



Источник поляризованных ионов SPI, поляриметры низких энергий (Октябрь 2024)

A.N. Solovev, V.V. Fimushkin, K.A. Ivshin, V.B. Dunin, M.V. Kulikov, L.V. Kutuzova,

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

A.S. Belov, V.N. Zubets

Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, Moscow

A.N. Zelenskii

Moscow institute of Physics and Technology, Moscow

A.Rozhdestvensky, V. Larionov

Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov

В рамках программы поляризационных исследований на ускорительном комплексе ОИЯИ по проекту **NICA** ведутся работы по созданию ряда поляризационных установок.

- источник поляризованных дейтронов и протонов **SPI**
- низкоэнергетические поляриметры **SPI**
- абсолютный поляриметр на коллайдере **NICA**

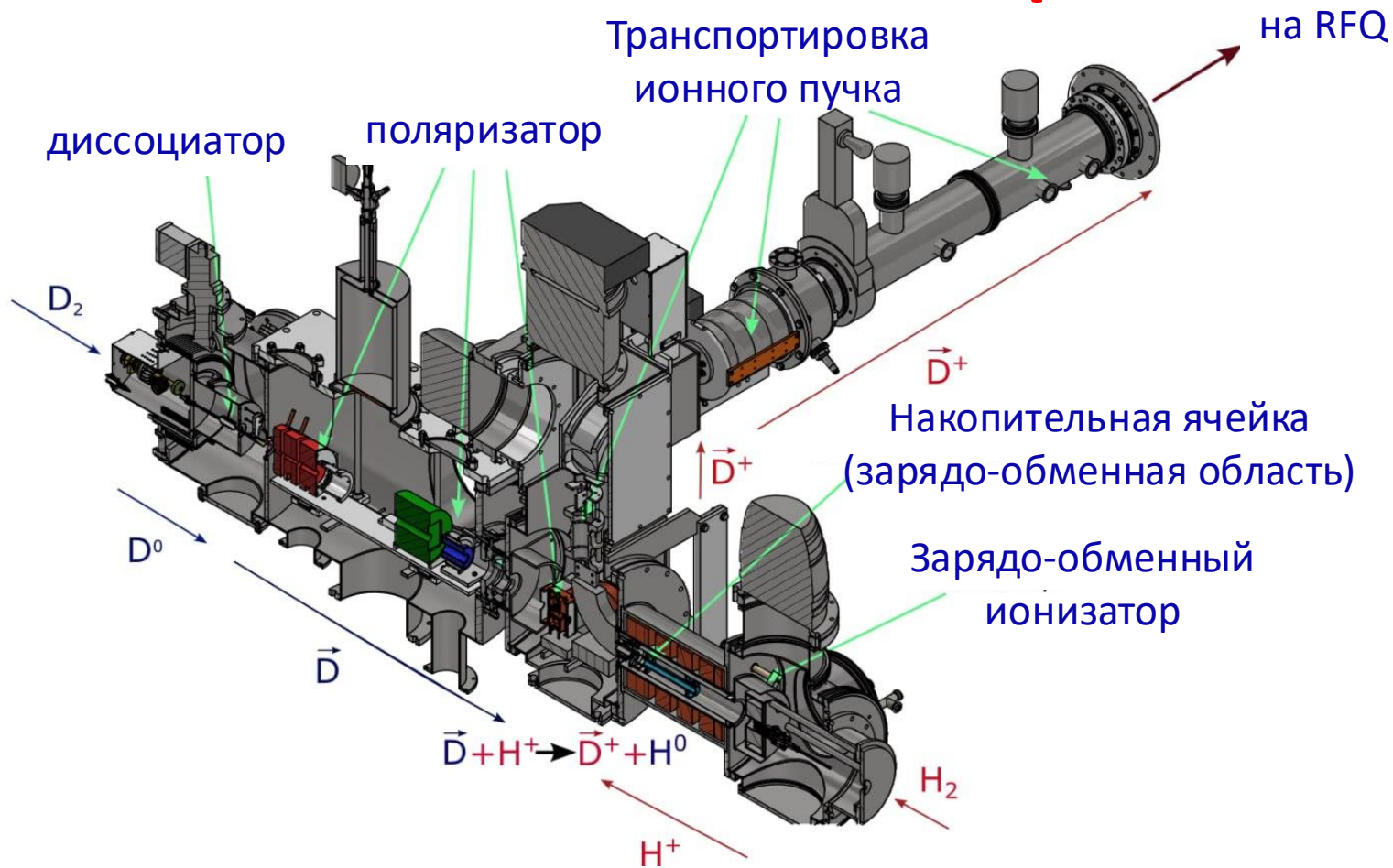
Источник поляризованных ионов (проект SPI)
разрабатывается как высокоинтенсивная установка
поляризованных пучков дейтронов и протонов

Цель проекта — увеличение интенсивности ускоренных
поляризованных пучков на ускорительном комплексе
ОИЯИ до $5 \cdot 10^{10}$ d(p)/импульс,

При токе на выходе источника до **10 mA** для $\uparrow D^+$ ($\uparrow H^+$)

