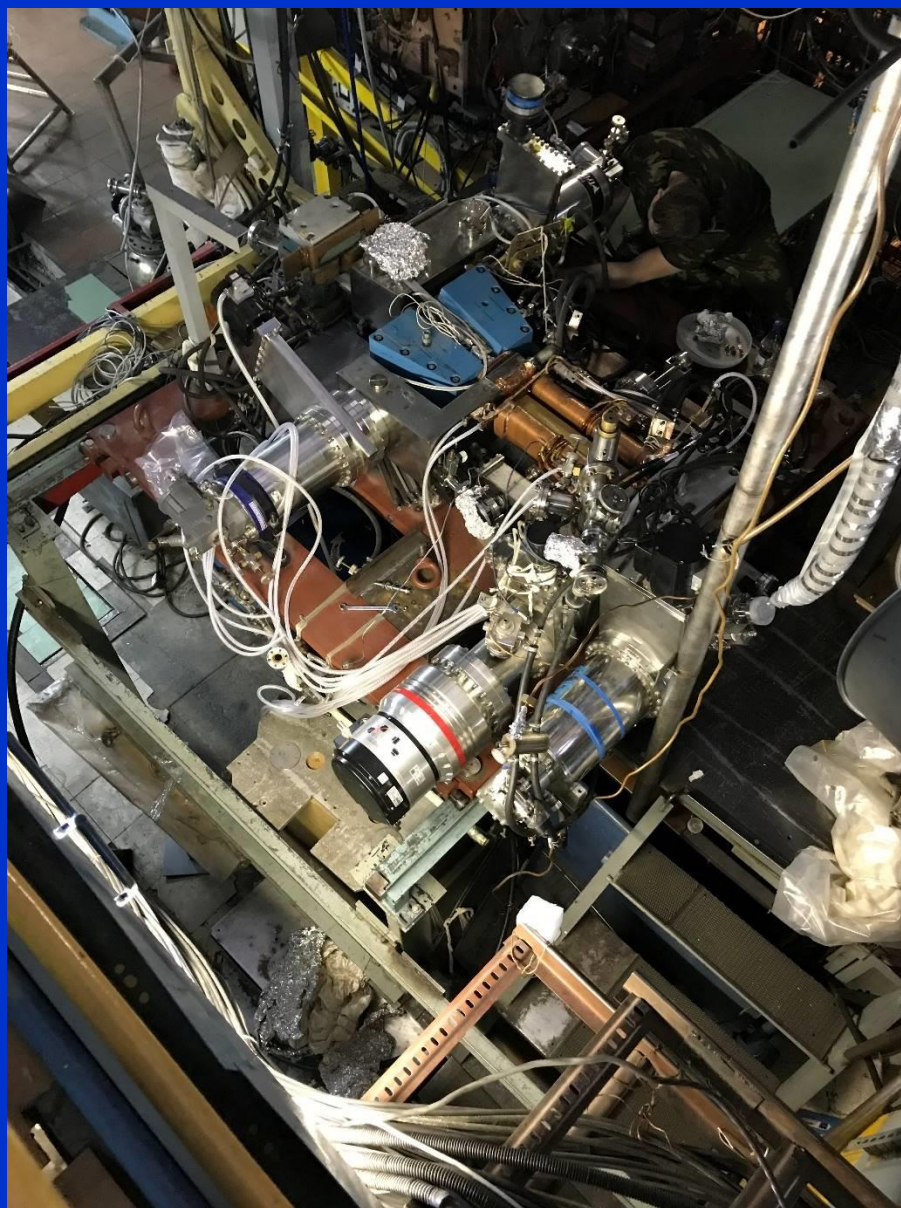
Сверхпроводящие магниты

Current, Am	Magnetic field, kGs 1-st magnet	Magnetic field, kGs 2-nd magnet	Magnetic field, kGs other magnets
10	3.25 – 3.75	4.1 – 4.5	2.2
20	6.5 – 7.5	8.1 – 9.0	4.5
30	9.2 – 10.8	10.8 – 12.0	7.0
50	12.0 – 14.0	15.3 – 17.0	11.0
100	15.6 – 18.4	20.7 – 23.0	16.0
150	19.3 – 22.7	24.3 – 27.0	20.0
200	23.0 – 27.0	30.0 – 34.0	24.0
220	-	-	25.5
250	-	-	28.0
300	-	-	31.0
350	-	-	35.0

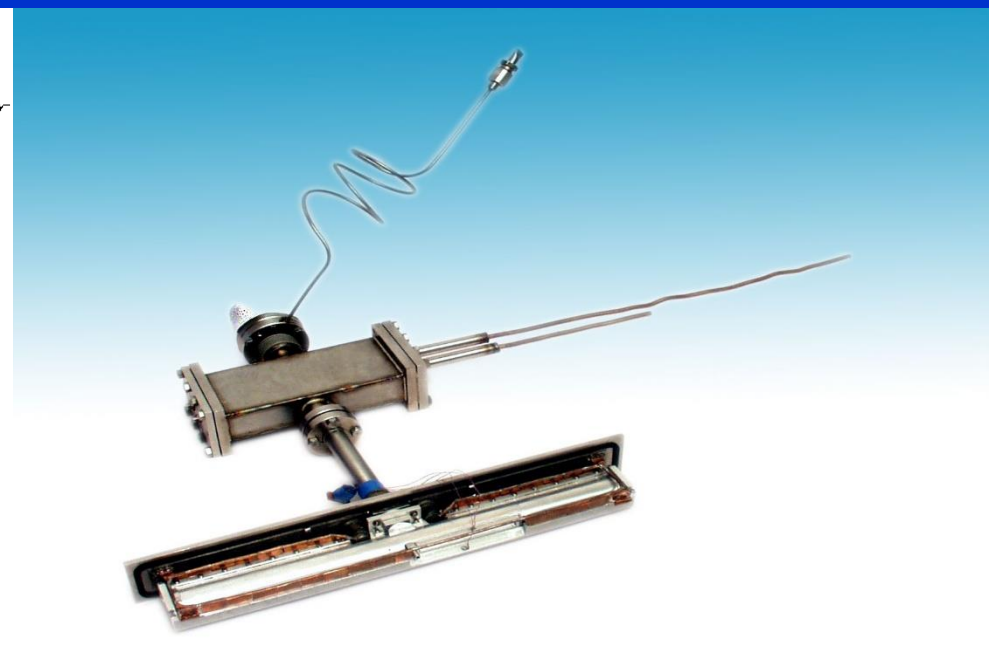
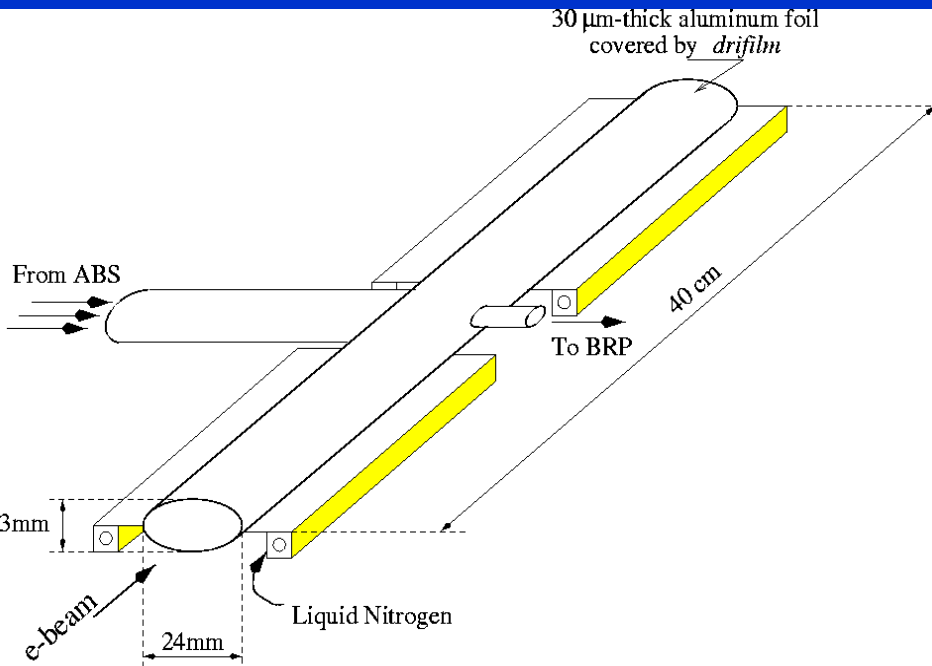


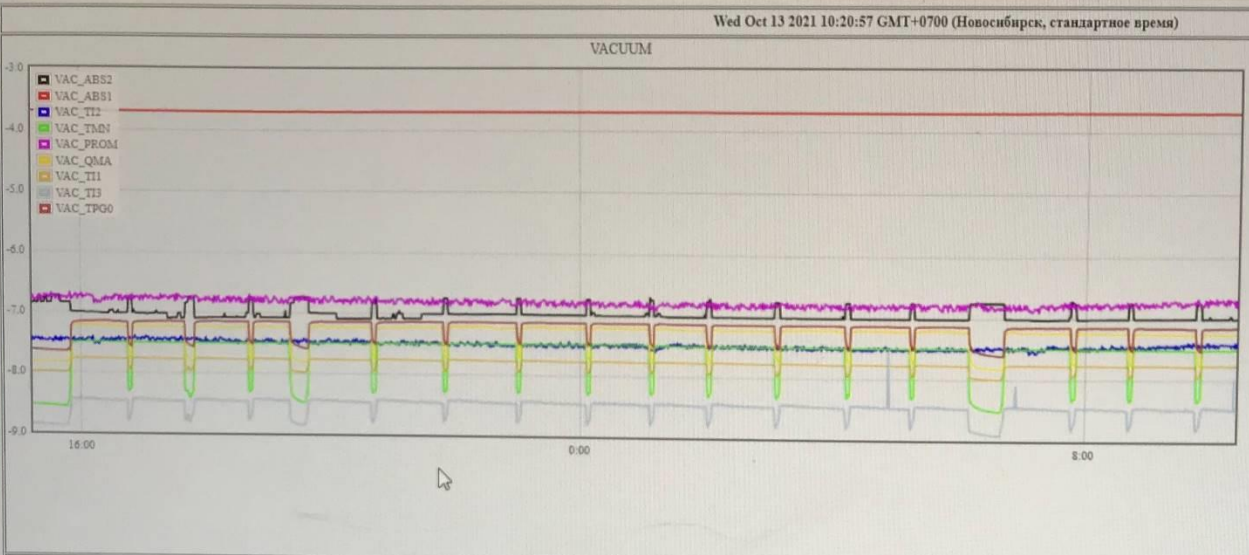
ИПА подготовлен к соединению с накопительной ячейкой и промежутком





Накопительная ячейка для поляризованных атомов





VAC_TI1	1.7000e-08
VAC_TI2	3.6779e-08
VAC_TMN	3.1127e-08
VAC_TI3	3.4005e-09
VAC_PROM	1.9181e-07
VAC_QMA	5.6604e-08
VAC_ABS1	2.0066e-04
VAC_ABS2	9.8423e-08
VAC_TPG0	6.9900E-08
VAC_TPG1	0.0000E+00
VLV_V1	3
VLV_V2	3
VLV_V3	3
VLV_V4	3
VLV_V8	3
VLV_V5	3
VLV_V6	3

