



**Измерение сечения реакции  $dd$  синтеза поляризованных  
дейтронов  
при низких (10-100 кэВ) энергиях.**

**Measurement of the cross section of the  $dd$  fusion of polarized  
deuterons at low (10-100 KeV) energies.**



Идея использования поляризованных частиц для термоядерного синтеза в реакциях обсуждалась в

При этом основными задачами использования поляризованных дейтронов являются:

- прекращение или подавление реакций с выходом нейтронов в пользу реакции с заряженными частицами;
- изменение углового распределения частиц – продуктов реакций;
- увеличение сечения реакции.



Основными “игроками” в реакциях термоядерного синтеза являются:

$^3\text{H}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $\text{D}$ .

Все они поляризуются известными методами!

Реакцию



мы не рассматриваем, так как не получить достаточной светимости методиками газовых пучков и мишеней.

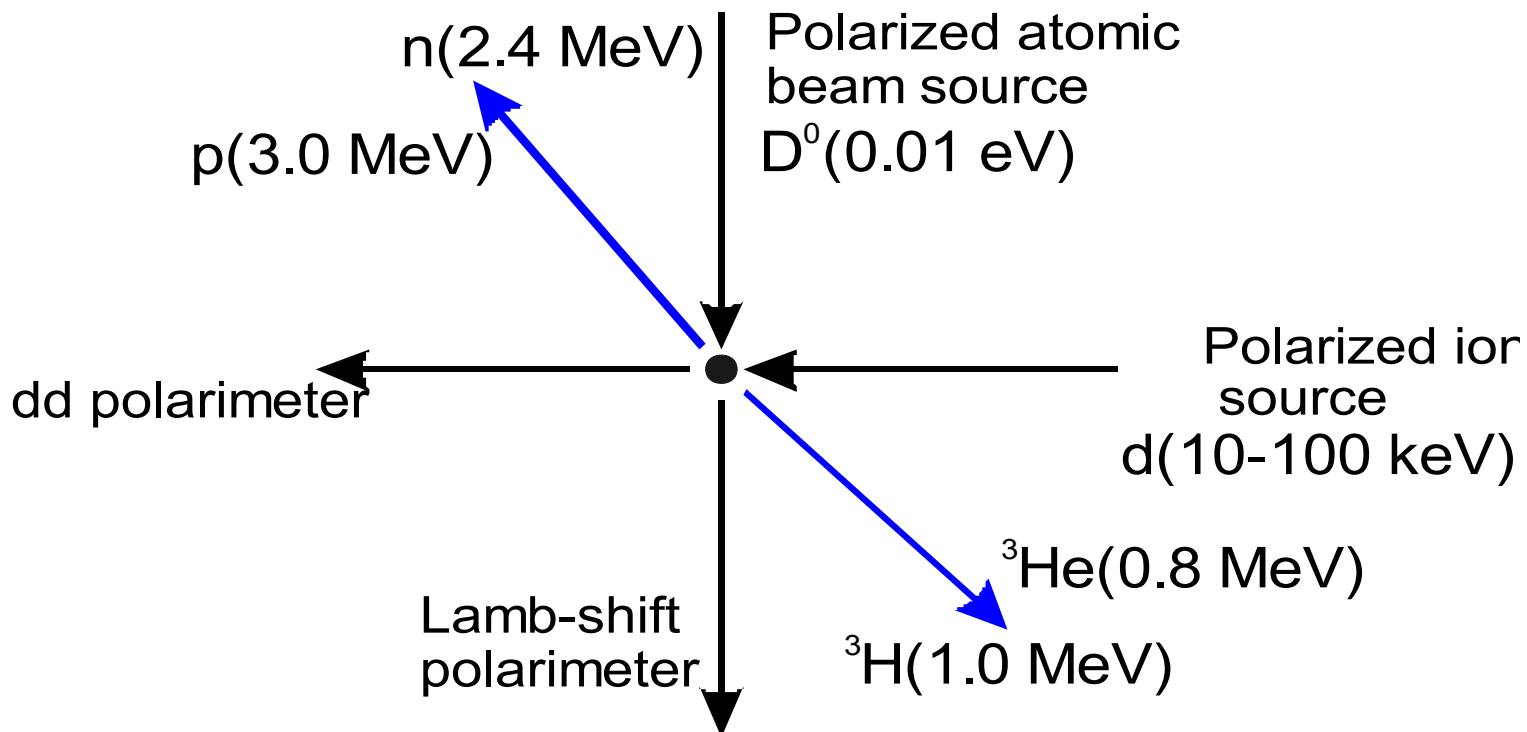
Реакцию



мы рассматриваем возможным следующим этапом эксперимента, хотя она изучена неплохо.