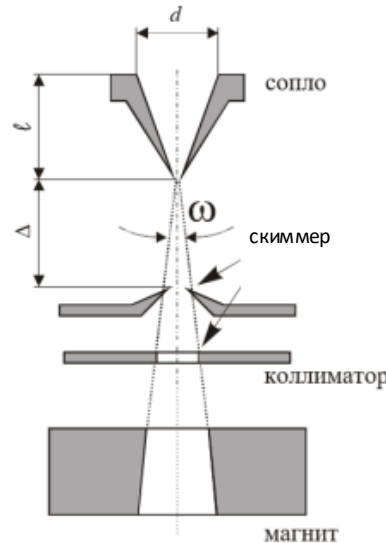
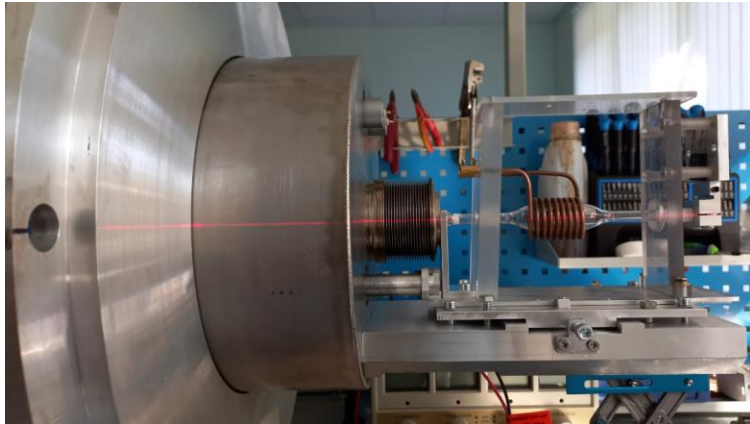
Со степенью поляризации D^+ (H^+) до **90%** от
максимальной векторной (± 1) и
тензорной ($+1, -2$) поляризаций

Source of Polarized Ions (SPI)



- Атомы протия и дейтерия производятся радиочастотным методом (**диссоциатор**)
- Поляризация по электронному спину осуществляется системой постоянных шестиполюсных магнитов, создающих градиентное магнитное поле (**поляризатор**)
- Для ядерной поляризации частиц используются высокочастотные ячейки сверхтонких переходов (**поляризатор**)
- Для ионизации атомов используется **зарядо-обменный ионизатор** с электродуговым источником плазмы

Диссоциатор SPI



1 - клапан (длительность импульса $\sim 200 \mu\text{s}$, поток входного газа $3 \cdot 10^{17}$ молекул/импульс)

2 - тарельчатый сиффон (раскрытие до 25 мм)

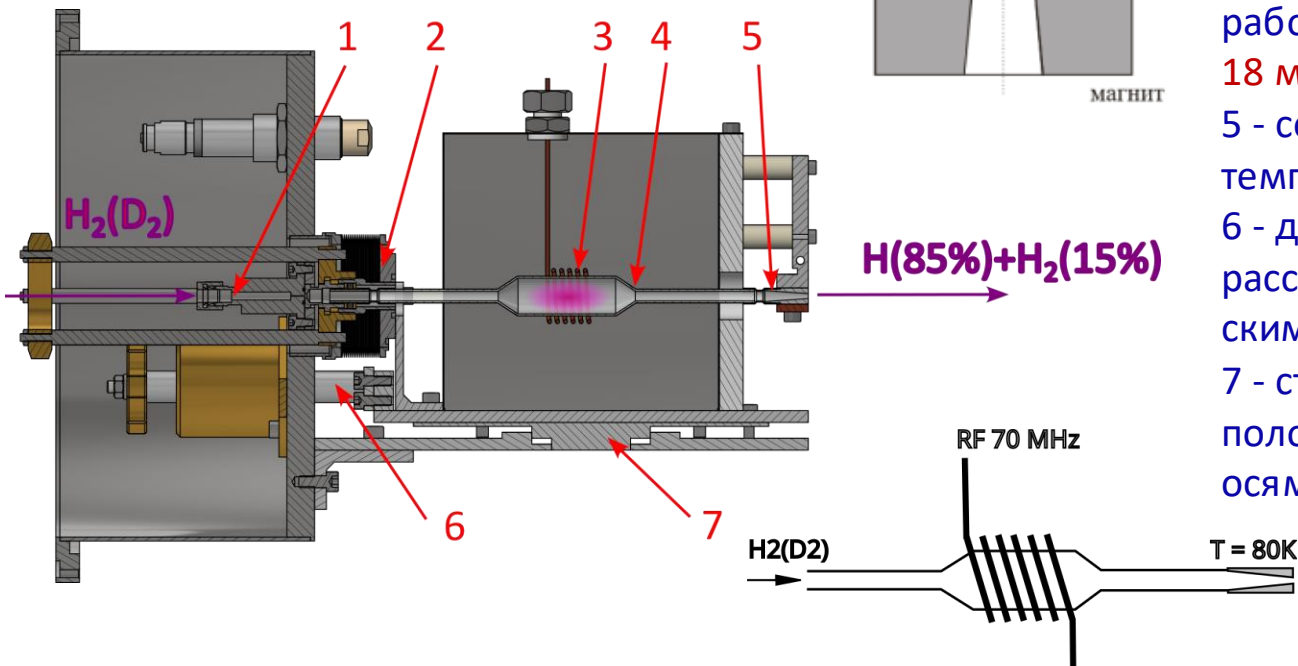
3 - резонатор (ГВЧ амплитуда до 4 кВ и частота 70 МГц)

4 - газоразрядная трубка (длина рабочей области 49 мм и диаметр 18 мм)

5 - сопло (диаметр 2.3 мм , температура 80 К)

6 - движитель столика (изменение расстояние между соплом и скиммером)

7 - столик для юстировки положения сопла (юстировка по осям X и Y)