TCELL 193.254

SOL 332.032



LOCKIN 1.753

TNOZ	-175.230
OTH	4.791
Uwqz	1.009
HF1	0.098
HG1	2.175
HF2	1.798
HG2	1.007
XP1	176.823
XP2	314.088
SNA	0.853

Liquids

Helium

79

Nitrogen

nozzle cryostat magnets cell

13th October 2021 10:20:48



Блок ВЧ переходов в промежуточном поле

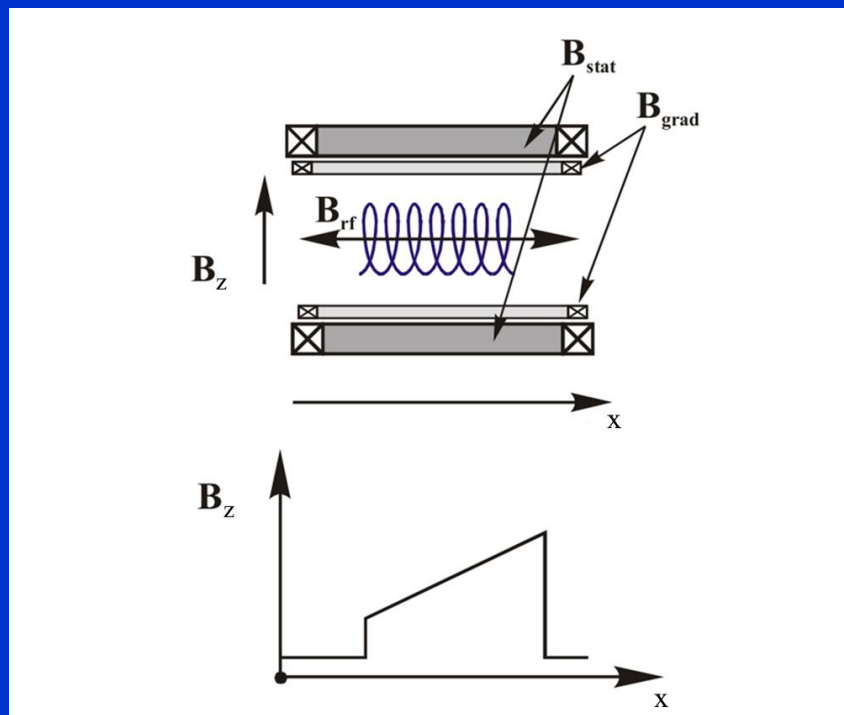
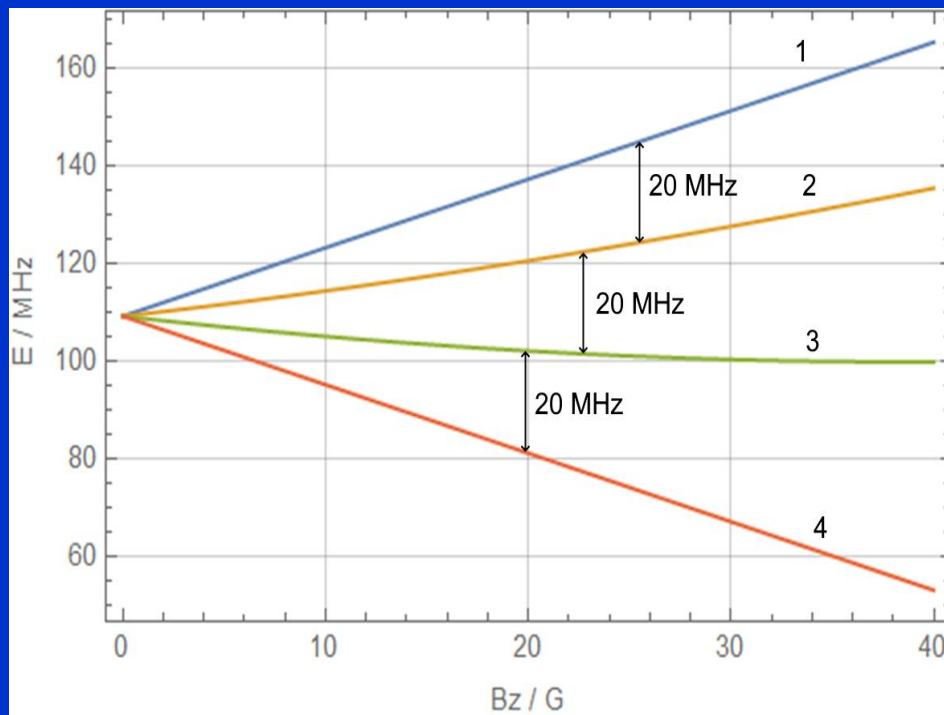
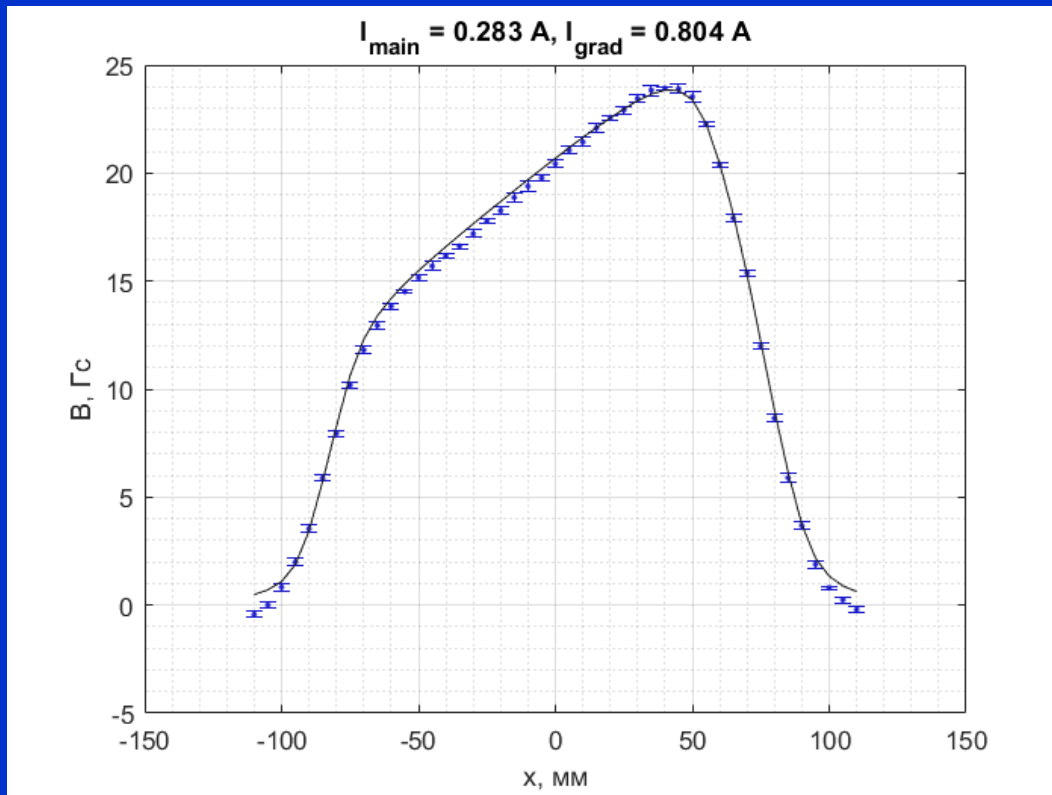


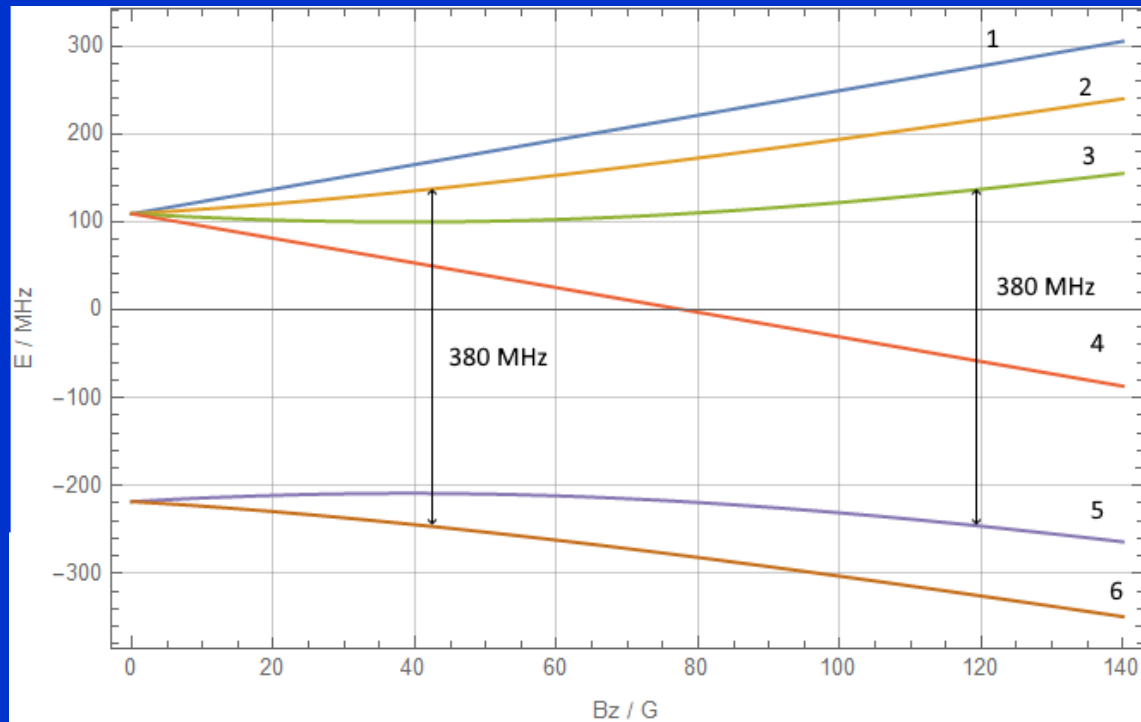
Схема блока МФТ.



Энергетические уровни атома дейтерия для первых четырех уровней в рабочей области МФТ.



Магнитное поле в блоке MFT при наличии токов в обеих обмотках



Энергетические уровни основного состояния атома дейтерия в рабочей области SFT.

