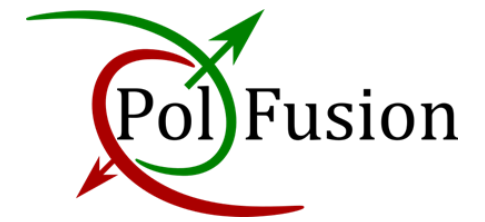




НИЦ КИ - ПИЯФ



**Поляризованные газовые мишени в
проекте по изучению ядерного
синтеза при
энергиях до 100 КэВ**

Выполнил:

В. Е. Ларионов

Руководитель:

к.ф.-м.н.,
зав. лаб. ЛКСТ

НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ,

А. А. Васильев

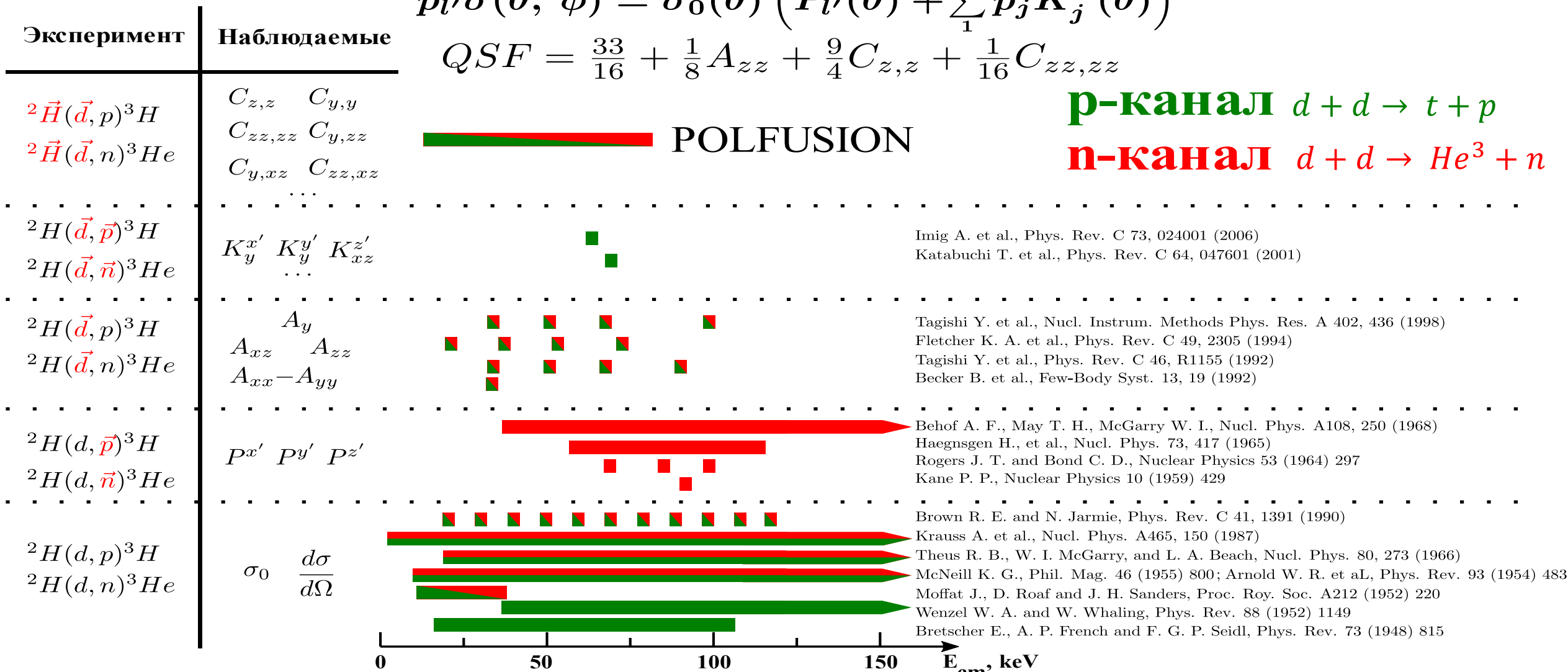


Эксперимент PolFusion

$$\sigma(\theta, \phi) = \sigma_0(\theta) \left(1 + \sum_1^9 p_j^b A_j^b(\theta) + \sum_1^9 p_j^t A_j^t(\theta) + \sum_1^9 \sum_1^9 p_j^b p_k^t C_{j,k}(\theta) \right)$$