SPI Ядерная поляризация

Энергетические диаграммы сверхтонких структур атомов водорода и дейтерия в основном состоянии

sets of permanent 6-pole magnet



MFT



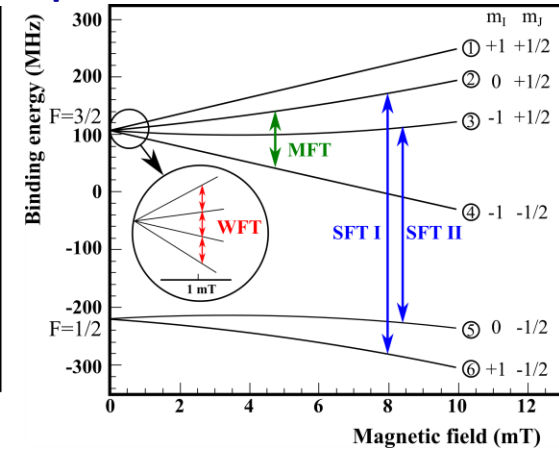
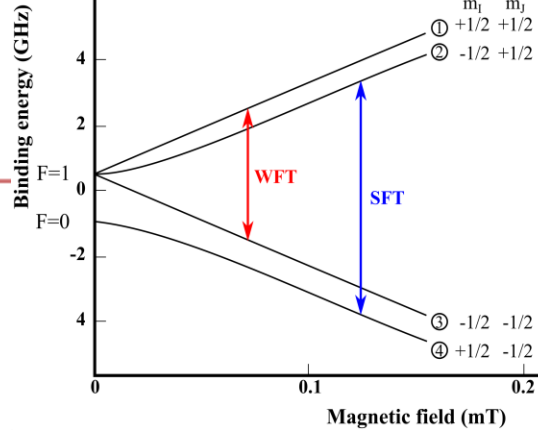
6-pole magnet



WFT



SFT



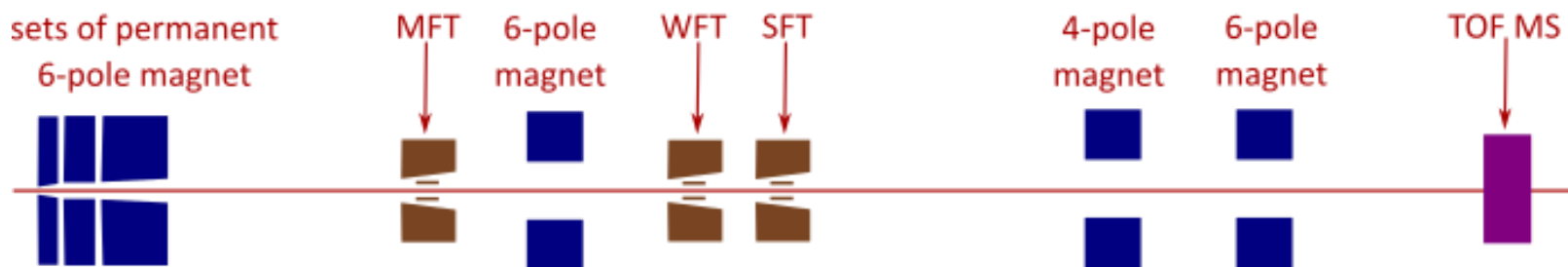
Deuterons

HFT between 6-poles	HFT after 6-poles	Final state	P_Z	P_{ZZ}
MFT 3 → 4	WFT 1,2 → 3,4	3,4	-1	+1
MFT 3 → 4	SFT 2 → 6	1,6	+1	+1
MFT 1 → 4	SFT 3 → 5	2,5	0	-2
MFT 1 → 4	SFT 2 → 6	3,6	0	+1
MFT - off	SFT 3 → 5	1,2,5	+1/3	-1
MFT - off	SFT 2 → 6	1,3,6	+1/3	+1
MFT - off	WFT 1 → 4	2,3,4	-2/3	0
MFT 3 → 4	SFT 2 → 6	1,6	+1	+1

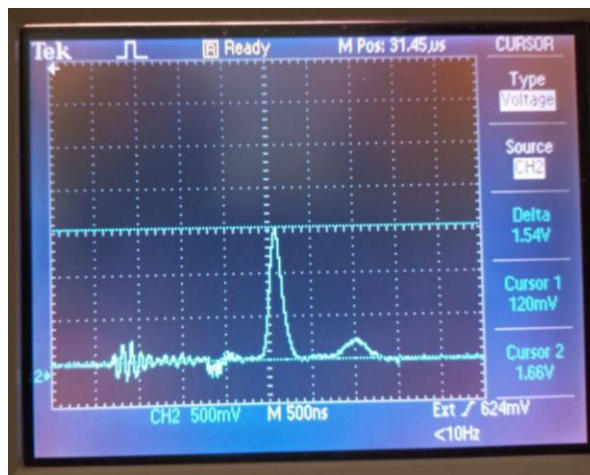
Protons

MFT - off	WFT 1 → 3	2,3	-1	
MFT - off	SFT 2 → 4	1,4	+1	

Брейт-Раби поляриметр



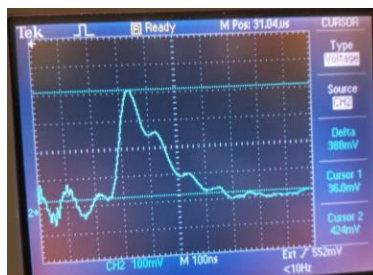
- Чувствительность масс-спектрометра (TOF) обеспечивает обнаружение атомов и молекул плотности пучка $10^{10} - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$.
- Временное разрешение масс-спектрометра составляет $10 \mu\text{s}$.
- Используются два дополнительных постоянных магнита.