Поляриметр Лэмбовского сдвига

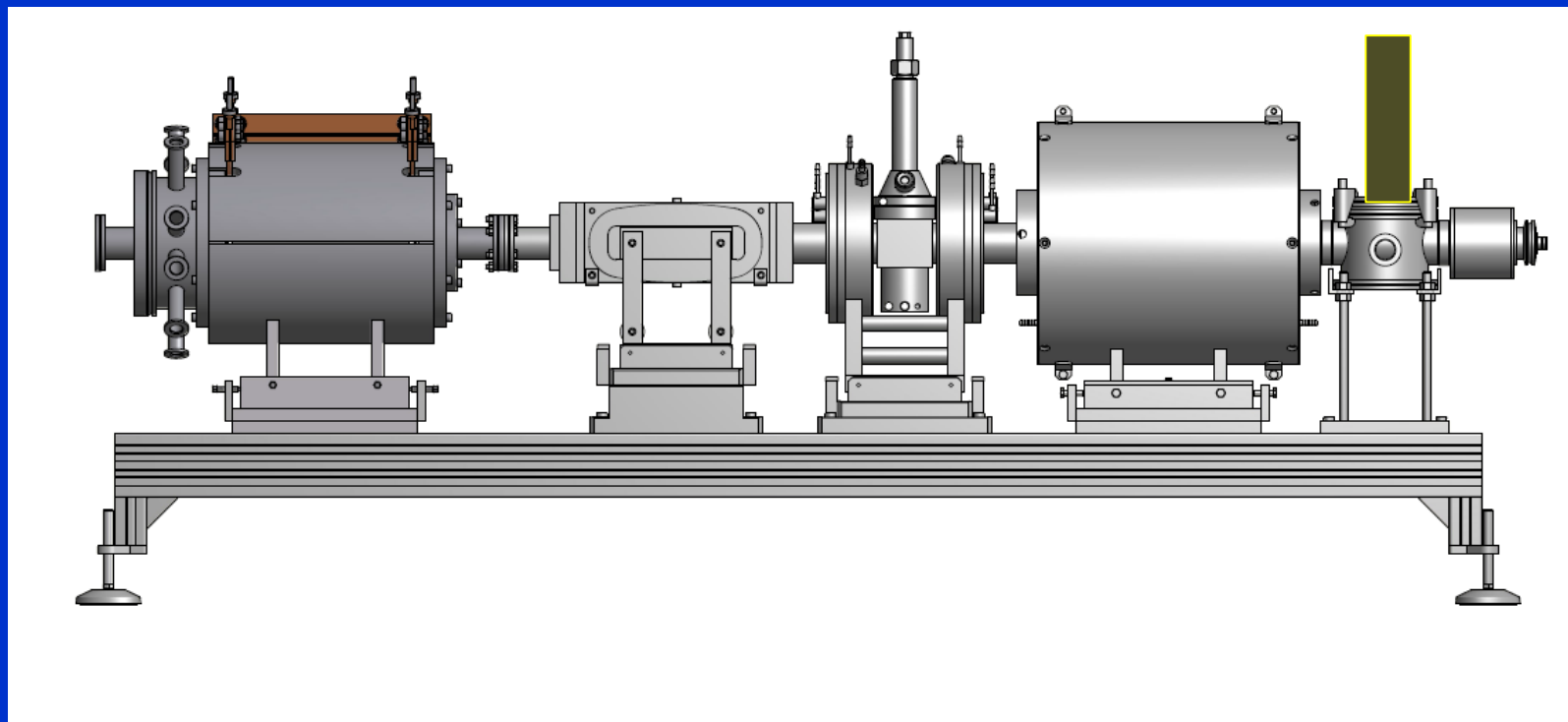
Ионизатор

фильтр Вина

Cs ячейка

спин фильтр

камера гашения



D^0

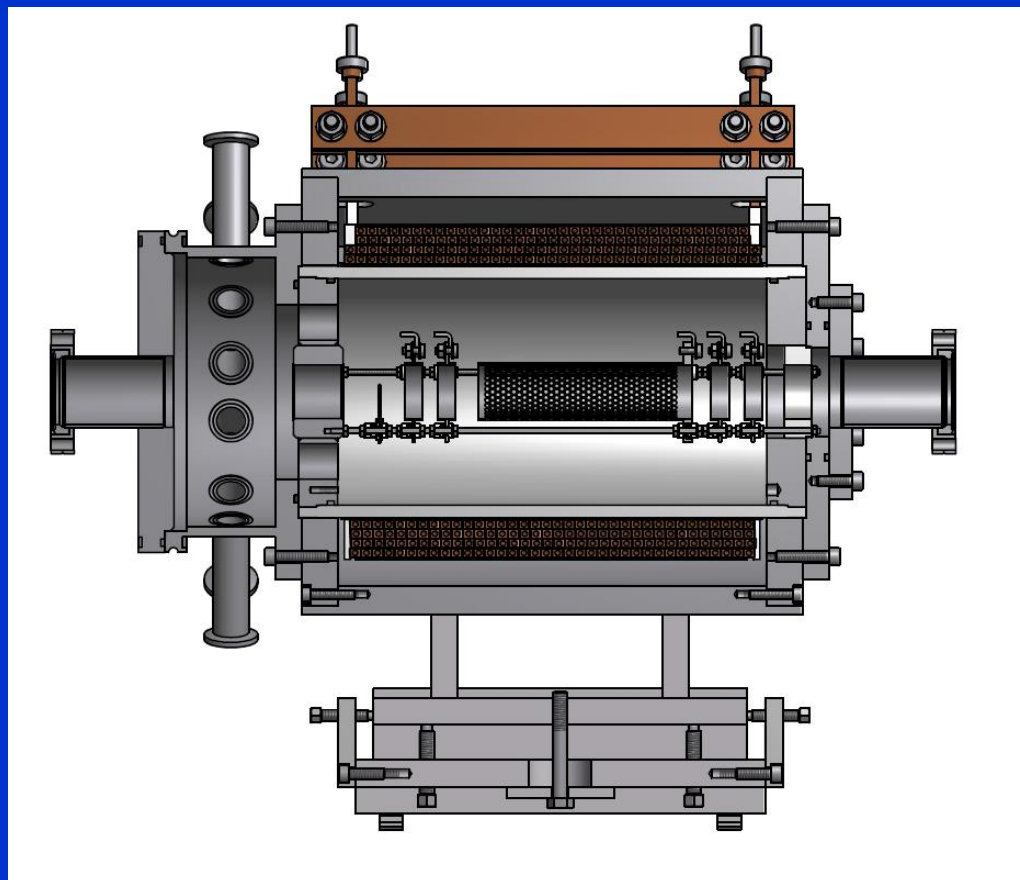
D^+

$D(2S)$

$D(2S_{,\alpha 1})$

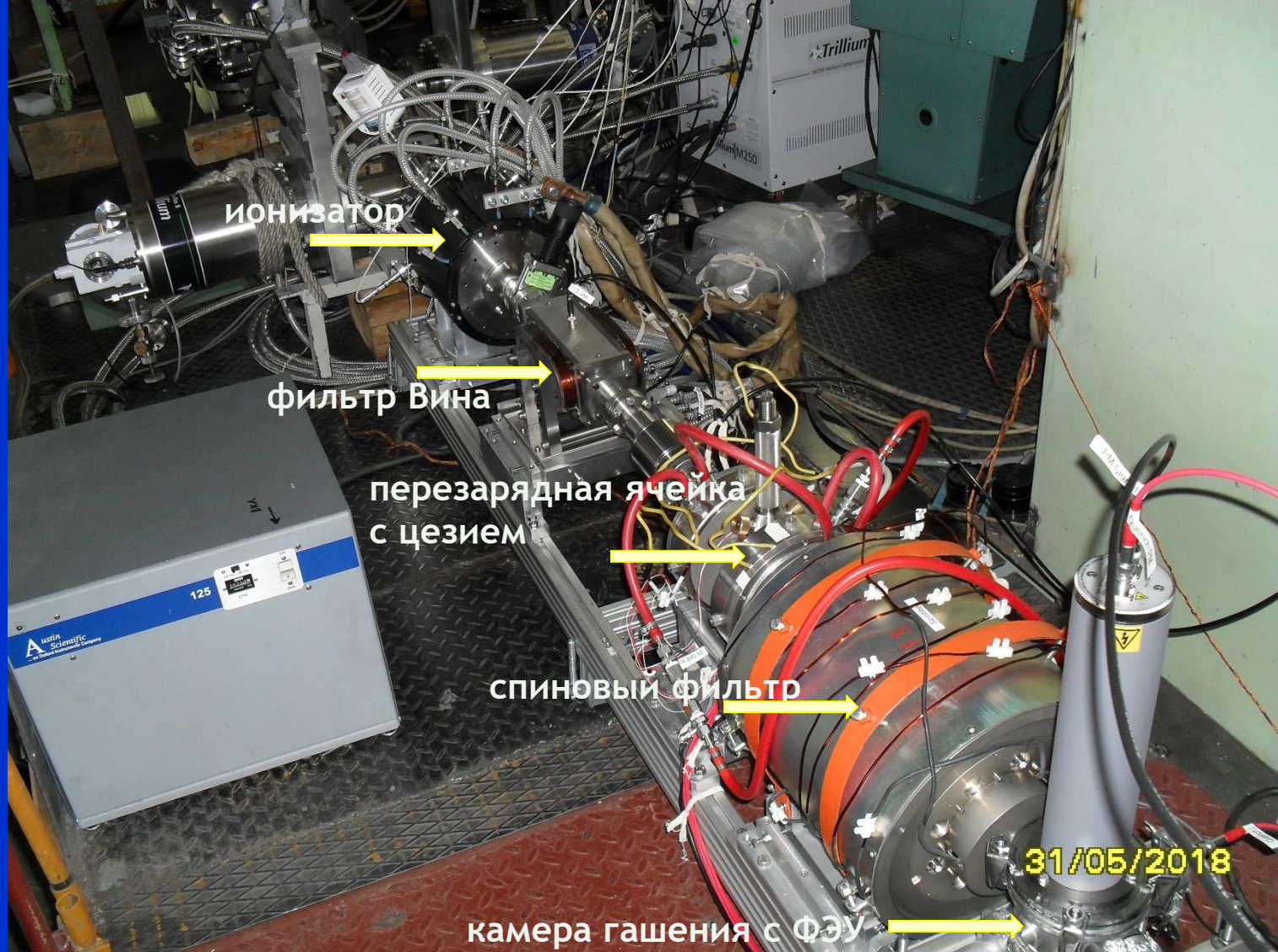
Lyman α

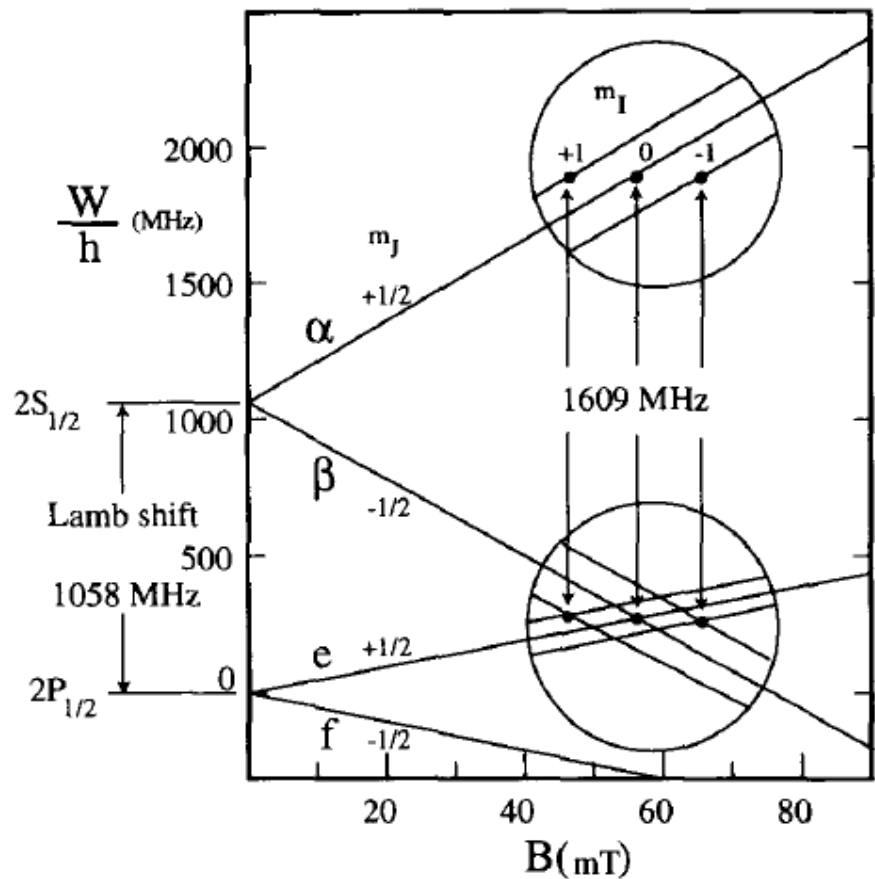
Ионизатор атомов



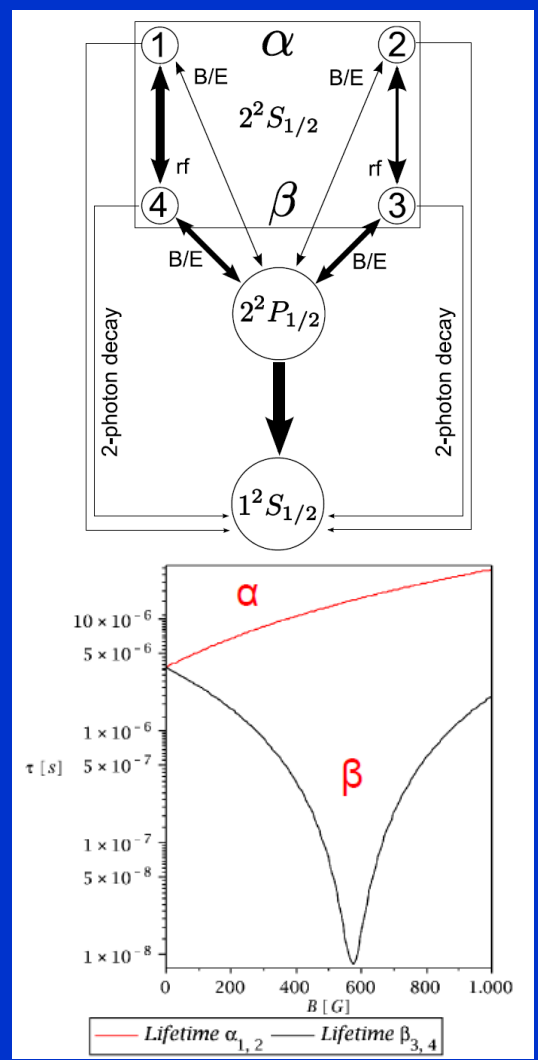
Нераспыляемый геттер St'707 фирмы SAES Getters.



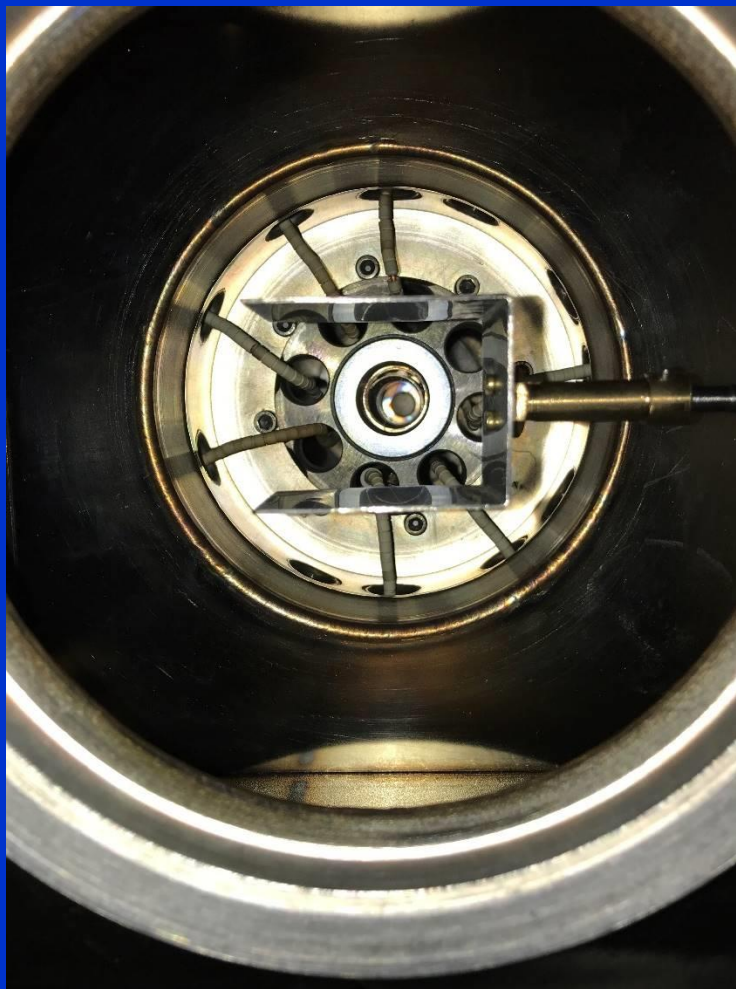




Энергетические уровни $2S_{1/2}$ и $2P_{1/2}$ состояний атома дейтерия в магнитном поле

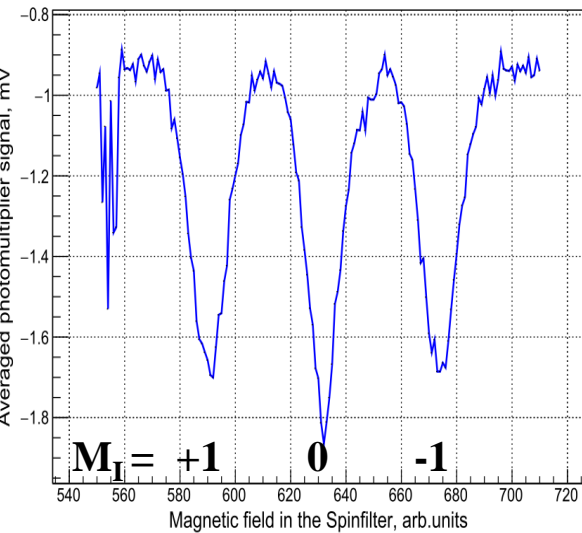


Фотография входа атомного пучка в ионизатор.
Видна вращающаяся заслонка.

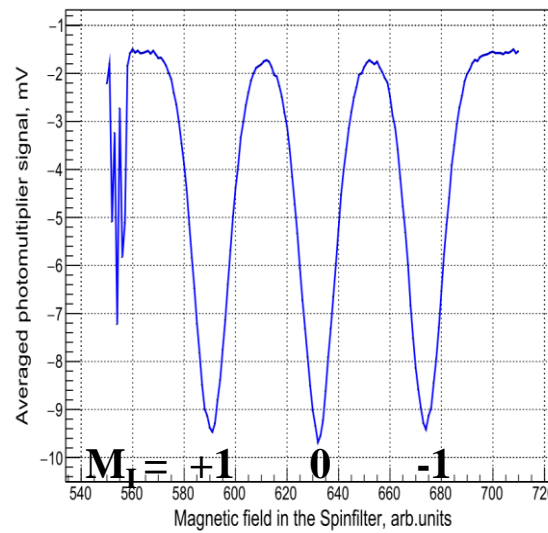


Сигнал атомного пучка с ФЭУ при открытой и закрытой заслонке, при выключенном и включенном блоке ВЧ переходов MFT.

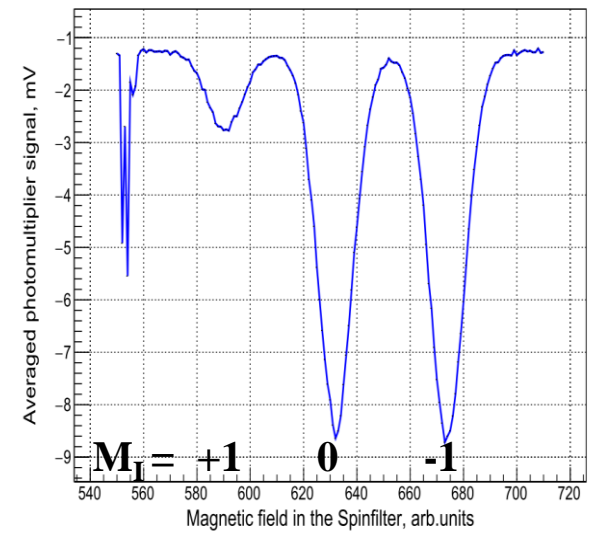
2021-06-10 18:10:13



2021-06-10 17:34:43



2021-06-10 17:54:51



Блок ВЧ переходов MFT
выключен, заслонка закрыта

Блок ВЧ переходов MFT
выключен, заслонка открыта

Блок ВЧ переходов MFT
включен, заслонка открыта

$\Sigma_{\text{пиков}}$ 3.75

24.04

16.56

Фон определен по заслонке

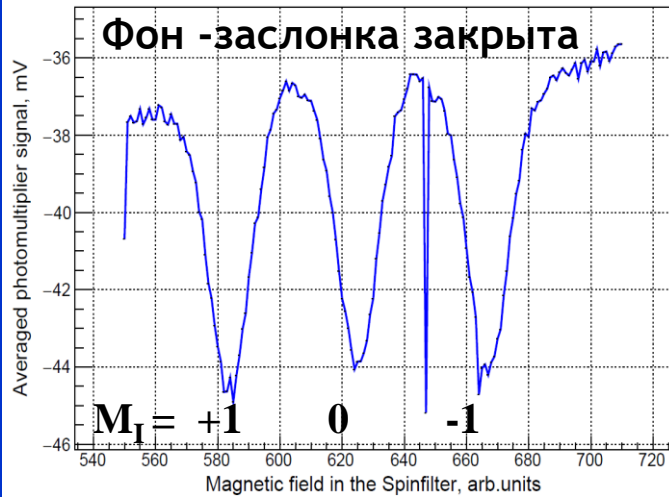
$$E_{14} = (A_1 - A_2) / A_1 = (6.47 - .67) / 6.47 = 0.90 \pm 0.02$$

Фон определен из уменьшения
пиков на 0.55 мВ при
уменьшении потока на 1/3

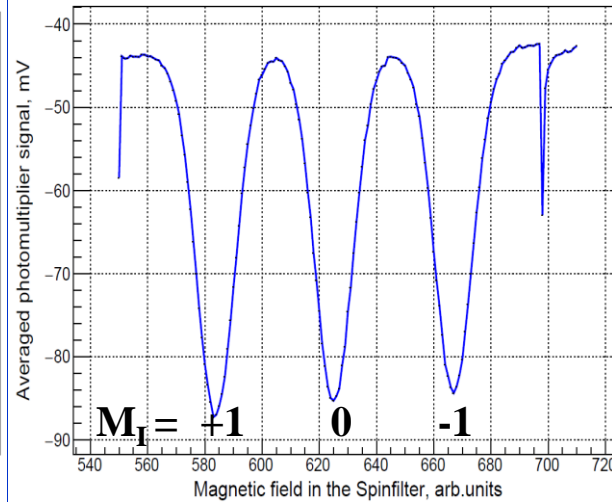
$$E_{14} = (A_1 - A_2) / A_1 = (6.3 - .4) / 6.3 = 0.94 \pm 0.02$$

Сигнал атомного пучка с ФЭУ при открытой и закрытой заслонке, при выключенном и включенном блоке ВЧ переходов MFT.