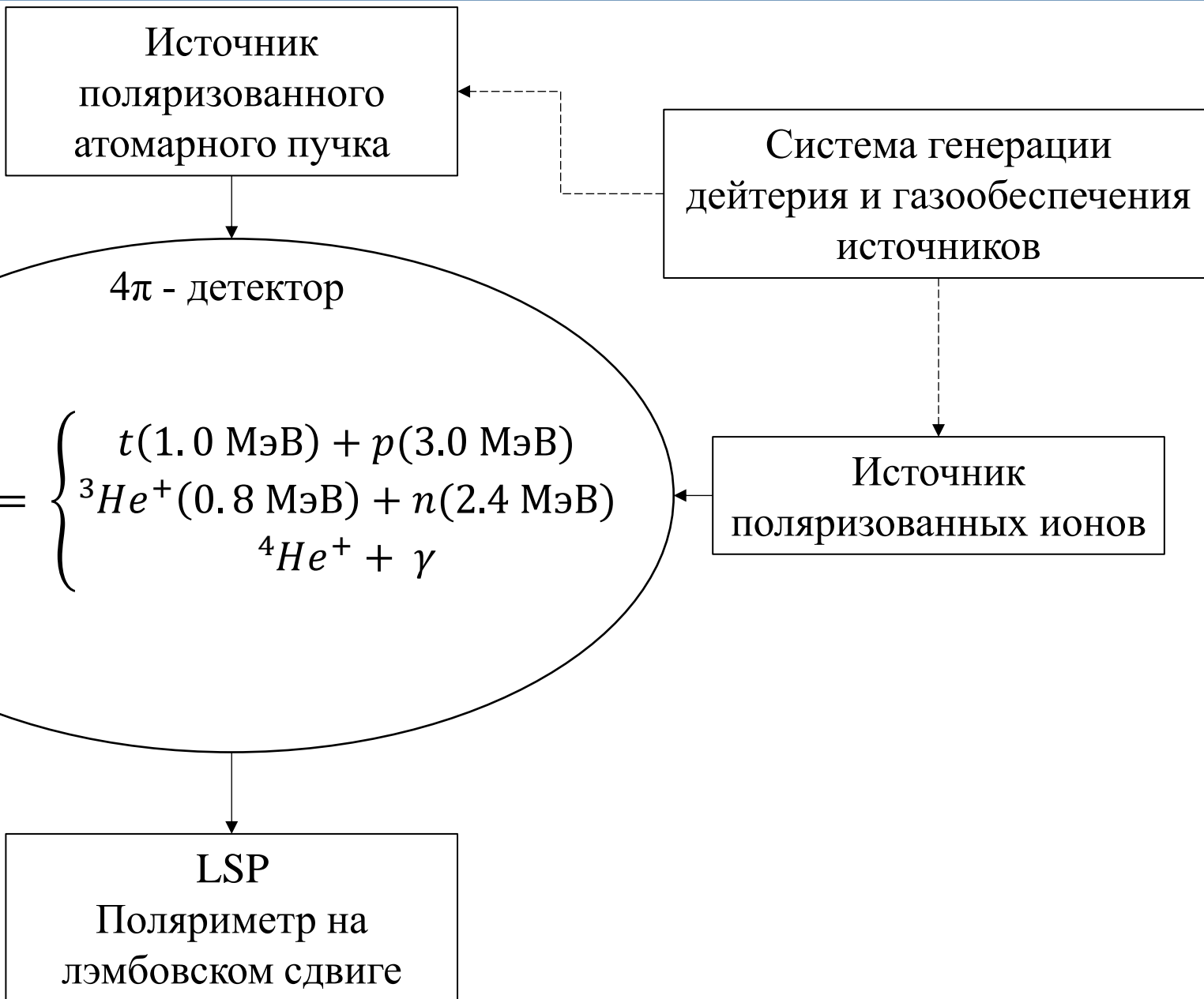
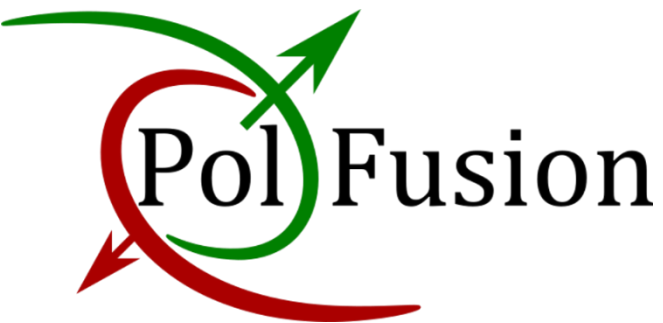
$$p_{l'} \sigma(\theta, \phi) = \sigma_0(\theta) \left(P_{l'}(\theta) + \sum_1^9 p_j K_j^{l'}(\theta) \right)$$