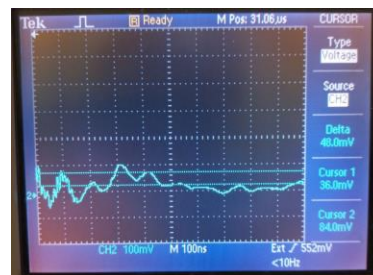
Степень диссоциации



TOF
Масс-спектрометр



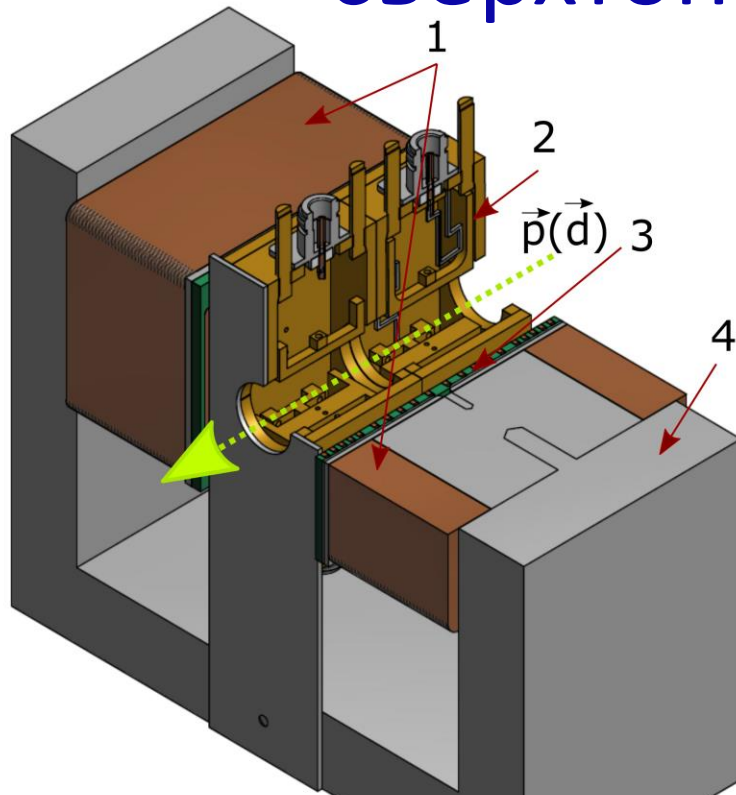
Выключены ячейки



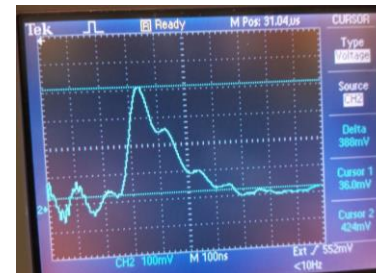
Включены ячейки



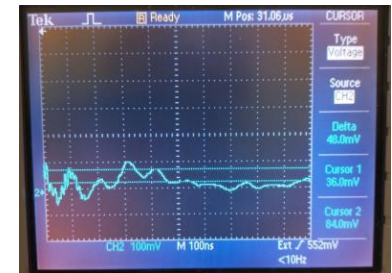
Универсальная SFT ячейка сверхтонких переходов



- 1 - Дипольный магнит.
- 2 - ВЧ ячейка
- 3 - Катушки градиентного поля
- 4 - магнитопровод, держатель.



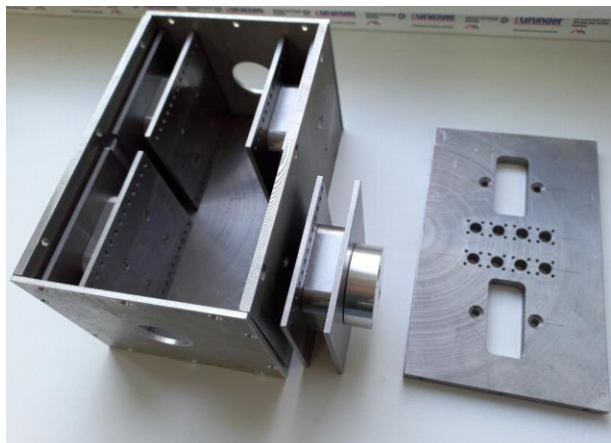
Сигнал ТоF'а
для водорода



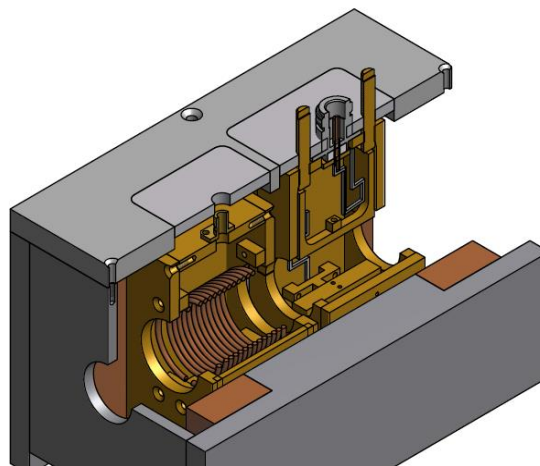
Включены ВЧ
ячейки

Газ	Переход	Частота МГц	Ток в катушке статического поля А	Эффективность %
Водород	SFT 2-4	1431	0.26	95%
Дейтерий	SFT 2-6	387	0.18	98%
Дейтерий	SFT 3-5	387	0.56	94%

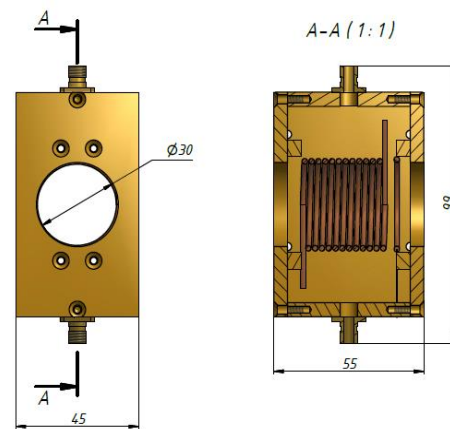
Универсальная MFT ячейка сверхтонких переходов (APol)