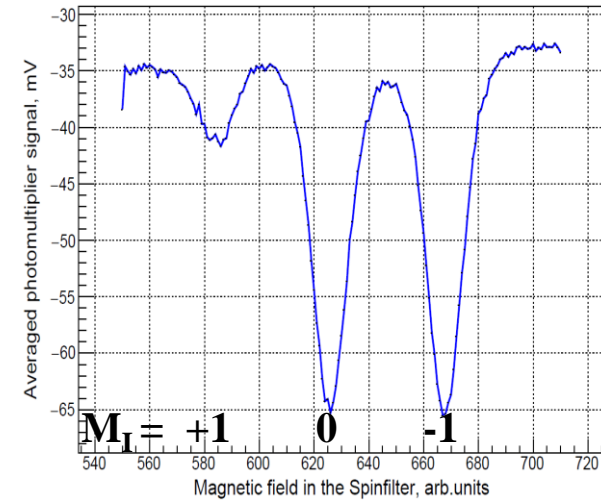
2022-04-27 11:30:03



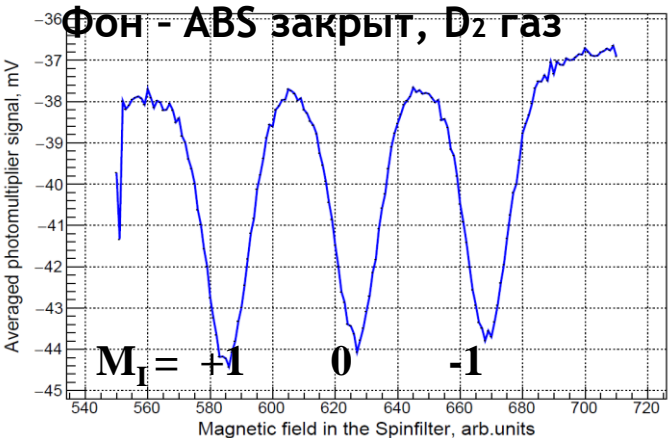
2022-04-27 11:34:09



2022-04-27 12:32:58



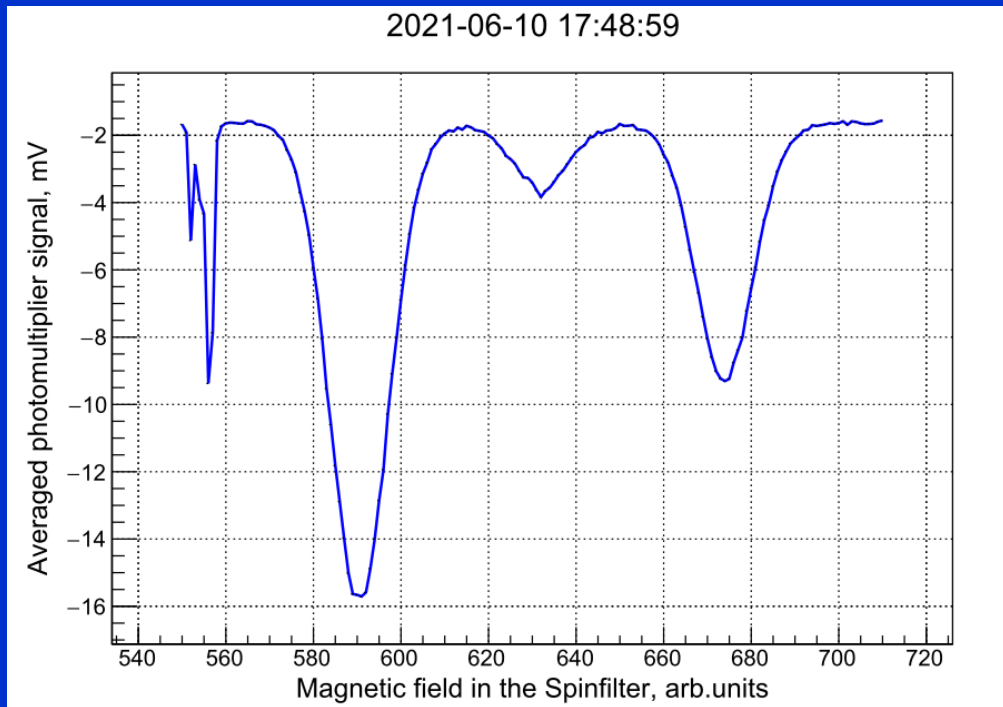
2022-04-27 18:56:23



Пики 7, 30, 31. Фон ~ 6.5

Без фона 0.5, 23.5, 24.5

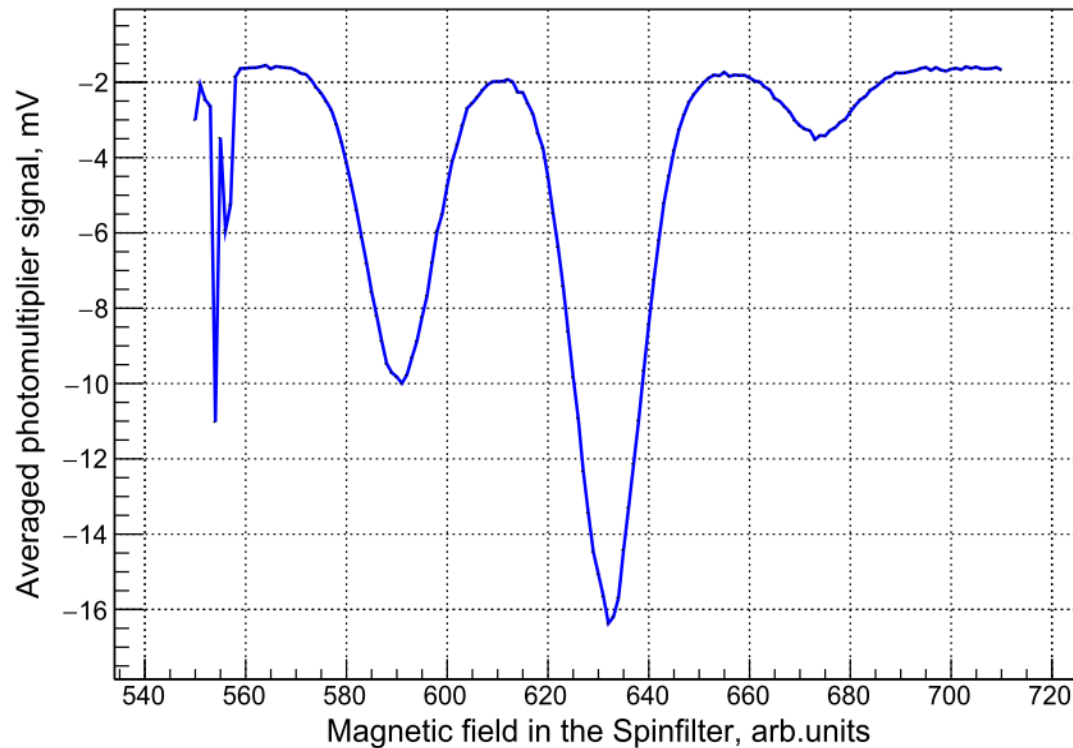
$$E_{14} = (A_1 - A_2) / A_1 = (24 - 0.5) / 24 = 0.98 \pm 0.02$$



Фон определен из уменьшения пиков на
0.55 мВ при уменьшении потока на 1/3.
От 3 компонент фоновый сигнал 1.65 мВ

$$E_{26} = (A1 - A2) / A1 = (6.47 - 3.35) / 6.47 = 0.95 \pm 0.02$$

2021-06-10 17:42:19



$$E_{35} = (A1 - A2) / A1 = (6.47 - .35) / 6.47 = 0.95 \pm 0.02$$

Фон определен из уменьшения пиков на 0.55 мВ при уменьшении потока на 1/3

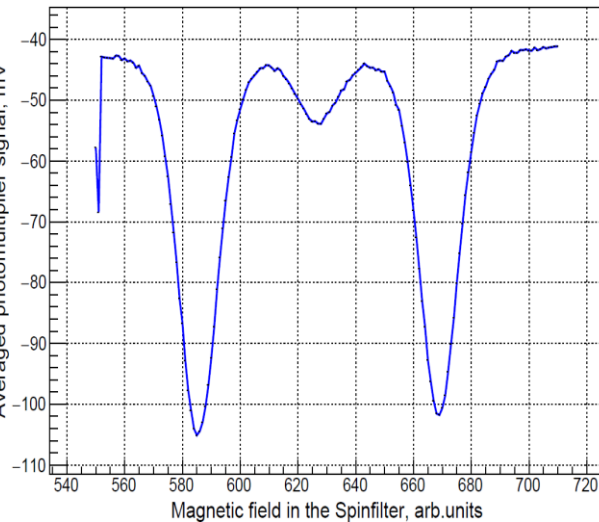
Дмитрий Топорков

ПИЯФ, Гатчина, 28 Июня 2022

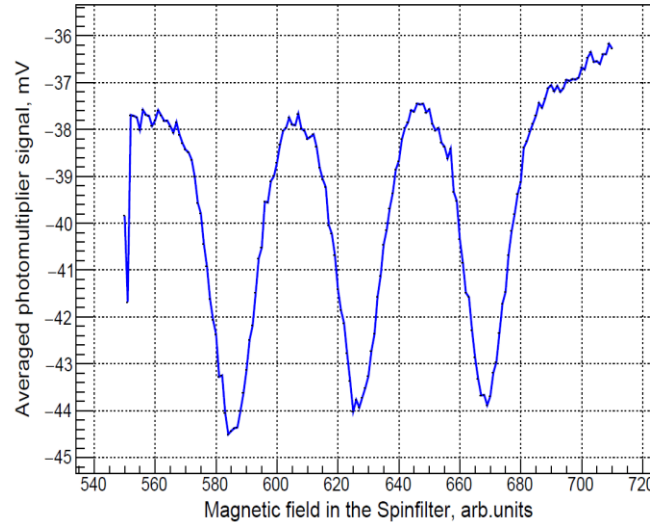
32

Измерения с одновременным включением блока MFT и блока SFT

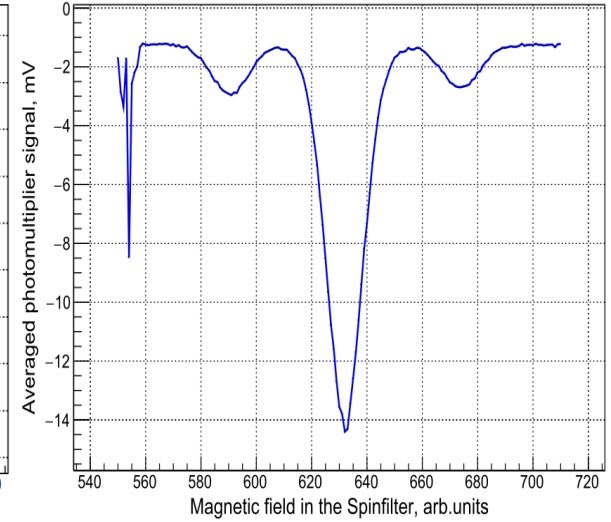
2022-04-27 18:16:43



2022-04-27 18:22:51



2021-06-10 18:03:28



$$P_{zz} = 1 - 2.9 * 3 / 111 = 0.922$$

Фон - определен по сигналу при закрывании заслонки пучка атомов

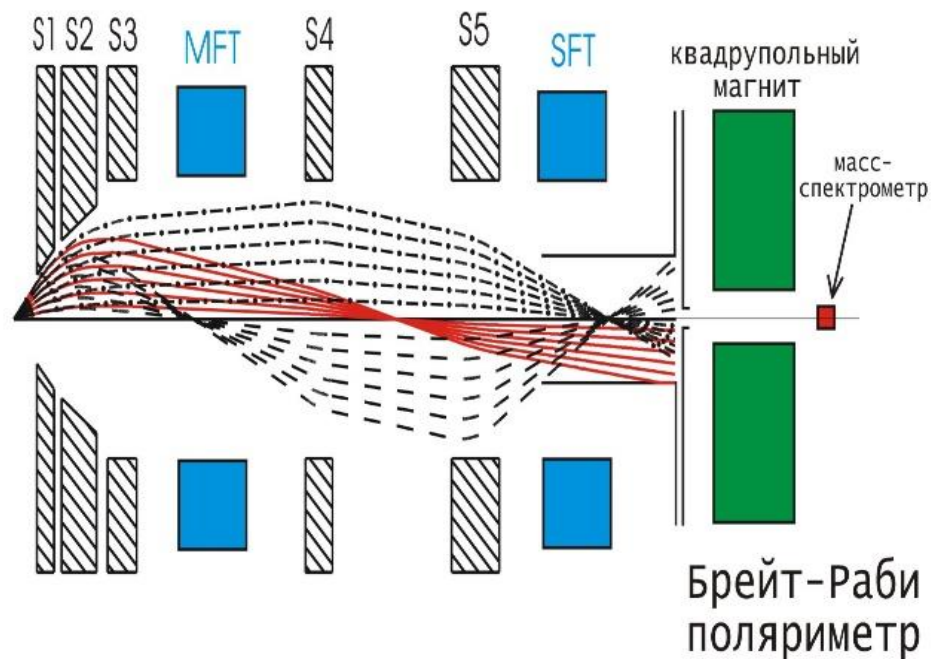
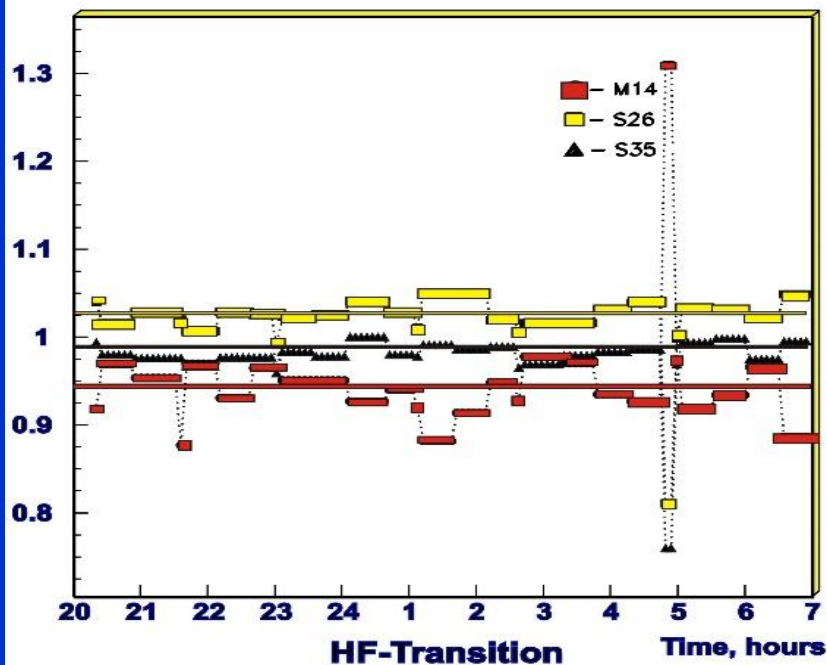
$$P_{zz} = -1.76$$

Приведена поляризация атомов дейтерия инжектируемых в накопительную ячейку. Атомы в ячейке испытывают ~ 200 соударений со стенками и подвергаются действию ВЧ поля от циркулирующего электронного сгустка.