$$QSF = \frac{33}{16} + \frac{1}{8} A_{zz} + \frac{9}{4} C_{z,z} + \frac{1}{16} C_{zz,zz}$$





Эксперимент PolFusion





Эксперимент PoIFusion

PABS
Поляризованный
атомарный источник

POLIS
Поляризованный
ионный источник

4 π – детектор

Ионизатор

NRP
Поляриметр на
асимметрии
ядерной реакции

LSP
Поляриметр на
лэмбовском
сдвиге

0.5 m

The diagram illustrates the experimental setup for PoIFusion. It features a central ion source (Ионизатор) surrounded by a 4π detector (4π – детектор). Two polarimeters are positioned around the detector: NRP (Поляриметр на асимметрии ядерной реакции) and LSP (Поляриметр на лэмбовском сдвиге). The PABS (Поляризованный атомарный источник) and POLIS (Поляризованный ионный источник) are also shown. A scale bar indicates 0.5 m.



Цель:

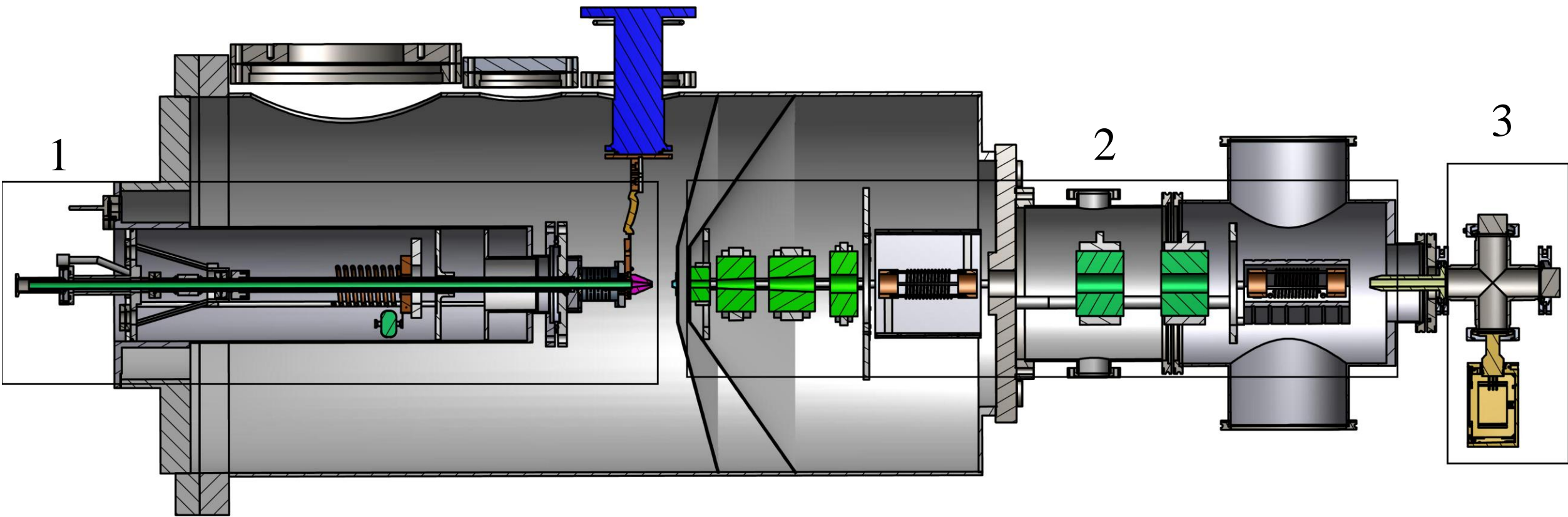
Создание установки для получения поляризованной дейтериевой мишени