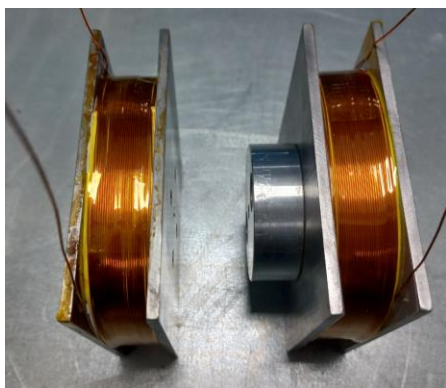
Магнитное ярмо



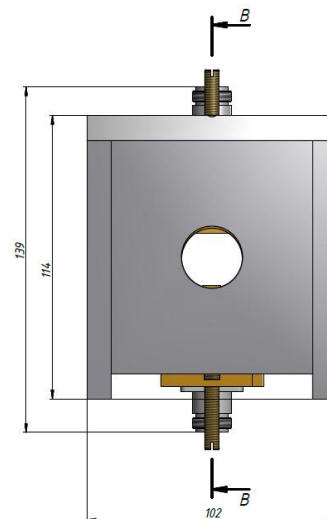
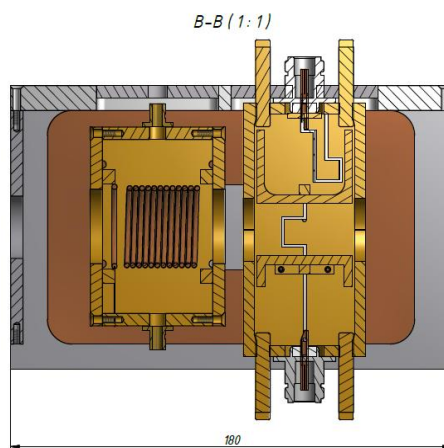
Модель MFT ячейки



Модель резонатора



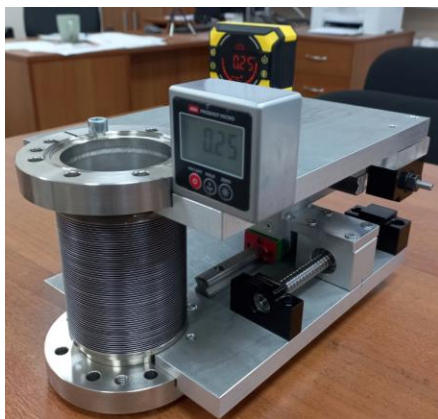
Катушки статического
поля



Система измерения интенсивности и профиля атомного пучка

$$\frac{\partial N_{D_2}}{\partial t} = \frac{V_{cal} \cdot \mu_{D_2}}{m_{D_2} \cdot R \cdot T_{cal}} \cdot \frac{\partial P_{cal}}{\partial t}$$