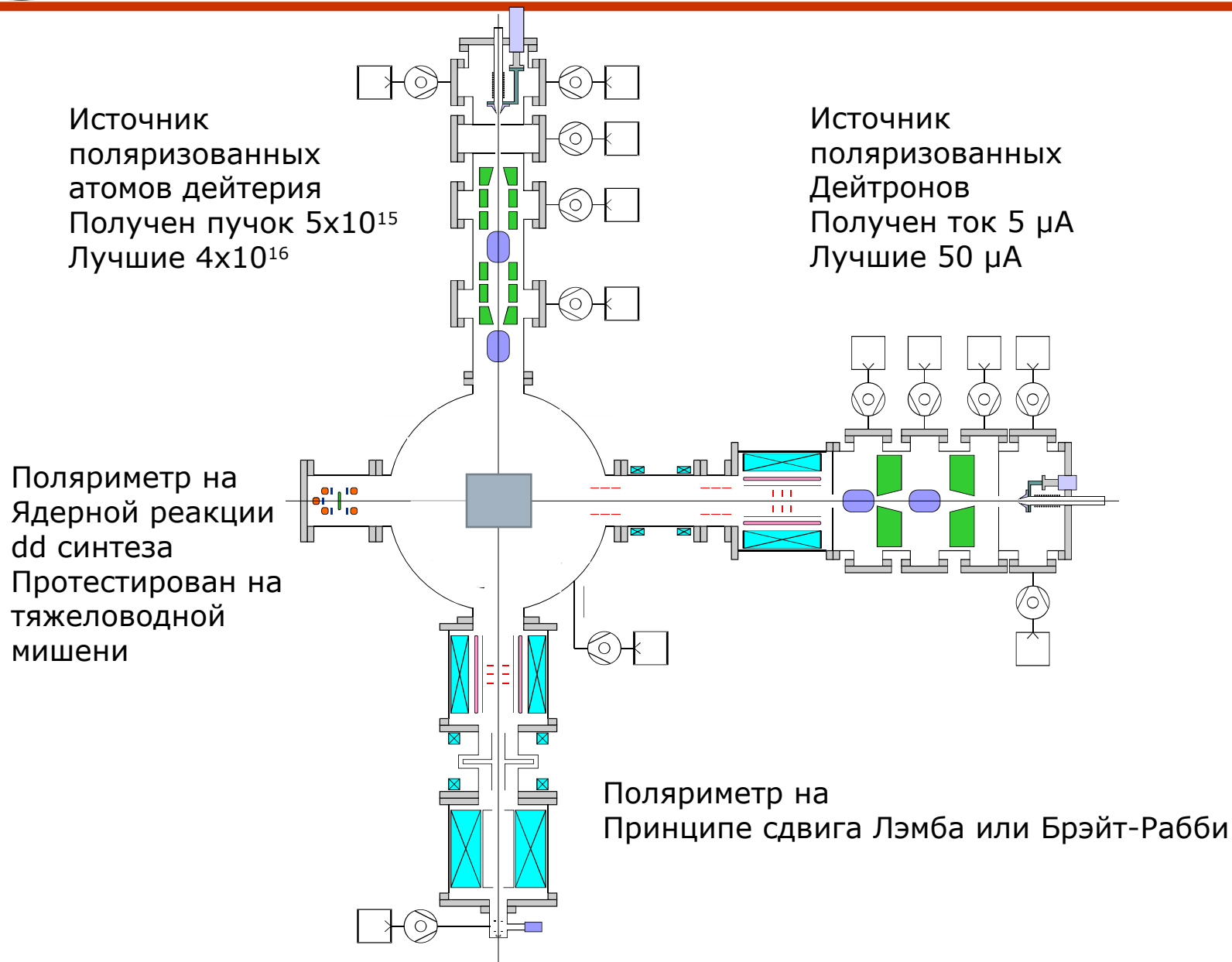
Задачей предлагаемого проекта является исследование 4-х нуклонных реакций в dd синтезе с поляризованными дейтронами