Задачи:

1. Разработка диссоциатора
2. Моделирование поляризатора методом Монте-Карло
3. Разработка поляризатора
4. Оптимизация источника атомарного поляризованного пучка

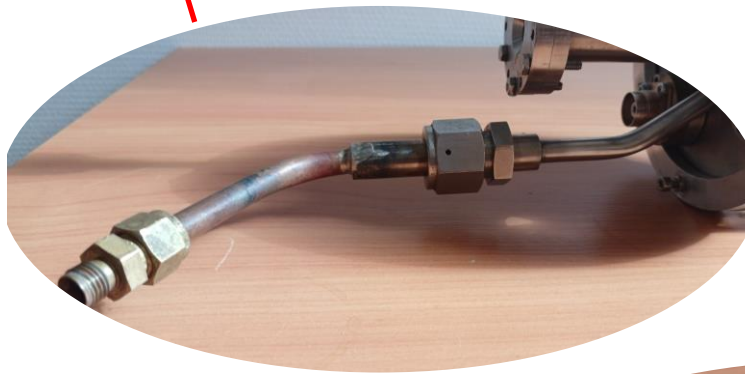
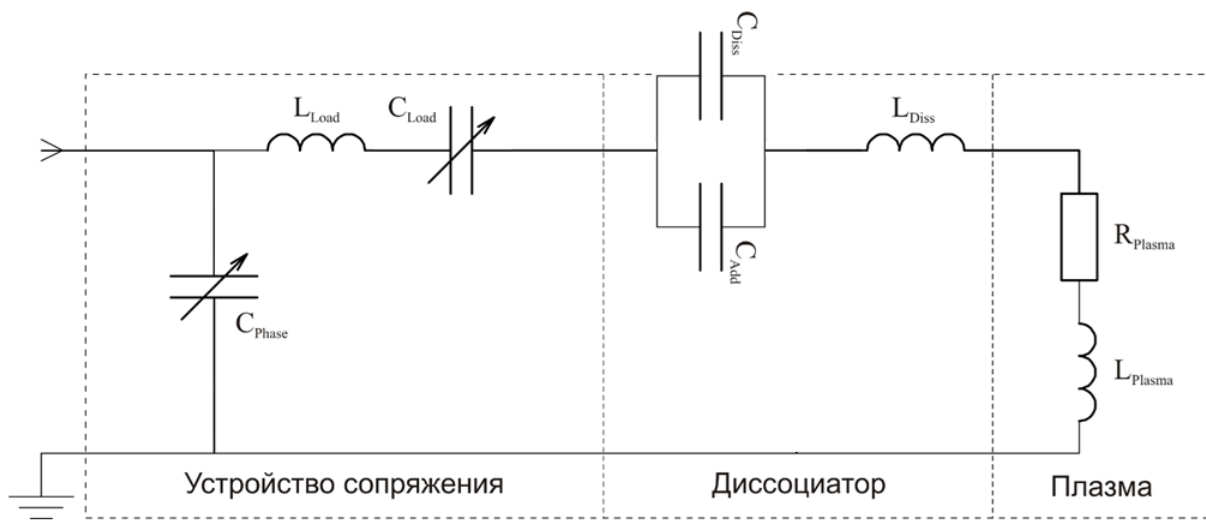
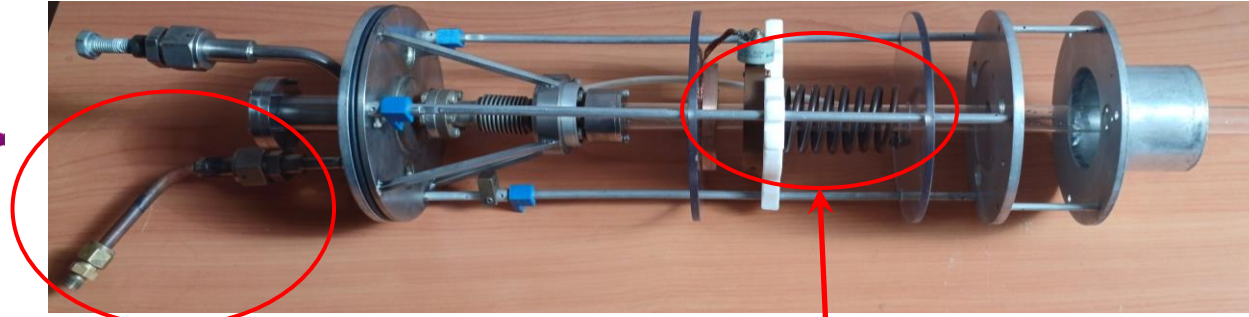
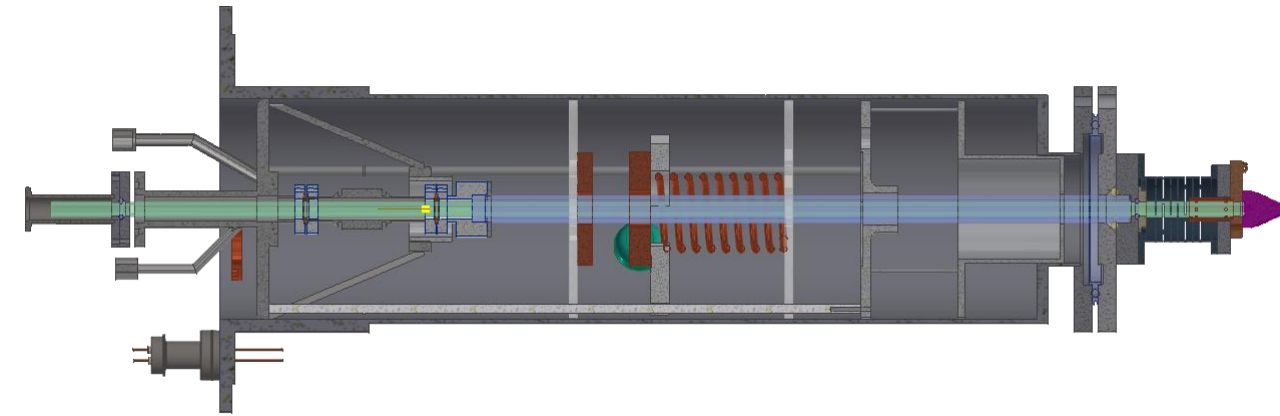