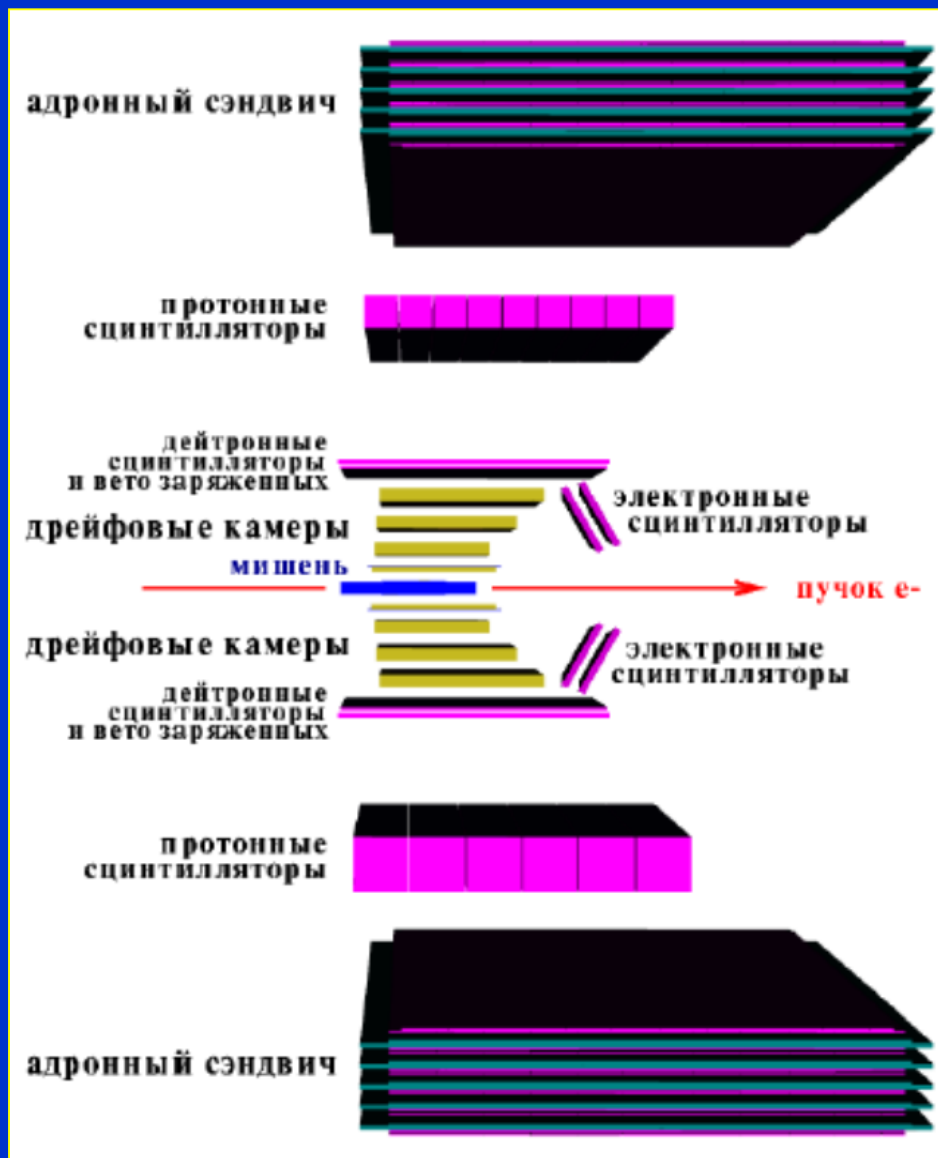
НЕОБХОДИМО ИЗМЕРЯТЬ ПОЛЯРИЗАЦИЮ МИШЕНИ НЕПОСРЕДСТВЕННО!!!

Давние измерения эффективности работы блоков ВЧ переходов

Wed Jul 7 20:20:48 1999 - Thu Jul 8 06:54:59 1999



Элементы детектора :: основная идея LQ-поляриметра



Измерение тензорной поляризации мишени производится с помощью поляриметра, который состоит из двух симметрично расположенных наборов сцинтилляционных счетчиков для регистрации дейтронов и электронов (см. рис. слева).

Поляриметр основан на измерении асимметрии в скорости счета событий упругого ed -рассеяния при изменении знака тензорной поляризации мишени.

Теоретические основы LQ-поляриметра

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_0 \cdot \left(1 + \frac{P_{zz}}{\sqrt{2}} \left(T_{20} \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{2} - T_{21} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin 2\theta \cos \phi + T_{22} \sqrt{\frac{3}{2}} \sin^2 \theta \cos 2\phi \right) \right)$$

Компоненты анализирующей способности выражаются через формфакторы:

$$T_{20} = -\frac{\sqrt{2}}{3} \eta \frac{4G_Q(G_C + \frac{\eta}{3}G_Q) + [1/2 + (1 + \eta)tg^2\theta_e/2]G_M^2}{A(q^2) + B(q^2)tg^2\theta_e/2},$$

$$T_{21} = -\frac{2}{\sqrt{3}} \eta^{3/2} \frac{\sqrt{1 + (1 + \eta)tg^2\theta_e/2} G_Q G_M}{A(q^2) + B(q^2)tg^2\theta_e/2}, \quad T_{22} = -\frac{\eta}{2\sqrt{3}} \frac{G_M^2}{A(q^2) + B(q^2)tg^2\theta_e/2}.$$

$A(q^2)$ и $B(q^2)$ – комбинация зарядового монопольного G_C , квадрупольного G_Q и магнитного G_M формфакторов дейтрона: $A = G_C^2 + (8/9)\eta^2 G_Q^2 + (2/3)\eta G_M^2$, $B = (4/3)\eta(1 + \eta)G_M^2$, где $\eta = q^2/(4M_d^2)$.

Зная теоретическую зависимость формфакторов дейтрона от переданного импульса, который однозначно связан с углом рассеяния электрона, можно рассчитать асимметрию в скорости счета событий упругого еd-рассеяния при изменении знака тензорной поляризации P_{zz} мишени. Используется формула $(N_1 - N_2)/(1.7 * N_1 + N_2)$, где N_1 и N_2 скорости счёта для двух разных значений P_{zz} .

Теоретические основы LQ-поляриметра

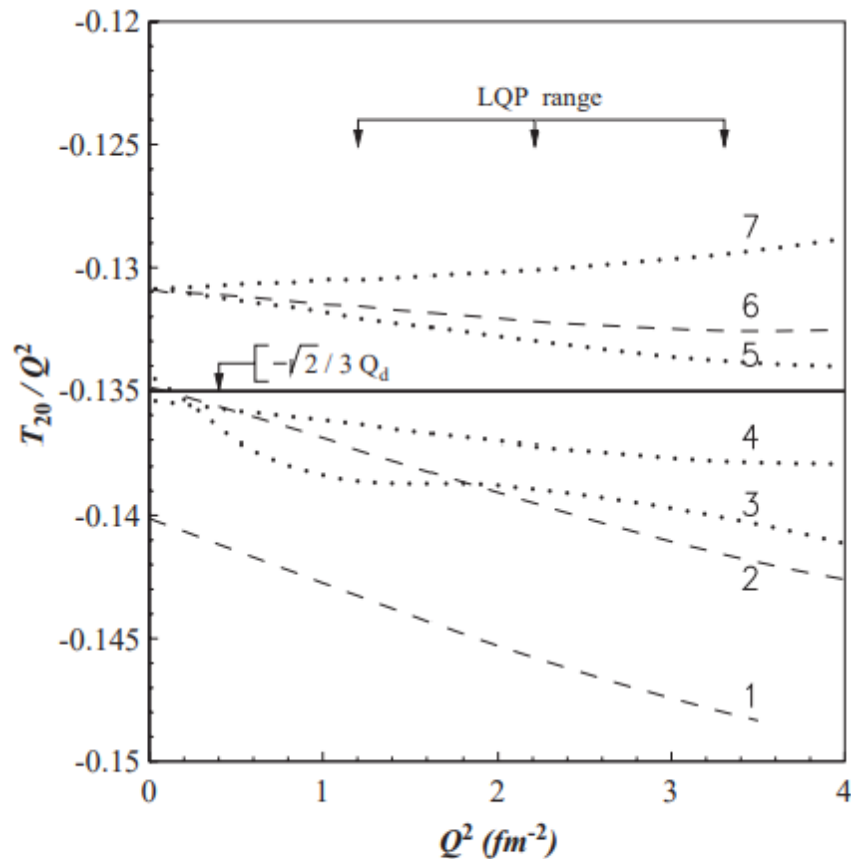
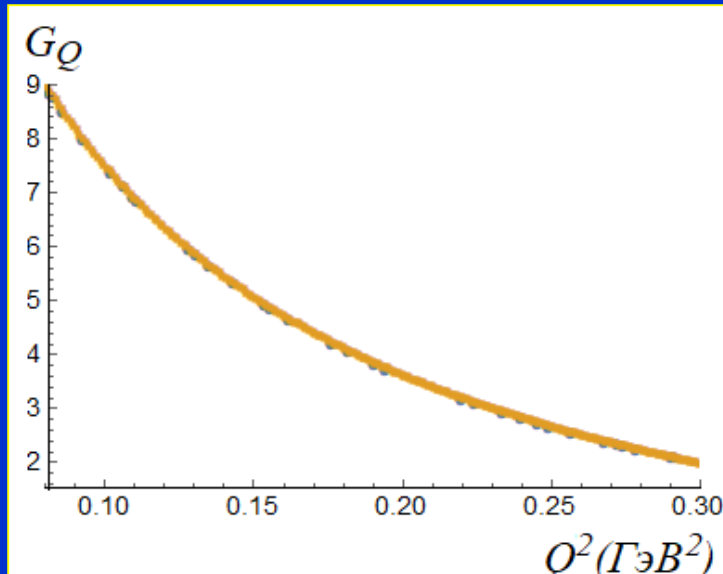
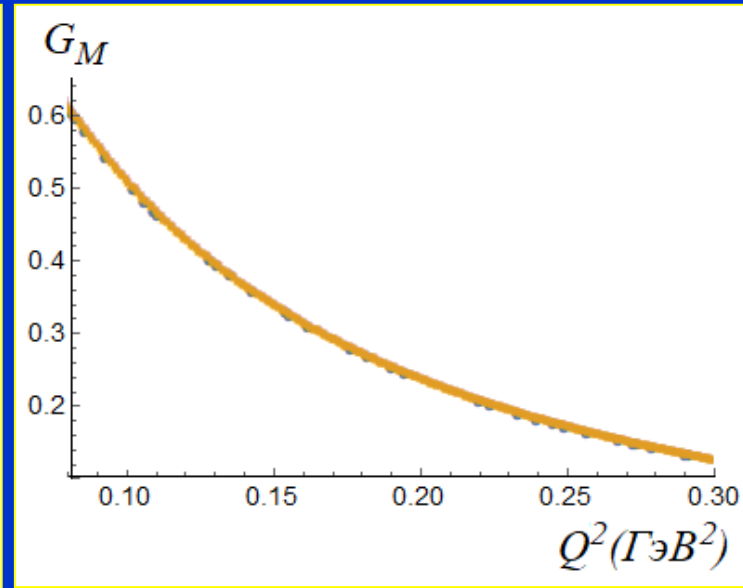
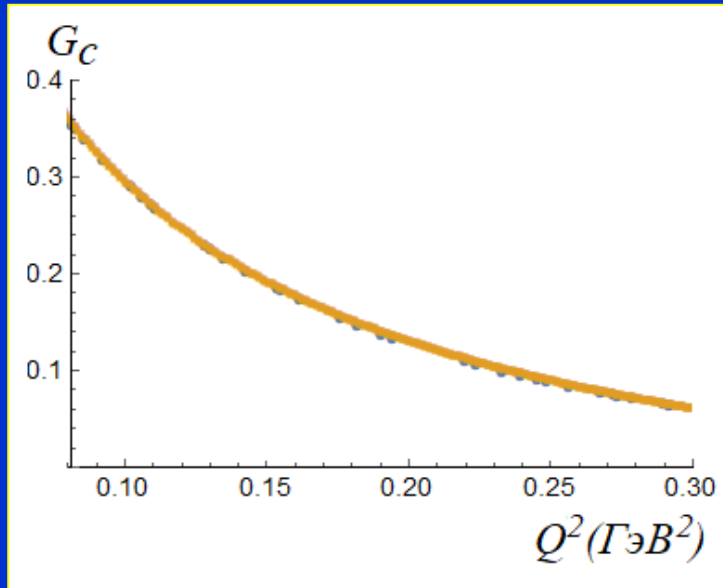


Fig. 1. Tensor analyzing power T_{20} divided by Q^2 as a function of Q^2 . The theoretical predictions: 1—Arenhövel et al. [7]; 2—Dubovichenko [8]; 3—Phillips et al. [9]; 4—Paris IA; 5—Argonne v18 IA; 6—Nijmegen-93 IA; 7—Bonn-CV IA.