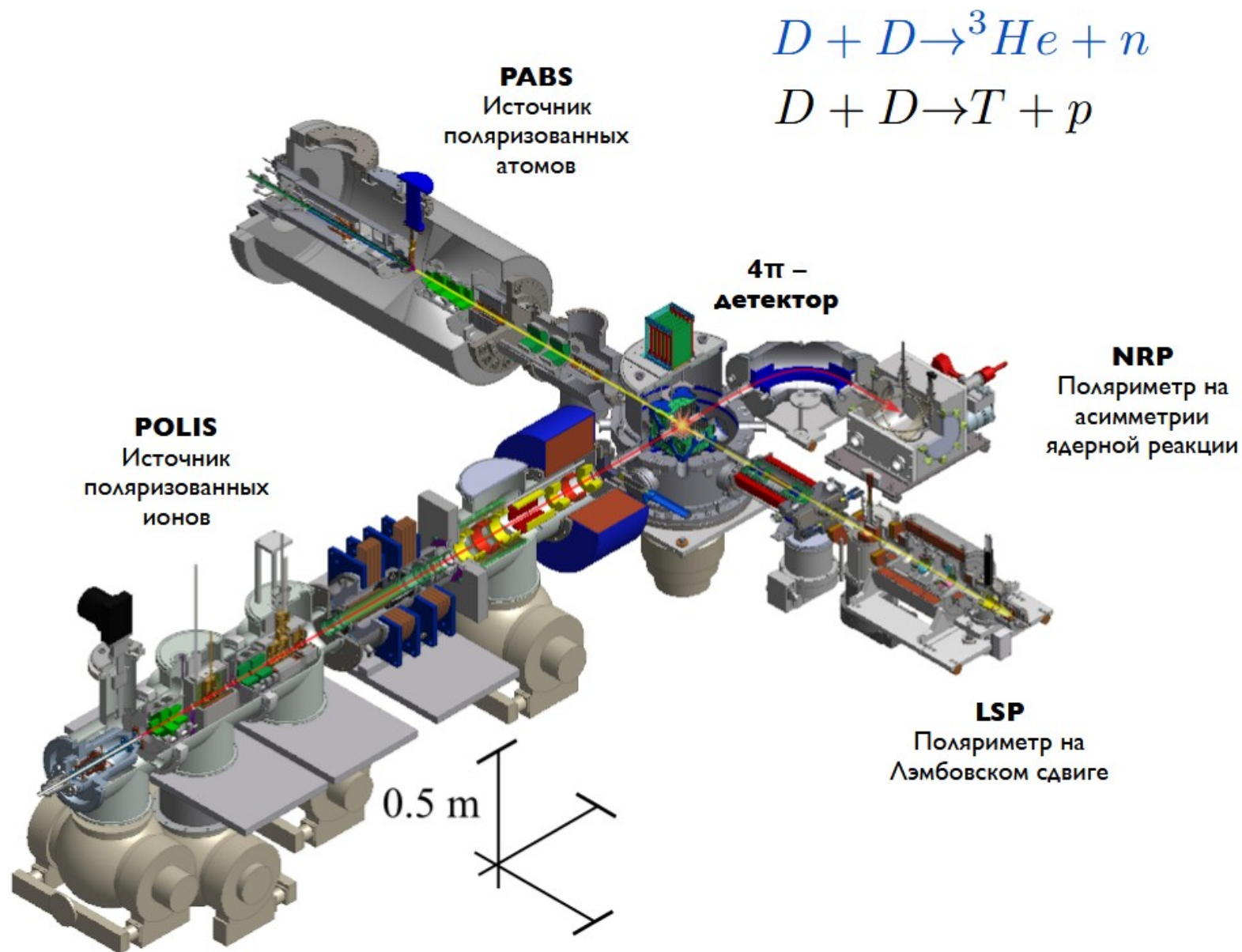


**Предлагаемый эксперимент будет первым экспериментом при низких энергиях, в котором и мишень и налетающая частица поляризованы !**