Источник атомарного поляризованного пучка



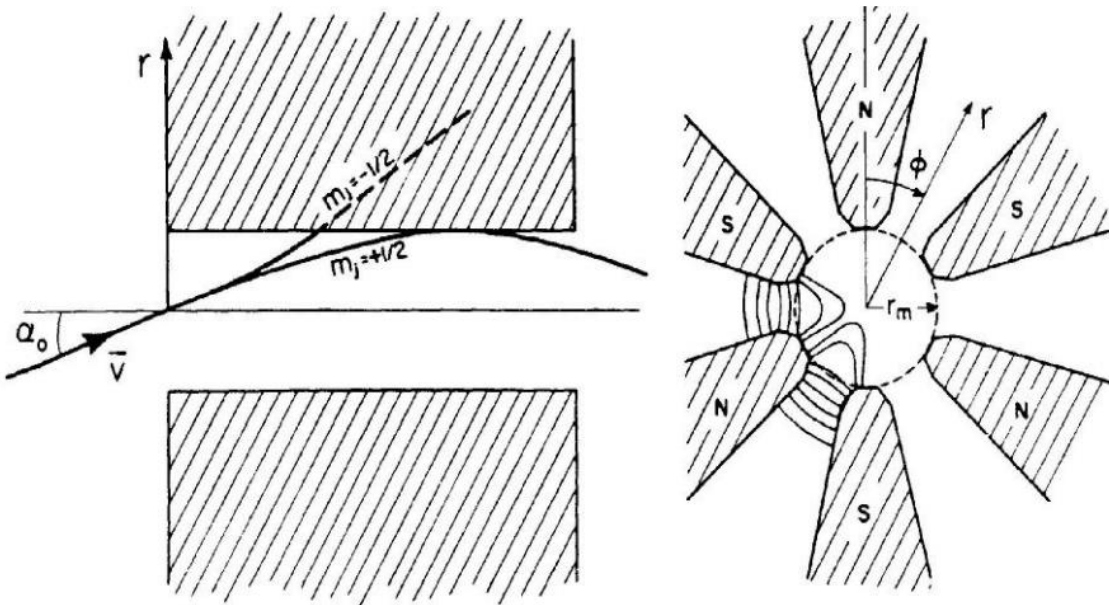
1. Радиочастотный диссоциатор
2. Поляризатор
3. Компрессионная трубка

Высокочастотный диссоциатор





Магнитные линзы



Секступольный магнит, используемый в ABS.
 Атом, влетающий в магнит с $r = 0$
 под углом α_0 , изображен слева; справа показано
 несколько силовых линий

$$1. \frac{d^2 \vec{r}^1}{dt^2} = \frac{1}{m} B_0 \left(\frac{N}{2} - 1 \right) \frac{(\mu_e + \mu_d)}{r_0^{\frac{N}{2}-1}} r^{\frac{N}{2}-2}$$

$$2. \frac{d^2 \vec{r}^2}{dt^2} = \frac{1}{2m} \left(\mu_d - \frac{-A_d \mu_c + \mu_c^2 B}{\sqrt{9A_d^2 - 2A_d \mu_c B + \mu_c^2 B^2}} \right) B_0 \left(\frac{N}{2} - 1 \right) \frac{r^{\frac{N}{2}-2}}{r_0^{\frac{N}{2}-1}}$$

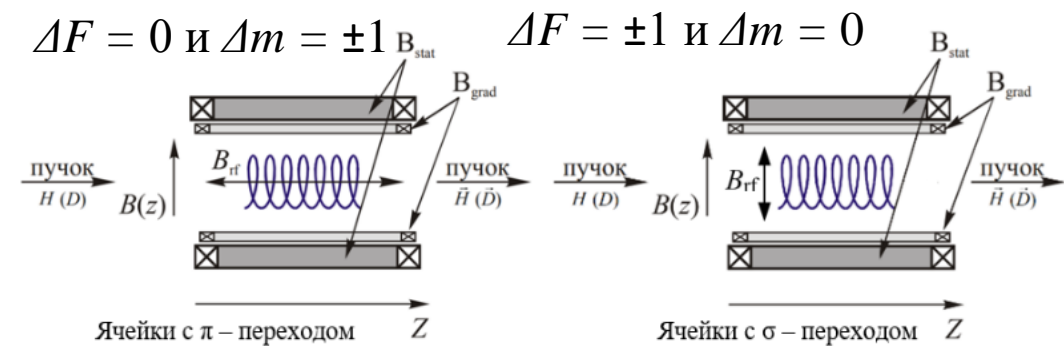
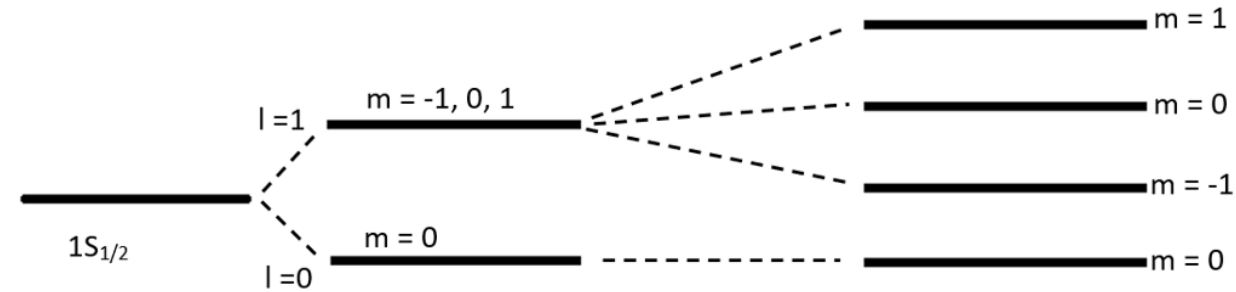
$$3. \frac{d^2 \vec{r}^3}{dt^2} = \frac{1}{2m} \left(-\mu_d - \frac{A_d \mu_c + \mu_c^2 B}{\sqrt{9A_d^2 + 2A_d \mu_c B + \mu_c^2 B^2}} \right) B_0 \left(\frac{N}{2} - 1 \right) \frac{r^{\frac{N}{2}-2}}{r_0^{\frac{N}{2}-1}}$$