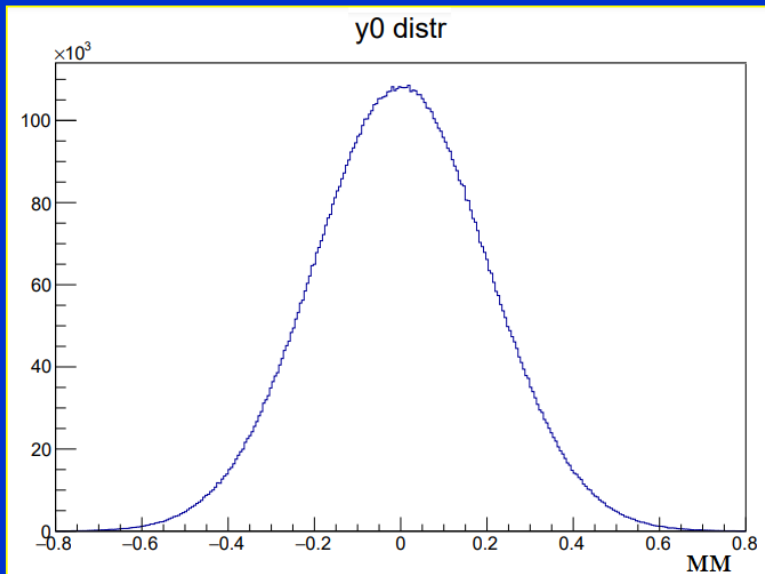
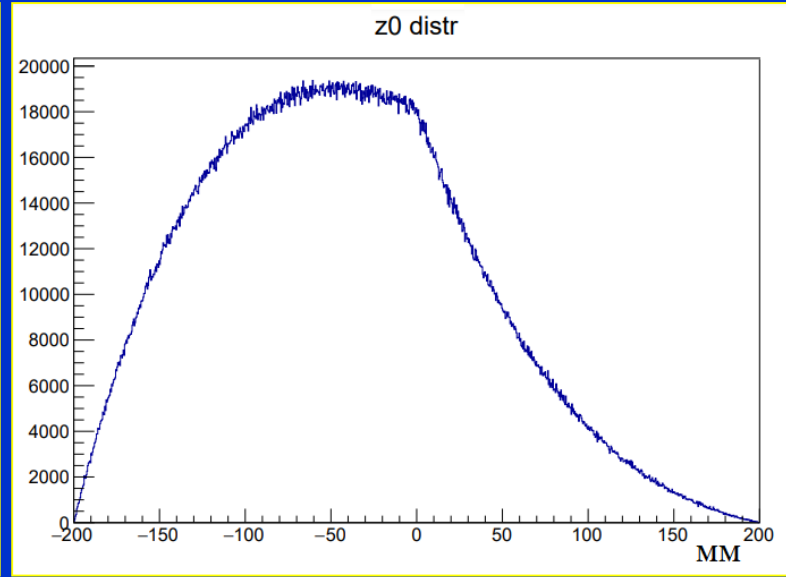
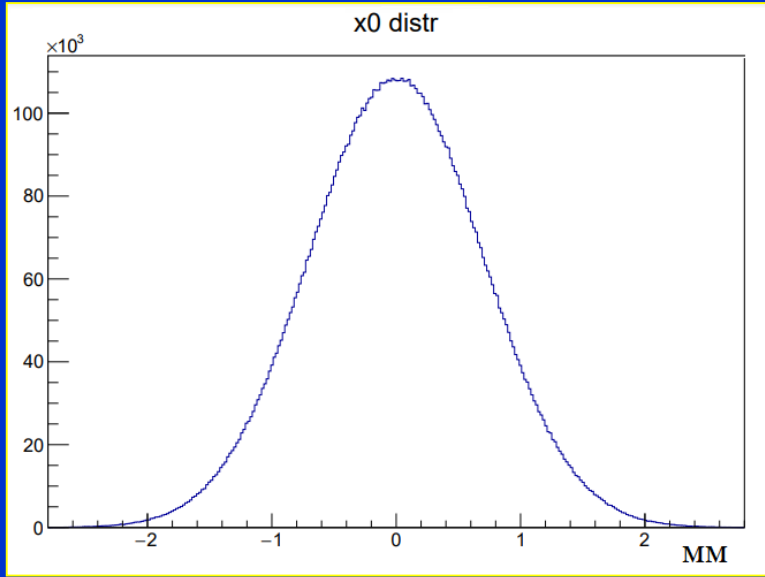
Кинематика упругого рассеяния электрона на дейтроне выбрана так, чтобы переданный импульс был мал. В этом случае, как видно на рисунке слева, теоретические модели дают хорошее согласие друг с другом (<2%) и могут быть использованы для определения тензорной поляризации мишени по величине измеренной асимметрии в скорости счета.

Результаты моделирования методом Монте-Карло



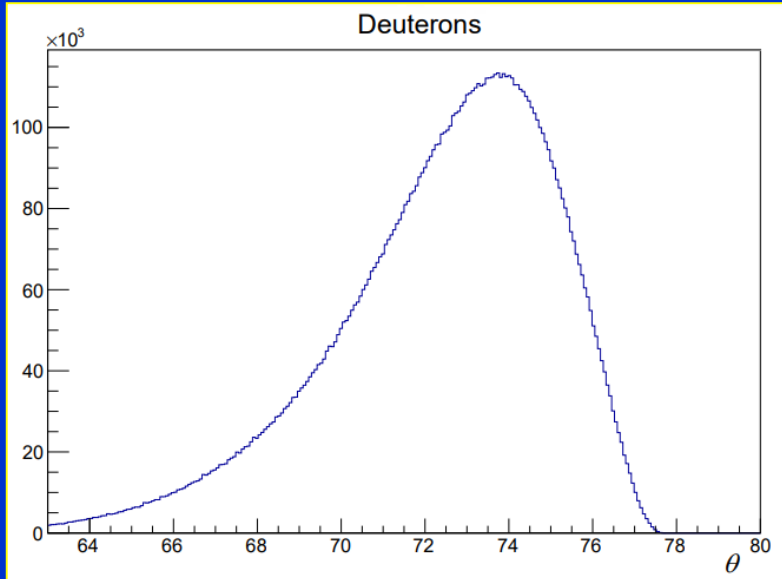
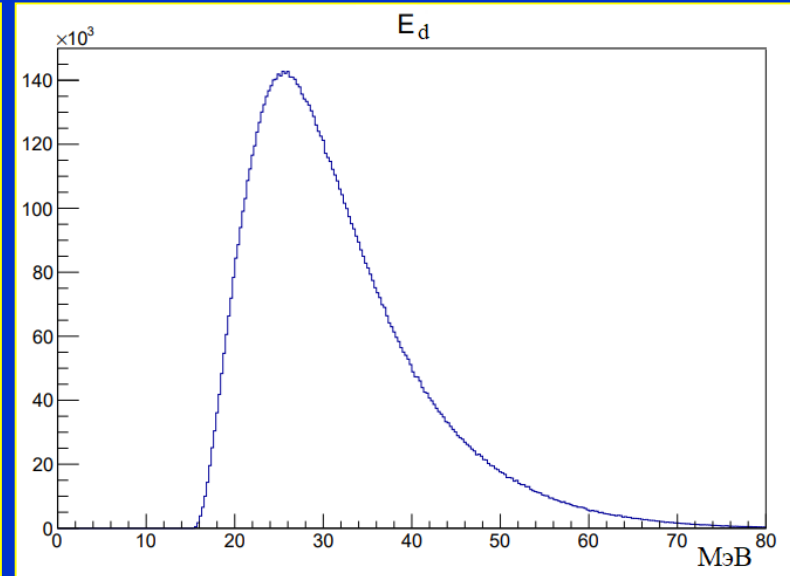
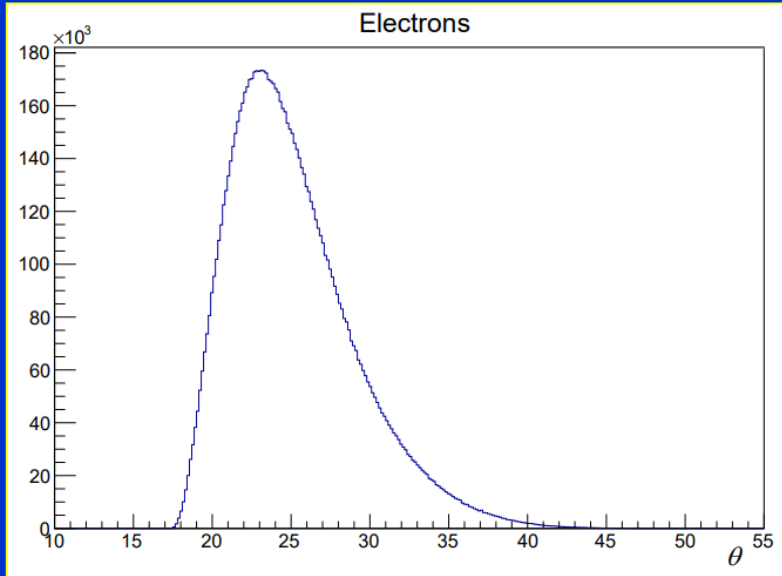
При моделировании
формфакторы задавались
аналитическими функциями от
переданного импульса.
Функции были получены
фитированием табличных
данных, полученных из одной
теоретической модели
(A.F.Krutov, V.E.Troitsky,
Eur.Phys.J. A16 (2003) 285-290).

Результаты моделирования методом Монте-Карло



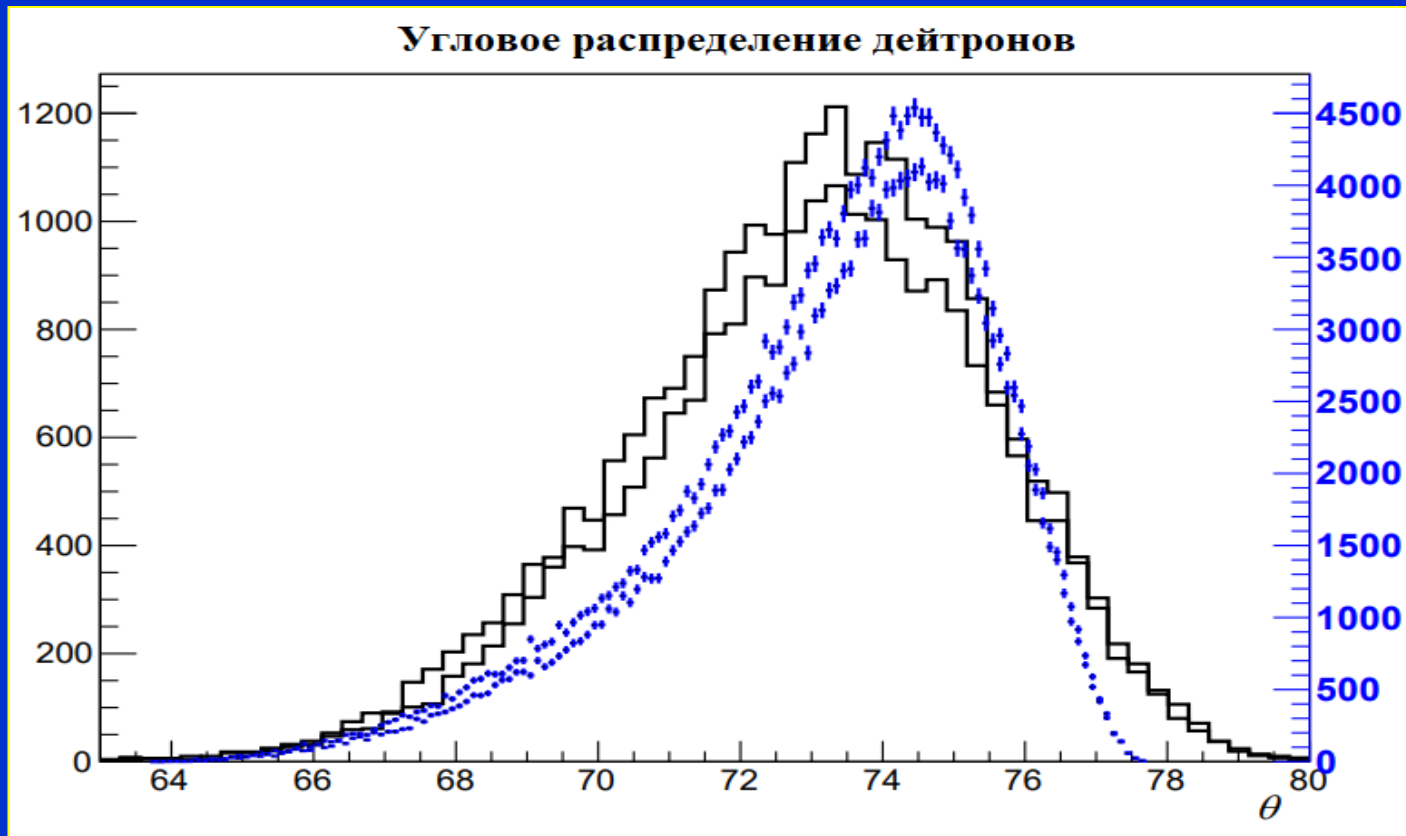
Методом Монте-Карло задавалось распределение плотности атомов дейтерия в накопительной ячейке. На рисунках представлен результат моделирования – распределение дейтронов внутри ячейки, зарегистрированных детектором. Ось z направлена вдоль накопительной ячейки.

Результаты моделирования методом Монте-Карло



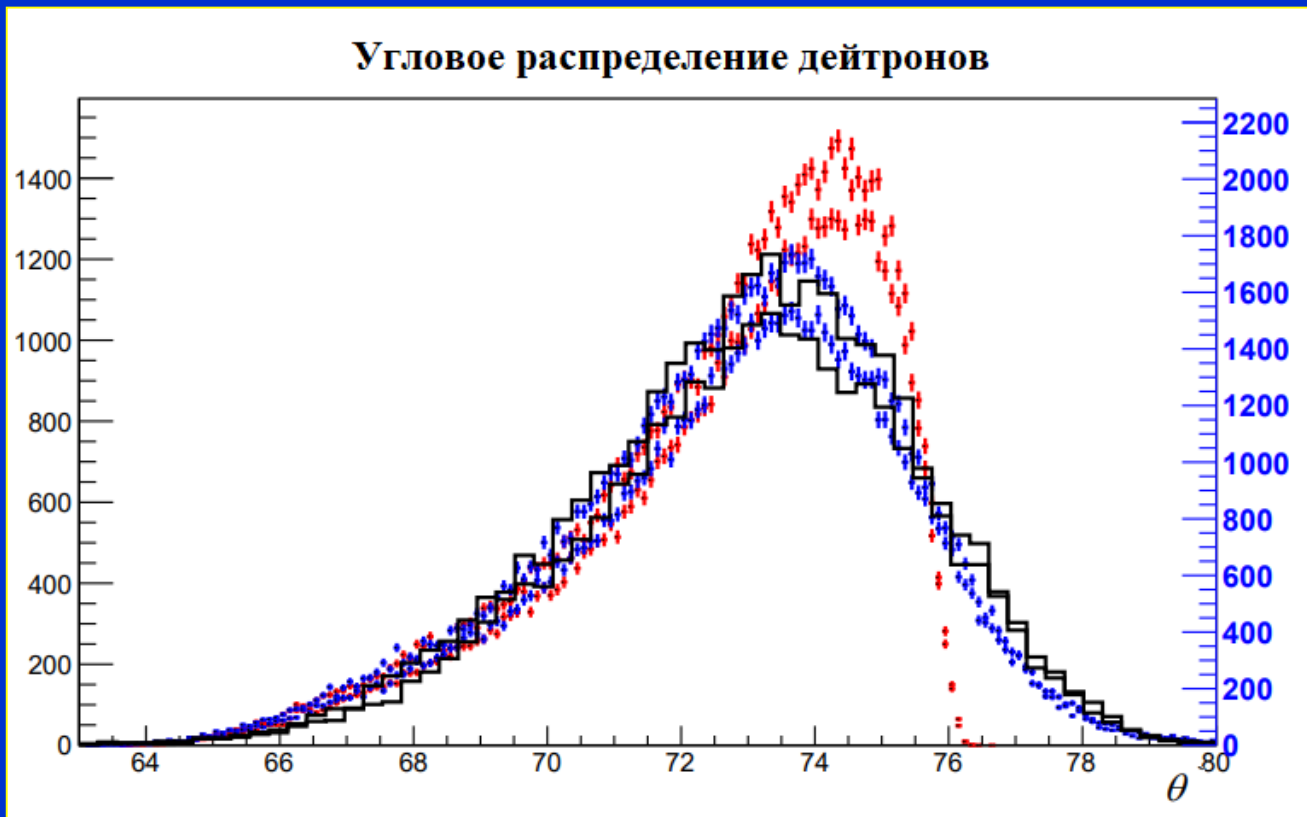
Левый верхний и нижний рисунки показывают угловое распределение рассеянных электронов и дейтронов отдачи. Верхний правый график – распределение дейтронов отдачи по их кинетической энергии.