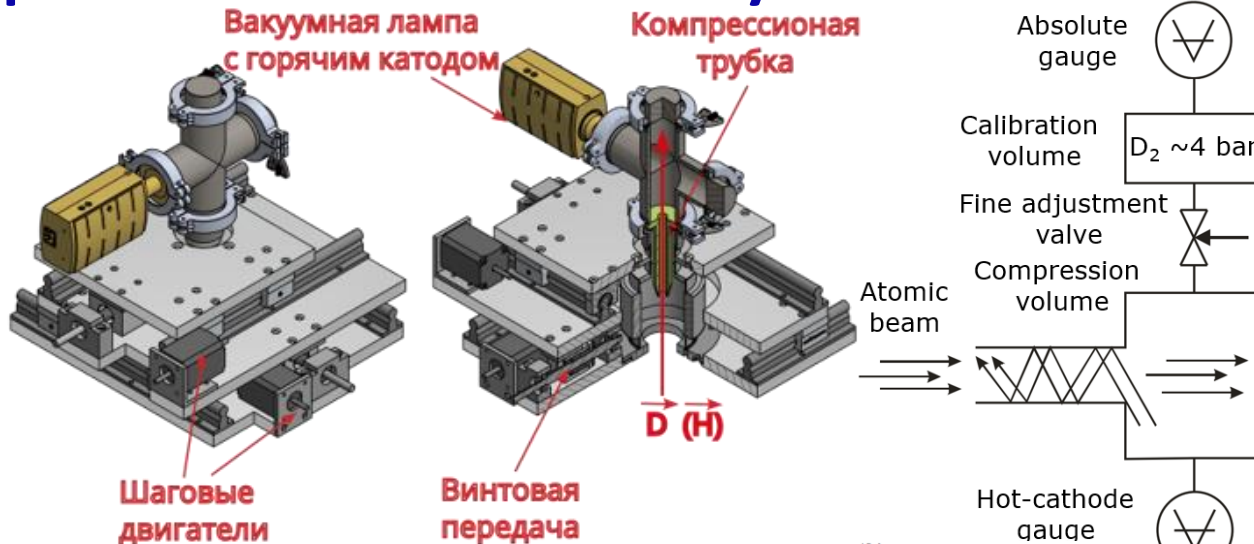
Формула для расчета



Двухосевой манипулятор



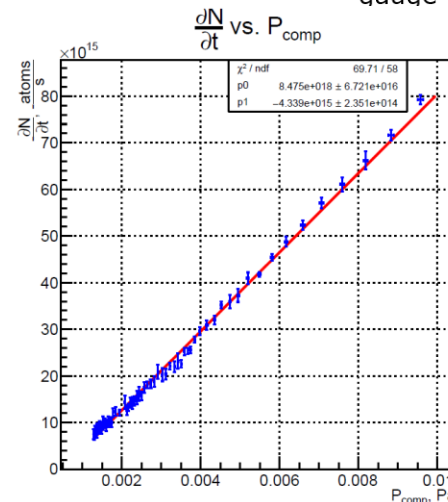
Контроллер B-RAX 3400



ВА 601



Калибровочный объем



Пример калибровочной кривой

SPI Зарядо-обменный ионизатор

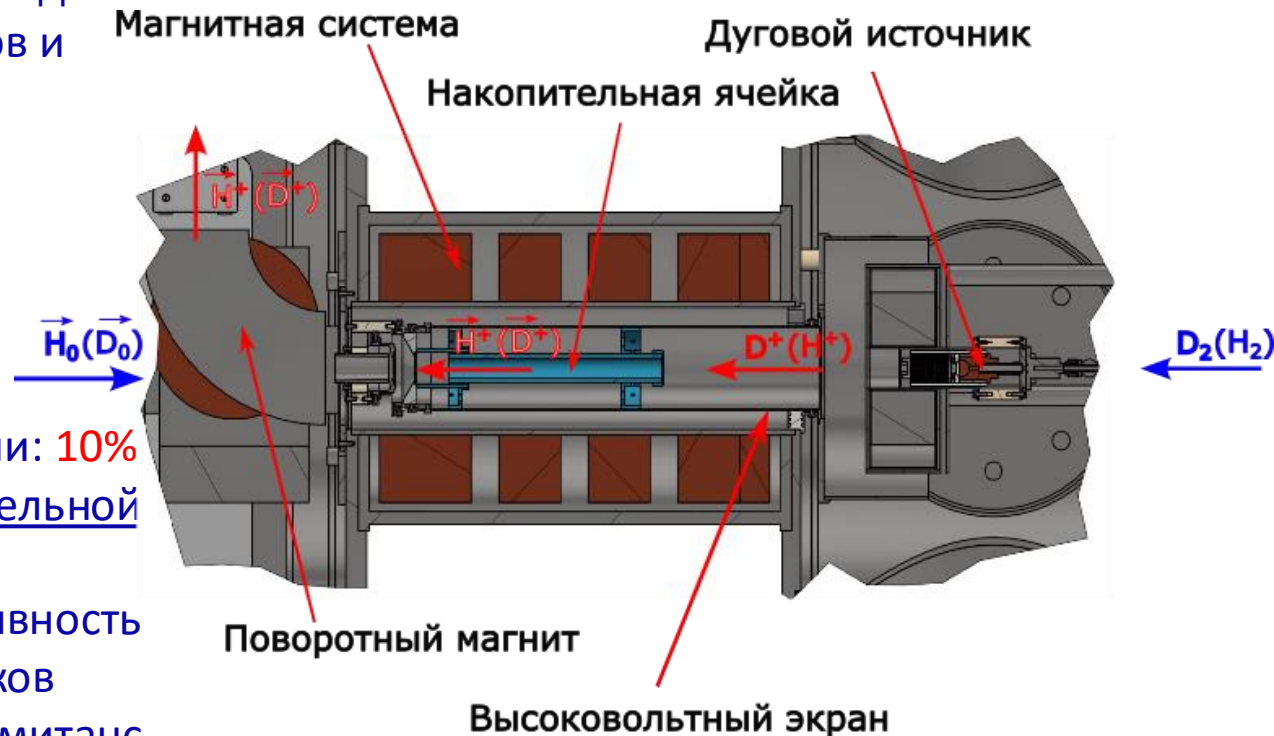
- Зарядо-обменная реакция для поляризованных протонов и дейтронов:



$$(\sigma \sim 5 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2)$$

- Эффективность ионизации: **10%**
- Использование накопительной ячейки позволило:

- Увеличить интенсивность поляризованных D^+ (H^+) пучков
- Уменьшить иммитанс поляризованных пучков
- Значительно сократить поток H_2^+ молекулярных ионов в пучке, который сложно отделить от ионов D^+ .



- Энергия поляризованных ионов **25 – 26 KeV**
- Нормализованный эмиттанс **1.2 π mm mrad**
- Длительность импульса **100 μs**
- Частота импульсов **0.2 Hz**

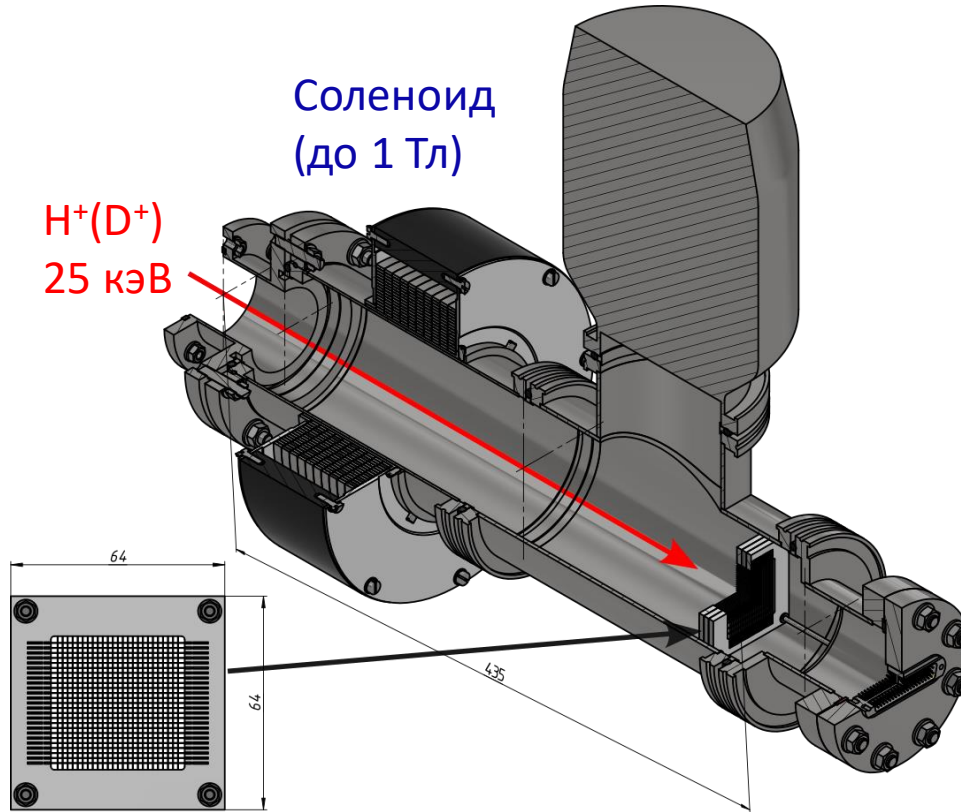
Измеритель иммитанса H_2^+ , D^+ и H^+ пучков