# Структура установки







Низкий поток атомарного дейтерия

Получен пучок  $5 \times 10^{15}$  атомов/с

(Лучшие  $4 \times 10^{16}$ )

Низкий ток ионов дейтерия

Получен ток 5  $\mu\text{A}$

(Лучшие 50  $\mu\text{A}$ )

Заложим в расчёт времени набора статистики следующие параметры  
(пучок с электронной поляризацией, но без ядерной)

- источник поляризованных атомов дейтерия

Интенсивность:  $10^{16}$  at/s

Размер :  $\varnothing 10$  mm

Скорость : 1000 m/s

Векторная поляризация :  $\pm 0.7$

Это позволяет сделать мишень с плотностью:  $10^{11}$  at/cm<sup>2</sup>

- источник поляризованных дейтронов

Ток источника: 30  $\mu\text{A}$

Размер :  $\varnothing 10$  mm

Энергия : 10-100 keV

Векторная поляризация :  $\pm 0.7$



Энергия, keV	Сечение, mbn	Светимость, 1/min	Время набора 10000, h
10	0.09	0.17	988
20	0.27	0.51	329
30	1.16	2.18	77
40	2.27	4.26	39
50	4.65	8.72	19
60	6.93	12.99	13
70	9.24	17.33	10
80	11.38	21.34	8
90	14.08	26.40	6
100	16.44	30.83	5

На сегодняшний день светимость ниже «запланированной» в 12 раз.

При наборе поляризованных сечений время набора надо умножить еще на 9 (2/3 атомов и ионов дейтерия с «неправильной» ядерной поляризацией отсеиваются).

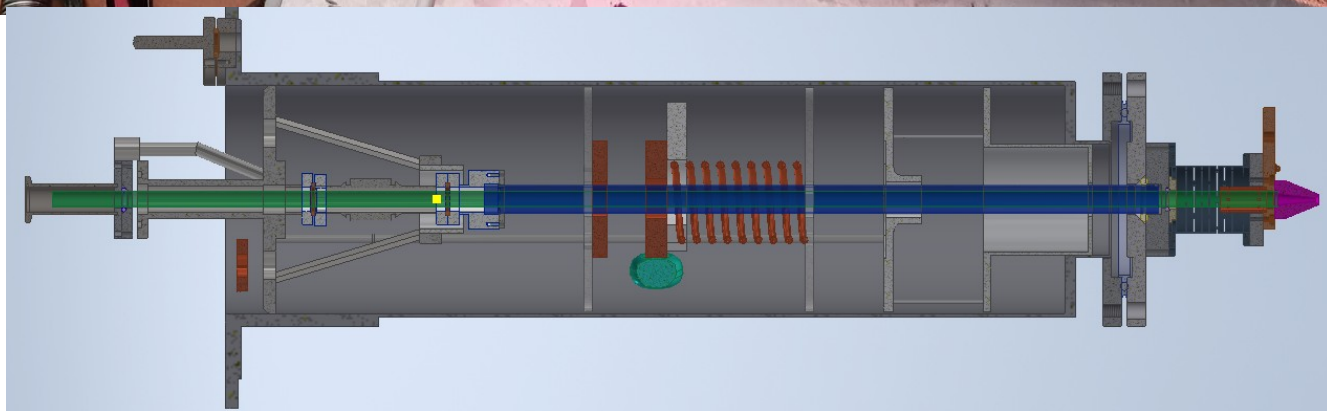
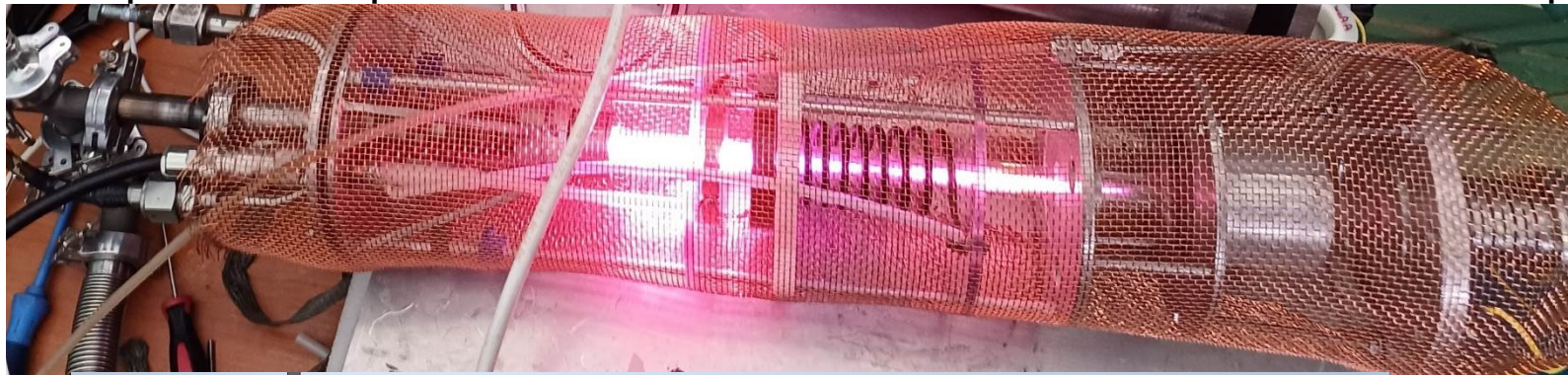
Для самой возможности проведения эксперимента требуется повышение интенсивностей на два порядка!