Результат обработки экспериментальных данных



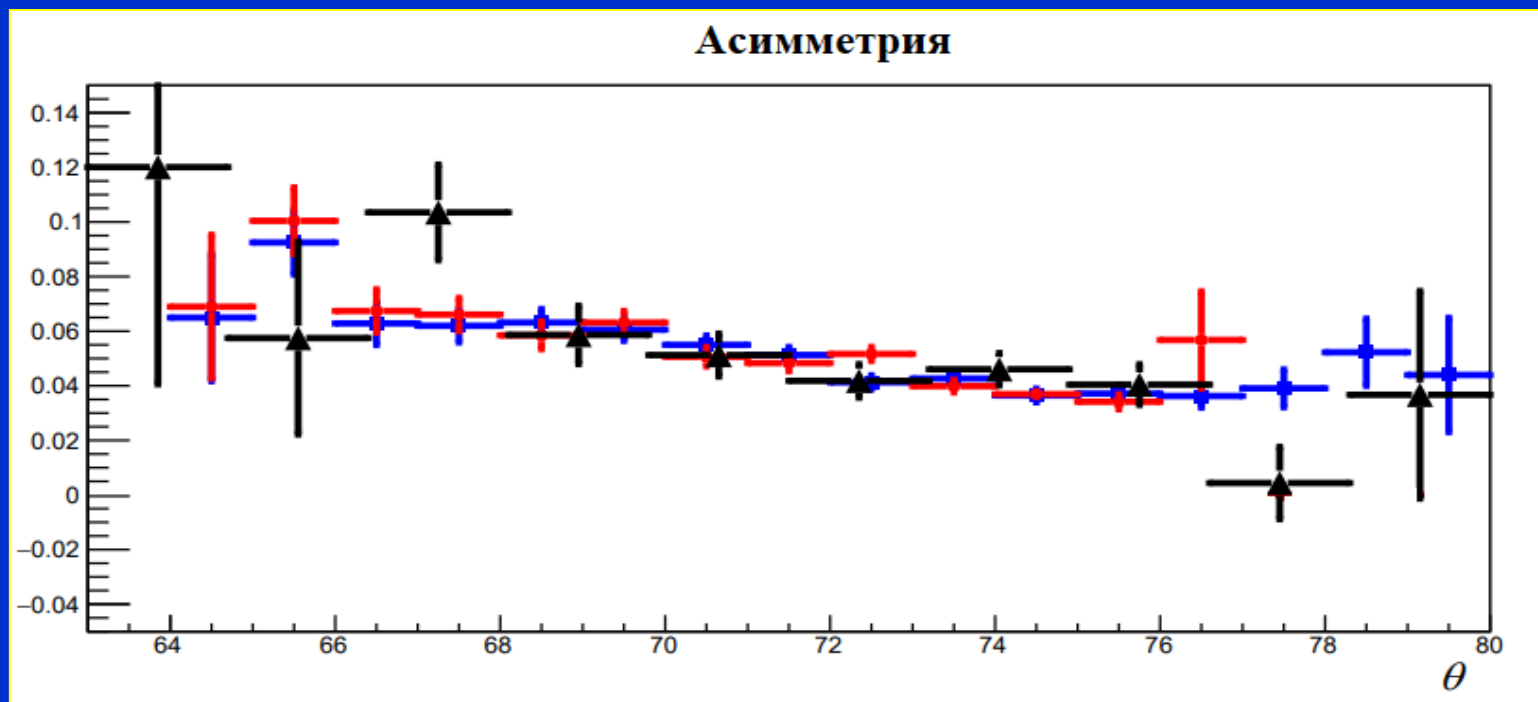
На графике представлены экспериментально измеренные угловые распределения дейтронов отдачи для двух разных значений тензорной поляризации мишени (две гистограммы с черными линиями). Синие точки - угловые распределения дейтронов отдачи из моделирования без учёта взаимодействия дейтронов с материалами детектора.

Экспериментальные данные и моделирование в Geant4



Программный пакет Geant4 использовался для учёта взаимодействия дейтронов отдачи с различными материалами экспериментальной установки, встречающимися на пути их движения. Как видно из рисунка, этот учёт приводит к согласию результатов моделирования (синие точки) с экспериментальными данными. Красные точки – угловое распределение зарегистрированных дейтронов внутри ячейки.

Экспериментальные данные и моделирование в Geant4



На графике представлены экспериментальные значения асимметрии (чёрные треугольники) и значения асимметрии, полученные из моделирования в Geant4. Тензорная поляризация является свободным параметром в моделировании и выбирается так, чтобы вычисленная асимметрия совпадала с экспериментально измеренной.

$P_{zz} = 0.39 \pm 0.03$ для одного состояния и $P_{zz} = -0.66 \pm 0.05$ для другого.

$P_{zz} = 0.397 \pm 0.013 \pm 0.018 \pm 0.012$ (PRL2003) $P_{zz} = 0.341 \pm 0.025 \pm 0.011$ (PRL2007)

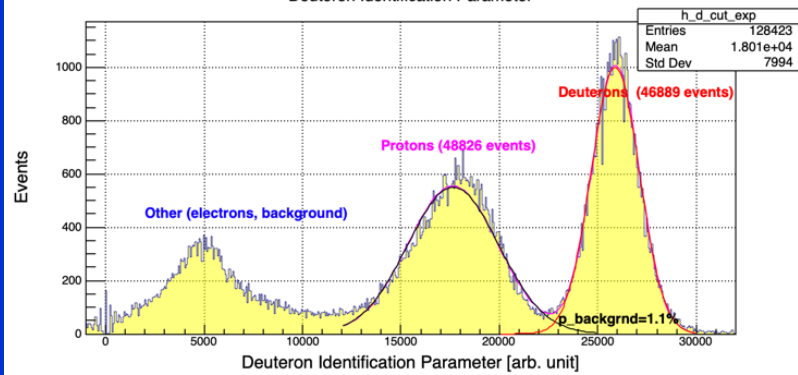
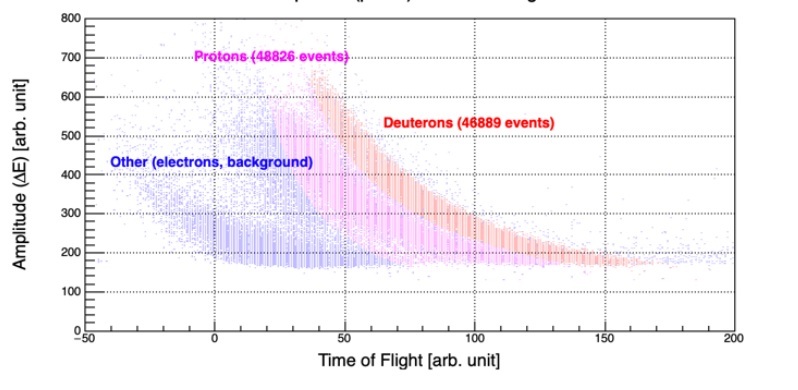
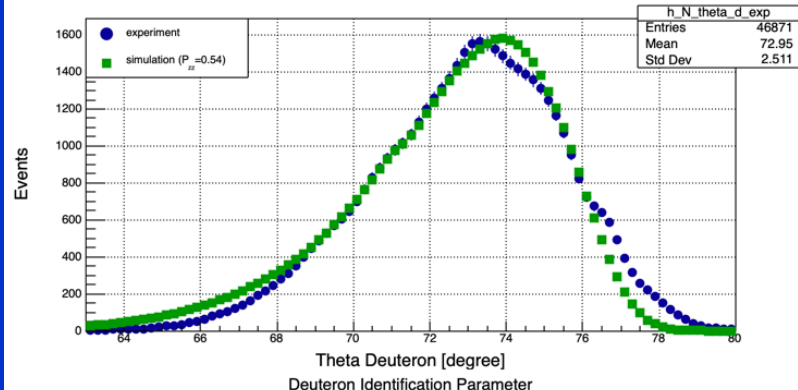
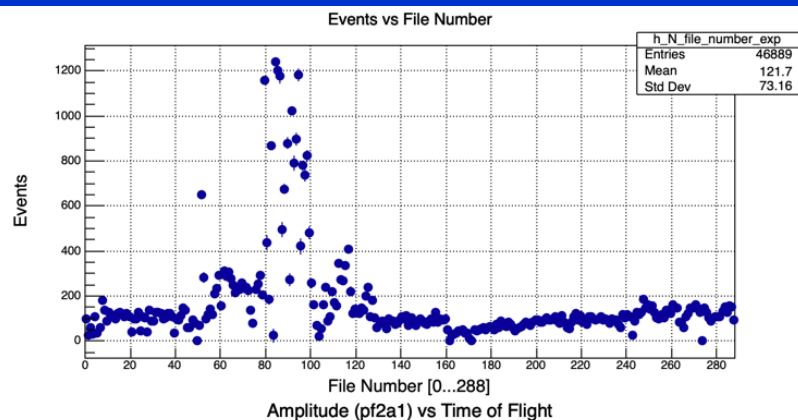
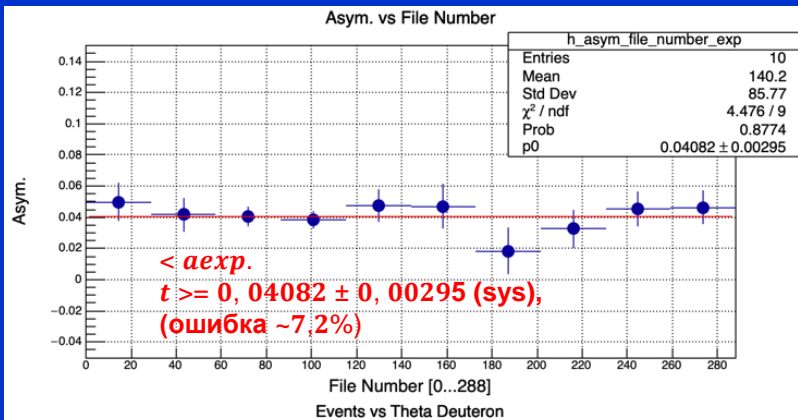
Имеется большое желание измерить поляризацию атомов, покидающих накопительную ячейку с помощью Лэмбовского поляриметра.

При существующей геометрии установки возможно разместить ЛП на расстоянии около 50 см от конца ячейки. При этом поток атомов в область ионизатора уменьшается ~ в 2000 раз по сравнению с пучком из ИПА. Если атомы из ячейки подфокусировать секступольным магнитом с полем 10 kG, то поток увеличится в ~ 4 раза.

Измерить поляризацию такого пучка весьма проблематично. Возможно, что применение геттерного насоса приведет к уменьшению фонового сигнала и даст надежду на измерение поляризации атомов дейтерия, вытекающих из ячейки.

группа Дейтрон

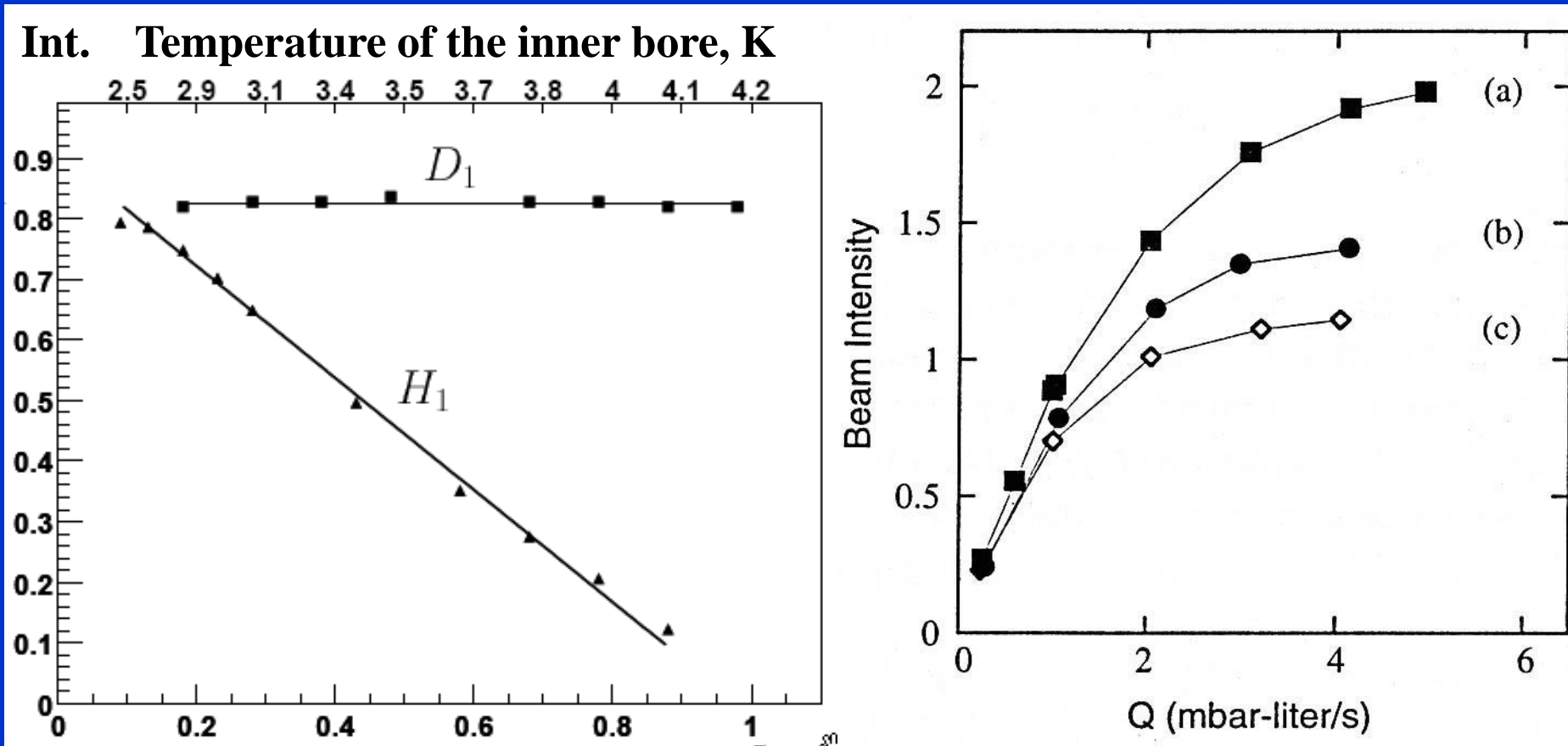




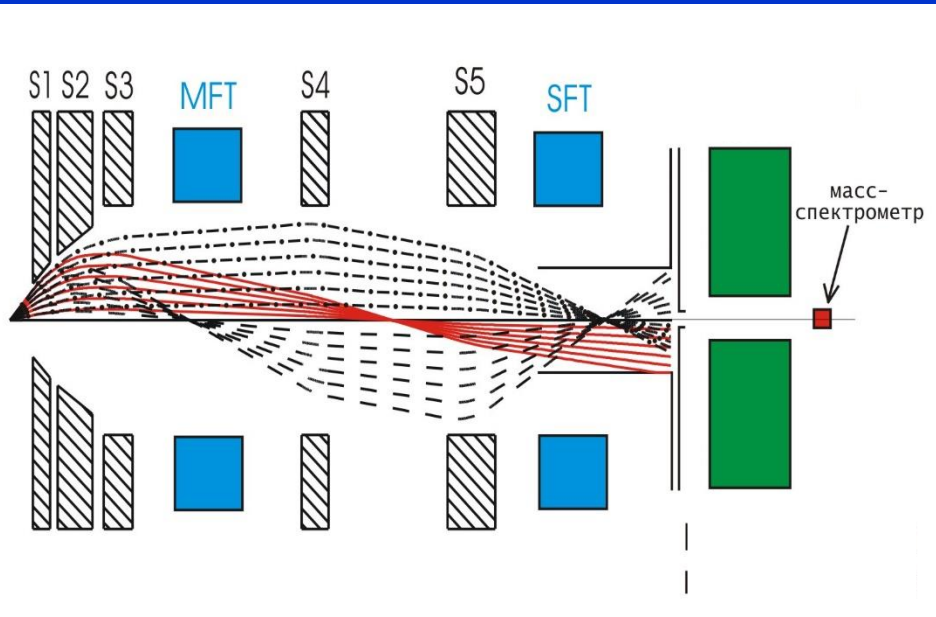
Attenuation of the beam inside the magnets