Турбомолекулярный

насос

Соленоид
(до 1 Тл)

$H^+(D^+)$
25 кэВ



Измерительная
рамка по двум
осям X и Y (35x35)

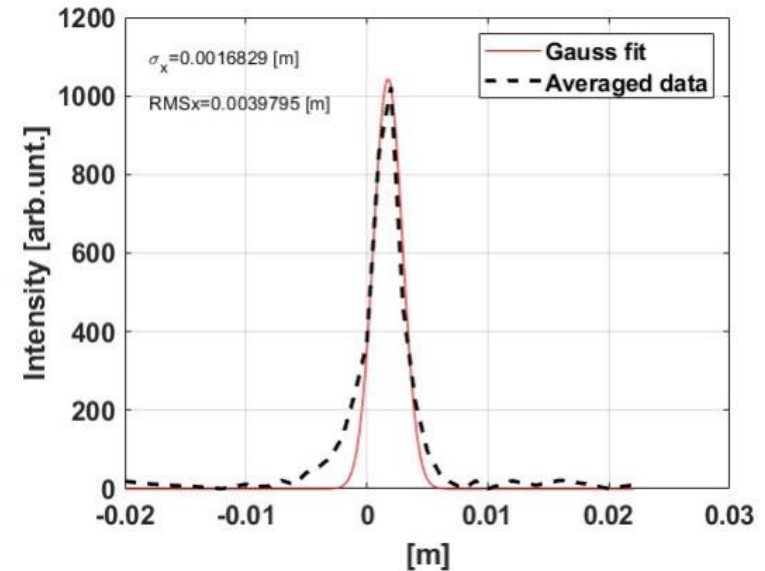
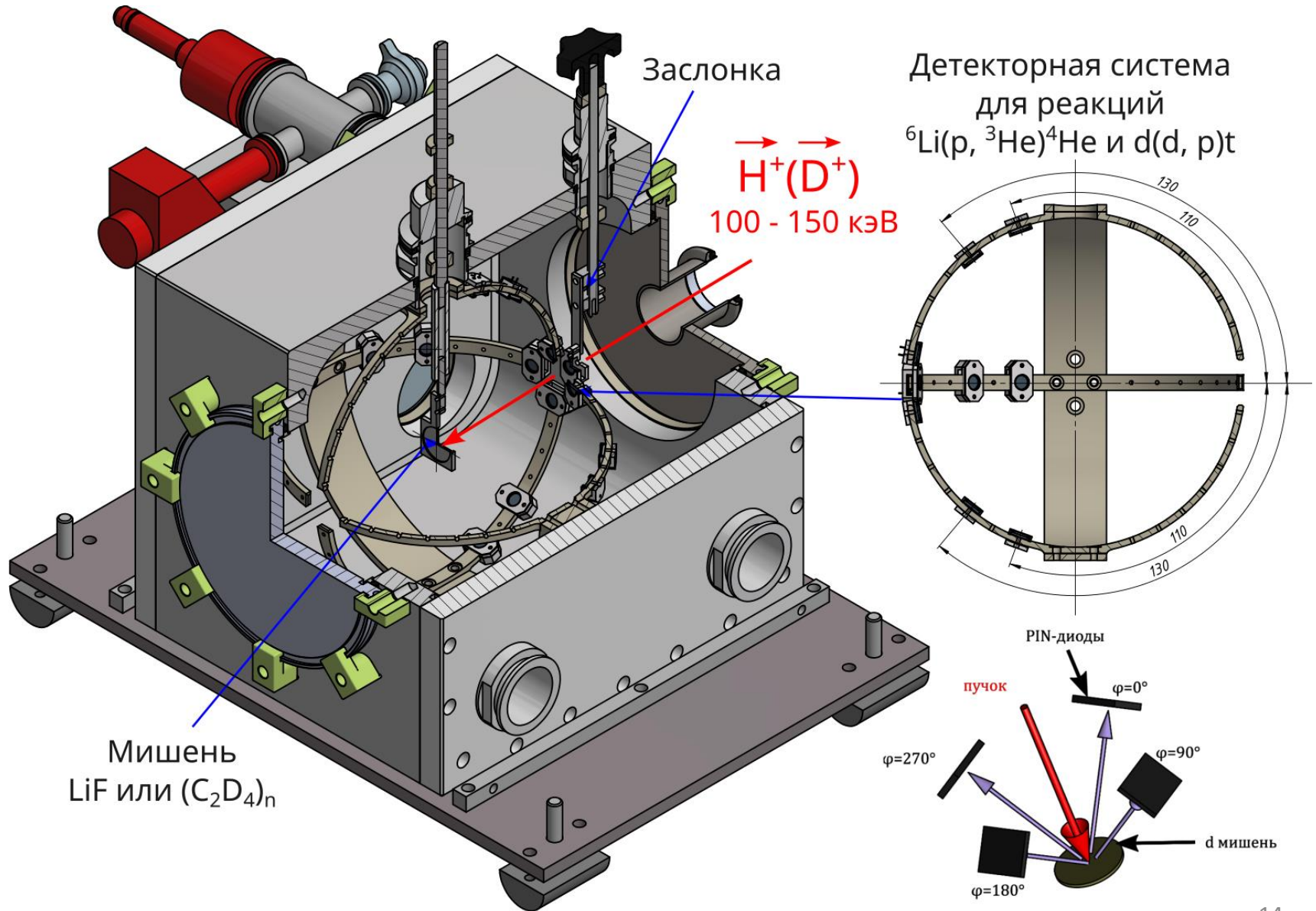


Рисунок 1 - Пример профиля
пучка снятый на установки
HiLAC в 2023.