# Диссоциатор

Диссоциатор – устройство для получения атомарного водорода или дейтерия. Поляризованный источник начинается с диссоциатора.



Процессы в диссоциаторе

$\text{H}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{H} + \text{H} + \text{e}^-$  основной «нужный» процесс

«Паразитные» процессы

$\text{H}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2^* + \text{e}^-$

$\text{H}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2^+ + 2\text{e}^-$        $\text{H}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{H}^+ + \text{H} + 2\text{e}^-$

Основной критерий «нужного» процесса – энергия электрона плазмы

$4.478 \text{ eV} < E(\text{e}^-) < 15.4 \text{ eV}$



## Требования к диссоциатору

$$4.478 \text{ eV} < E(e^-) < 15.4 \text{ eV}$$

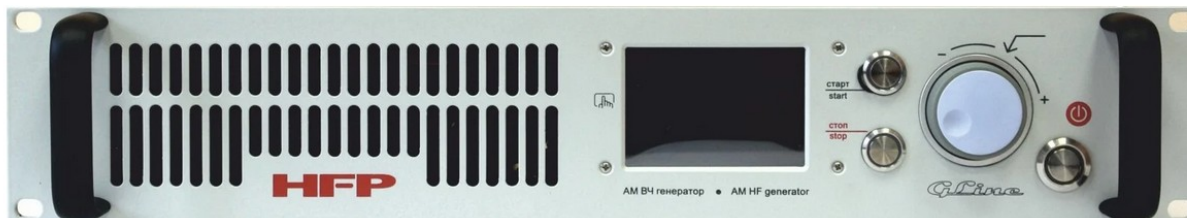
Основная проблема на сегодняшний день – низковольтный генератор 13.6 MHz.

У нас 500W генератор 158 V.

Требуется (использовался в Юлихе) 500W 1500V.

Доступен в ООО «Мощная радиотехника» (Воронеж).  
Около 3 млн. рублей.

В нынешней комплектации получение «разумной» интенсивности атомарного пучка невозможно.



ВЧ генераторы **GLine** с выходной мощностью 0,6 ... 2,0 kW в корпусе 2U.

Глубина 450мм.