M.V.Dyug et al. NIMA 495/1 (2002) 8
H₁ beam , cryogenic magnets system

T.Wise et al. NIMA 336(1993) 410
H₂ beam , dummy magnets system
for H₁ beam attenuation should be larger



Focusing magnets



Permanent magnets

$B=1.6 \text{ T}$

Superconducting

$B=4.8 \text{ T}$

$$\Delta\Omega = \pi \cdot \alpha^2 = \pi \cdot \mu \cdot B / \kappa T$$

$$B = 1.6 \text{ T}$$

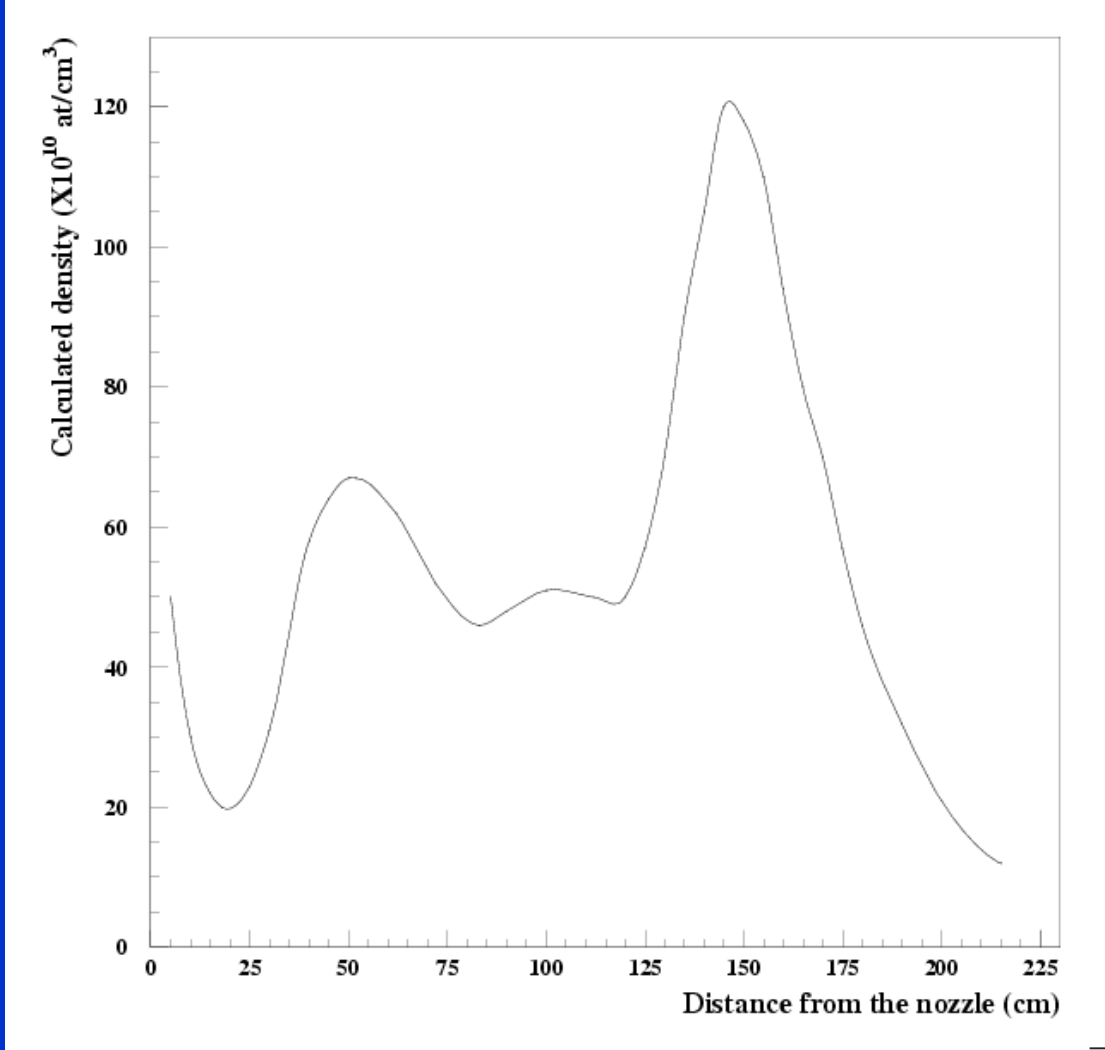
$$\Delta\Omega \sim 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ sr}$$

$$\alpha \sim 0.07 \text{ rad}$$

$$B = 4.8 \text{ T}$$

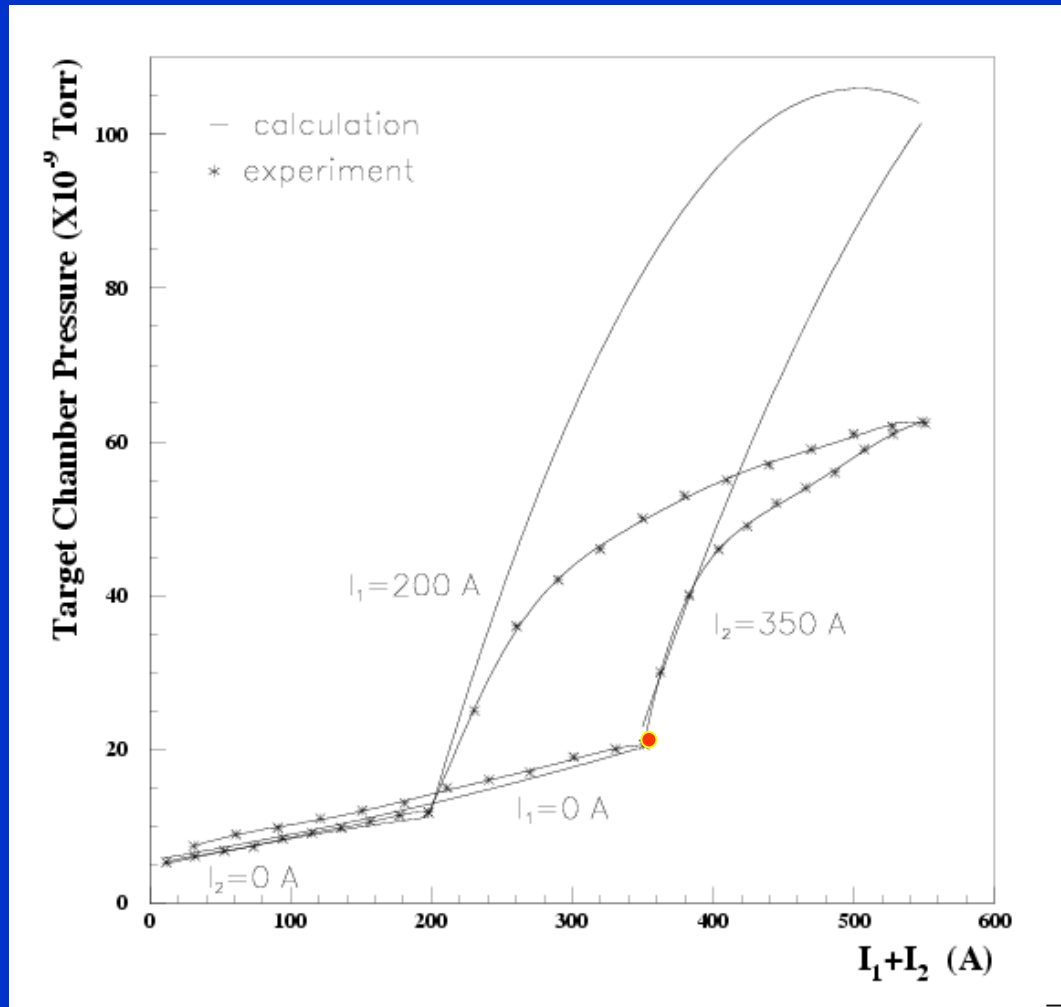
$$\Delta\Omega \sim 4.5 \cdot 10^{-2} \text{ sr}$$

$$\alpha \sim 0.21 \text{ rad}$$

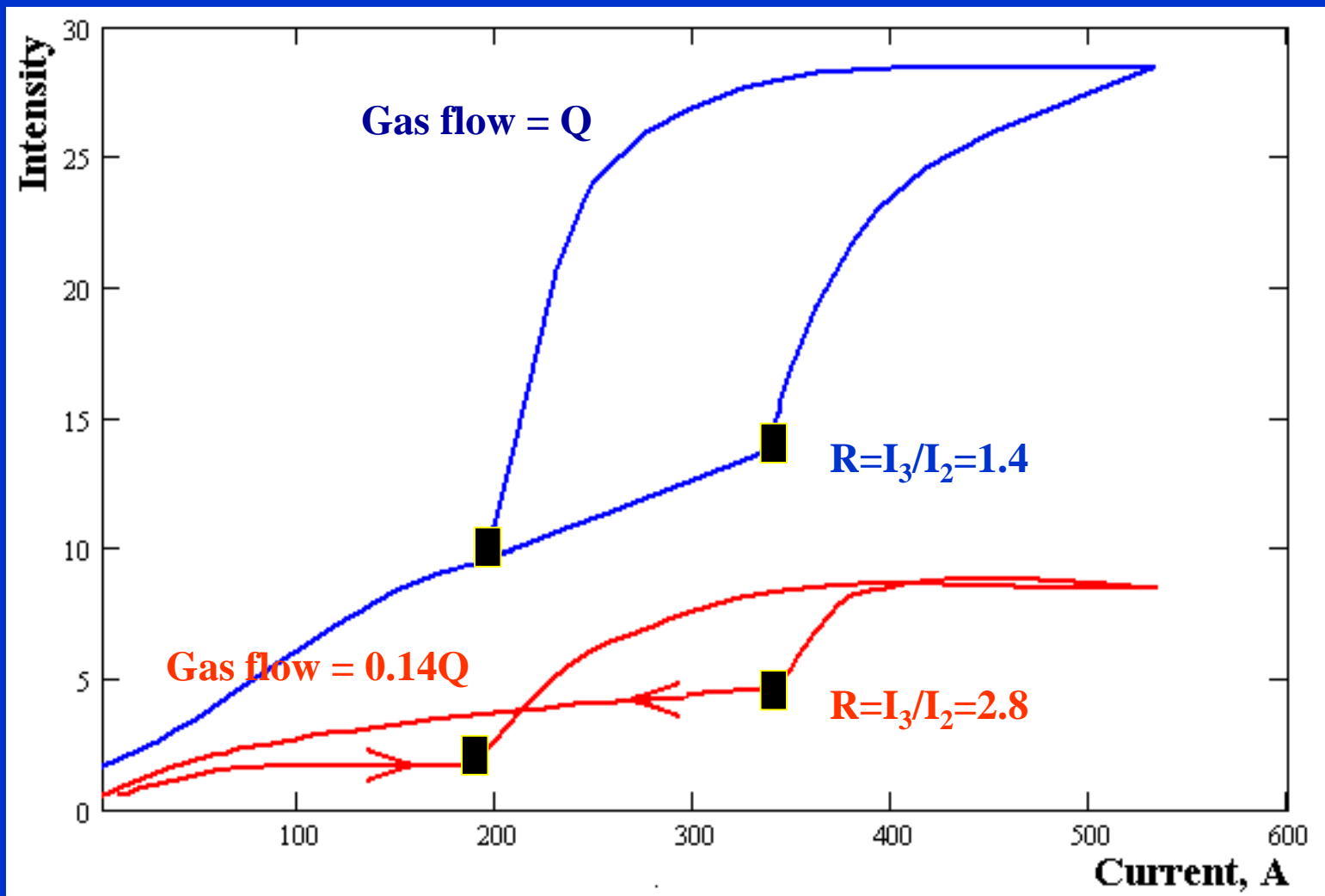


Calculated density along the source axis in 1 mm radius

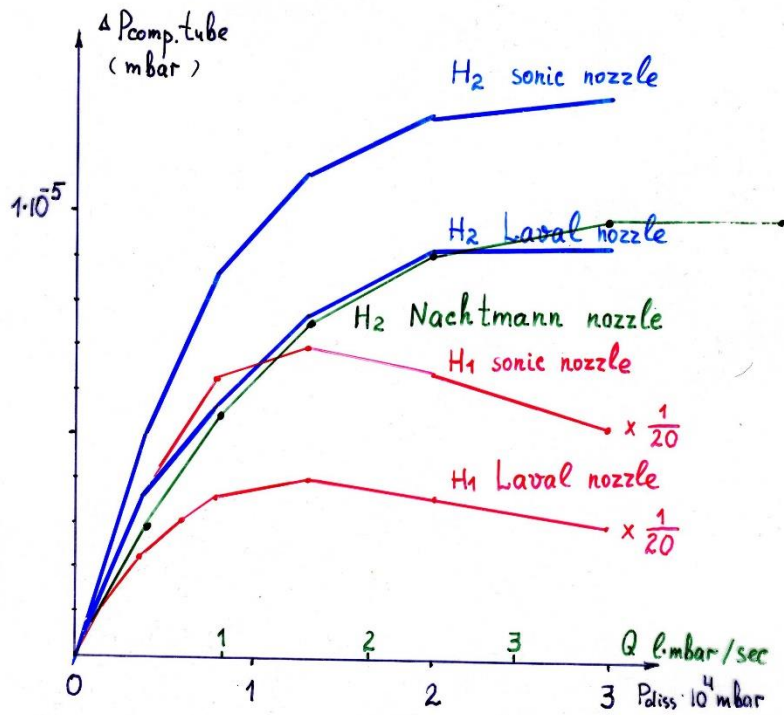
Intensity of the atomic beam vs current through the coils. The measured value is vacuum in the straight section of the VEPP-3 storage ring. Beam is injected into the storage cell.



Test bench measurements. Beam is injected into the compression tube contained QMA.
The size of the tube the same as for injection tube of the storage cell



FORWARD INTENSITY OF THE BEAM IS DEPENDENT FROM THE GEOMETRY OF THE NOZZLE



Comparison of the intensity for
sonic, Laval and Nachtmann nozzles
having 2 mm inner diameter