Shpakov V., "Technical note
regarding the emittance
measurements at HiLAC", 2024.

Nuclear Reaction Polarimeter (NRP)



NICA Абсолютный Поляриметр

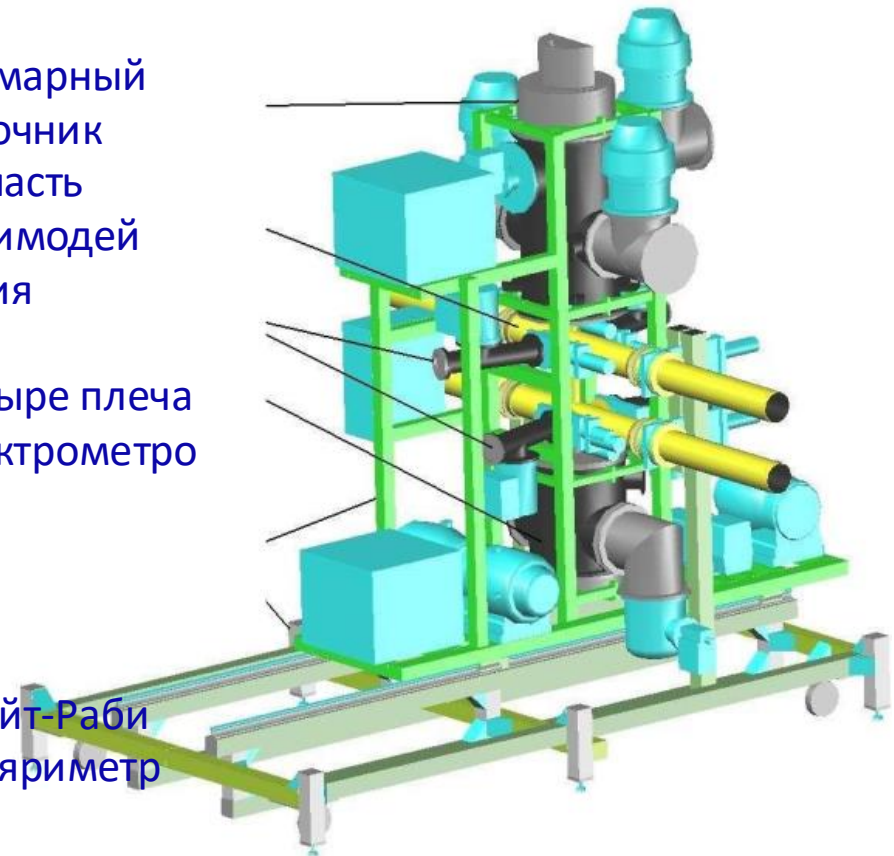
Для измерения абсолютных значений поляризации протонов или дейтронов на кольцах коллайдера NICA строится абсолютный поляриметр APol с внутренней поляризованной мишенью из атомарного водорода/дейтерия.

APol состоит из:

- Атомарный источник
- Область взаимодействия
- Четыре плеча спектрометра
- Брейт-Раби поляриметр



APol фото



APol 3D вид

Основные рабочие параметры APol:

- производительность H₂/D₂

$$Q = 1 \text{ торр} \cdot \text{л/с} = 3,4 \cdot 10^{19} \text{ молекул/с} = 6,8 \cdot 10^{19} \text{ атом/с}$$

- температура сопла $T_N = 80^\circ\text{K}$

- скорость истечения сопла (=скорость звука):

$$\text{для водорода} - c_H = (\gamma k_B T / m_H)^{0.5} = 1 \text{ км/с}$$

$$\text{для дейтерия} - c_D = (\gamma k_B T / m_D)^{0.5} = 0.75 \text{ км/с}$$

$$\text{число Маха в атомном пучке} M = 2,9$$

- наиболее вероятная скорость для распределения скоростей атомного пучка:

$$\text{для водорода} - 1940 \text{ м/с}$$

$$\text{для дейтерия} - 1370 \text{ м/с}$$

- температура пучка (=ширина распределения скоростей) $T = 23^\circ\text{K}$

- магнитное поле полюсного наконечника секступольных магнитов Nd-Fe-B $B_0 = 1,5\text{T}$

- интенсивность атомного пучка в области взаимодействия – 10^{17} атом/с

- толщина мишени атомного пучка в точке взаимодействия – 10^{12} атом/см²

Текущие работы по модернизации установки и перспективы

- ❑ Модернизация **диссоциатора SPI**
- ❑ Оптимизация магнитной системы **поляризатора SPI**
- ❑ Модернизация существующего **генератора плазмы** зарядообменного ионизатора
- ❑ Разработка поляриметра низких энергий на основе реакции ${}^6\text{Li}p$ и **dd**-реакции.
- ❑ Оптимизация работы абсолютного поляриметра (**APol**):
 - Разработка и создание **MFT ячейки** поляриметра
 - Разработка системы измерения интенсивности и профиля пучка
- ❑ Оптимизация системы **транспортировки ионного пучка** SPI до RFQ
- ❑ Разработка **Lamb-Shift** поляриметра на выходе источника SPI



Спасибо за внимание