# Масс спектрометр для оптимизации атомарного пучка

$H+H_2$   
 $D+D_2$

Ионизатор

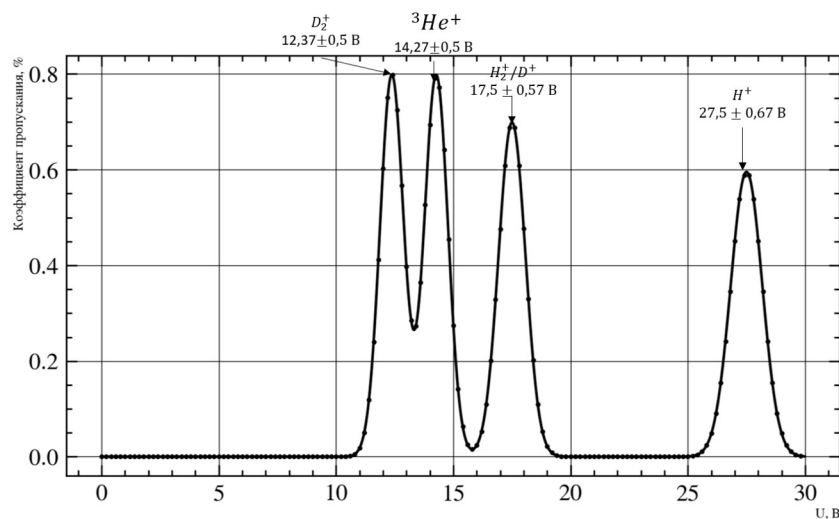
Масс –фильтр

Система детектирования ионов

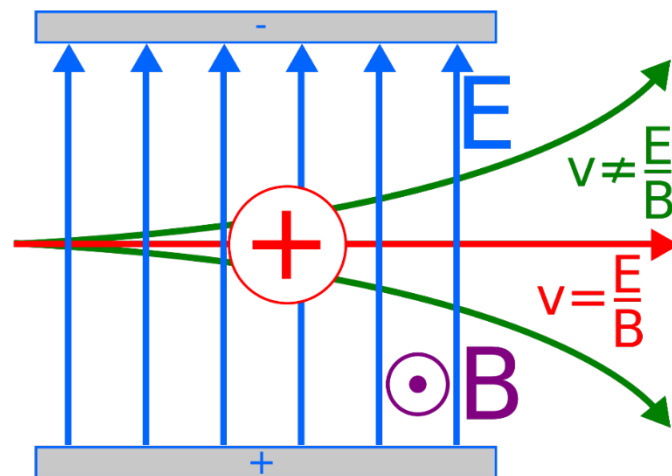
Ионизация электронным ударом  
при энергии электрона 100eV

Система детектирования ионов –  
ячейка Фарадея.

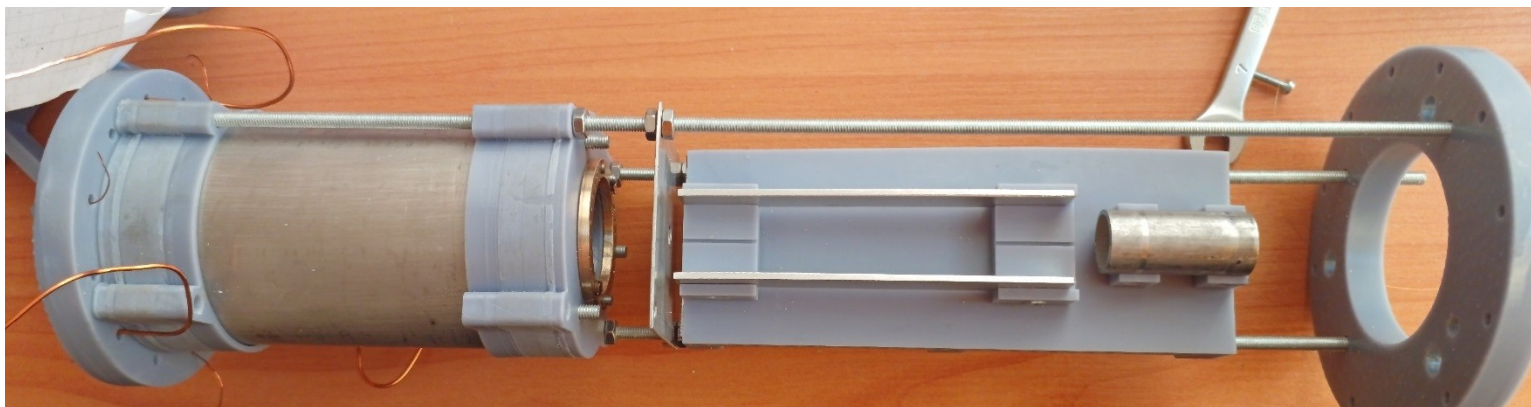
Энергия ионов 100 eV. Магнитное  
поле 220 Гс.



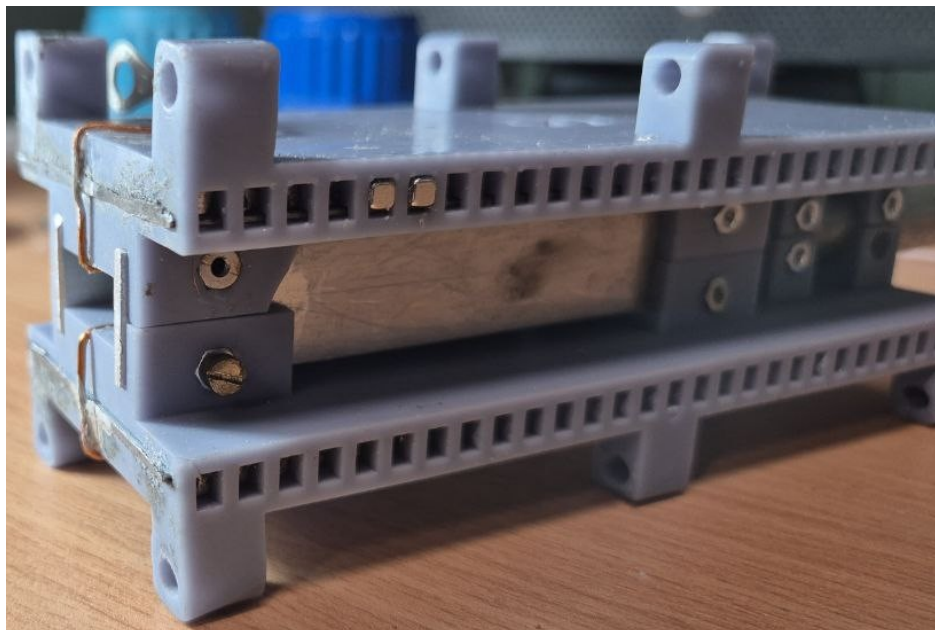
Масс –фильтр  
Фильтр Вина



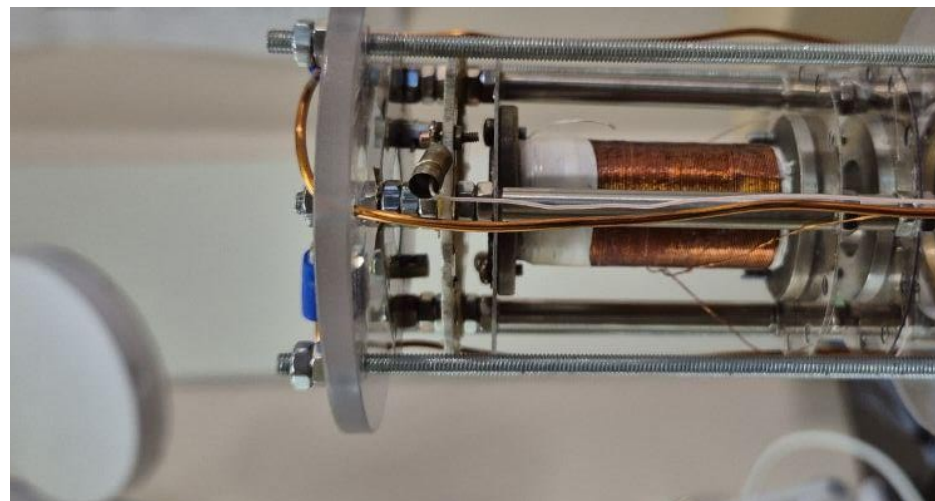
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = 0$$



Фильтр Вина



Ионизатор







## Публикации

Modeling Polarized Atomic Beam Source (PABS)

October 2025, [Physics of Particles and Nuclei Letters](#) 22(5):1157-1160

A two-axis manipulator for measuring the intensity profile of atomic and ionic beams  
Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics,  
2025, 25(2), pp. 366-372

## Доклады

Конференция «ЯДРО – 2025. Ядерная физика и физика элементарных частиц.  
Ядерно-физические технологии» (LXXV; 2025).

Новый метод измерения степени диссоциации пучков  
легких ядер и ионов

## Семинары

Systems Engineering Department, Energy Singularity (Shanghai)

Polarized Fusion project. May 2025.

Institute of Modern Physics (IMP), Chinese Academy of Sciences CAS) (Lanzhou).

Magnet system for Polarized Atomic Beam Source. April 2025.



Спасибо за внимание!