$$4. \frac{d^2 \vec{r}^4}{dt^2} = -\frac{1}{m} B_0 \left(\frac{N}{2} - 1 \right) \frac{(\mu_e + \mu_d)}{r_0^{\frac{N}{2}-1}} r^{\frac{N}{2}-2}$$

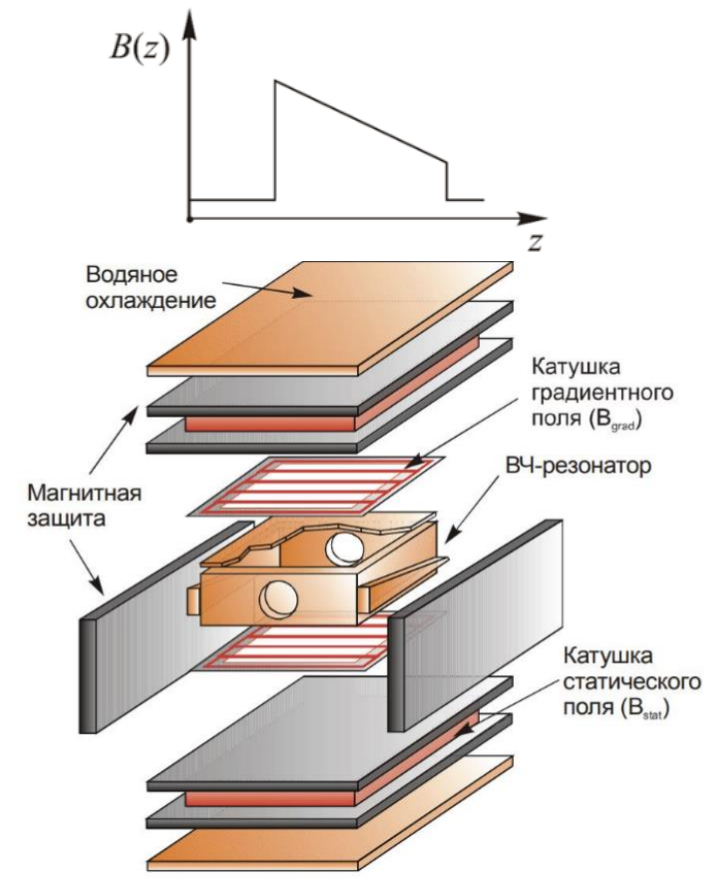
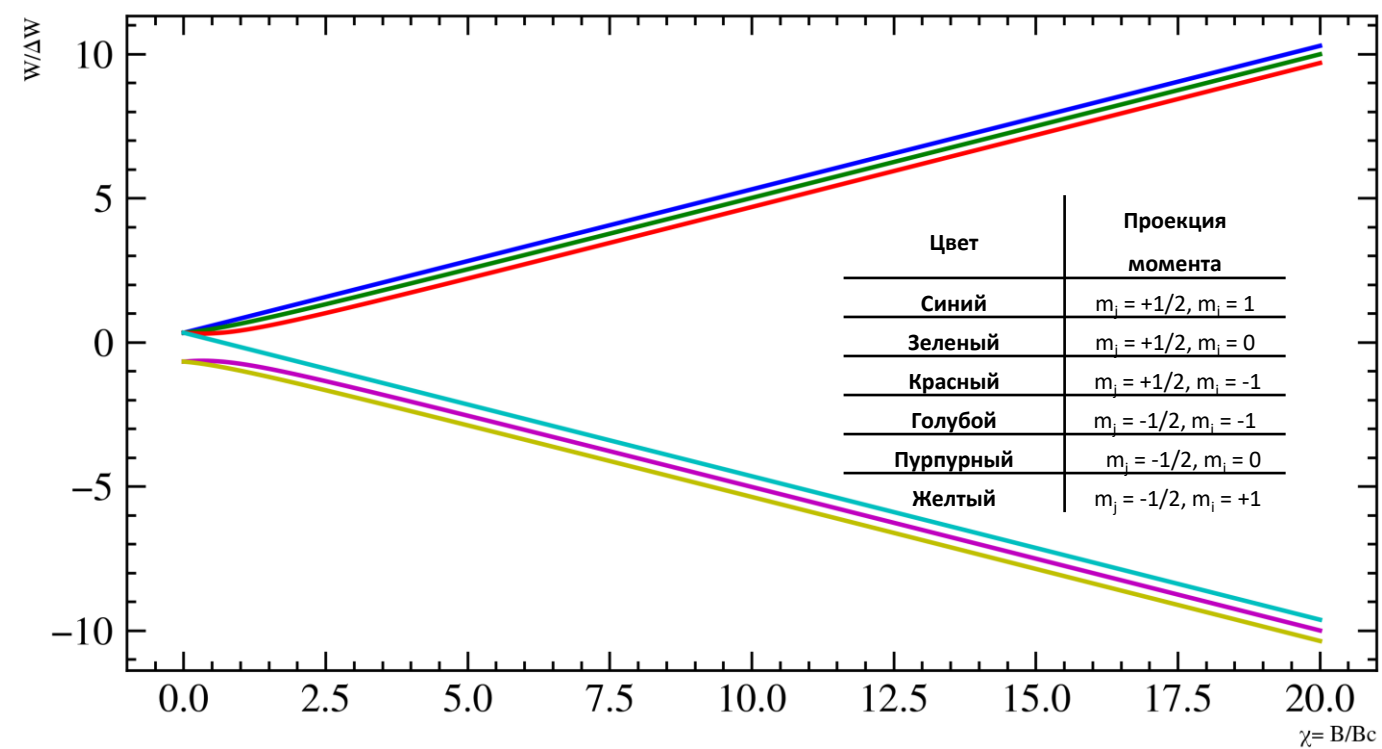
$$5. \frac{d^2 \vec{r}^5}{dt^2} = \frac{1}{2m} \left(-\mu_d + \frac{A_d \mu_c + \mu_c^2 B}{\sqrt{9A_d^2 + 2A_d \mu_c B + \mu_c^2 B^2}} \right) B_0 \left(\frac{N}{2} - 1 \right) \frac{r^{\frac{N}{2}-2}}{r_0^{\frac{N}{2}-1}}$$

$$6. \frac{d^2 \vec{r}^6}{dt^2} = \frac{1}{2m} \left(\mu_d + \frac{-A_d \mu_c + \mu_c^2 B}{\sqrt{9A_d^2 - 2A_d \mu_c B + \mu_c^2 B^2}} \right) B_0 \left(\frac{N}{2} - 1 \right) \frac{r^{\frac{N}{2}-2}}{r_0^{\frac{N}{2}-1}}$$

Ячейки сверхтонкого перехода



$$F_{in} - F_{out} = \Delta F = \pm 1, 0 \text{ и } \Delta m = \pm 1, 0$$





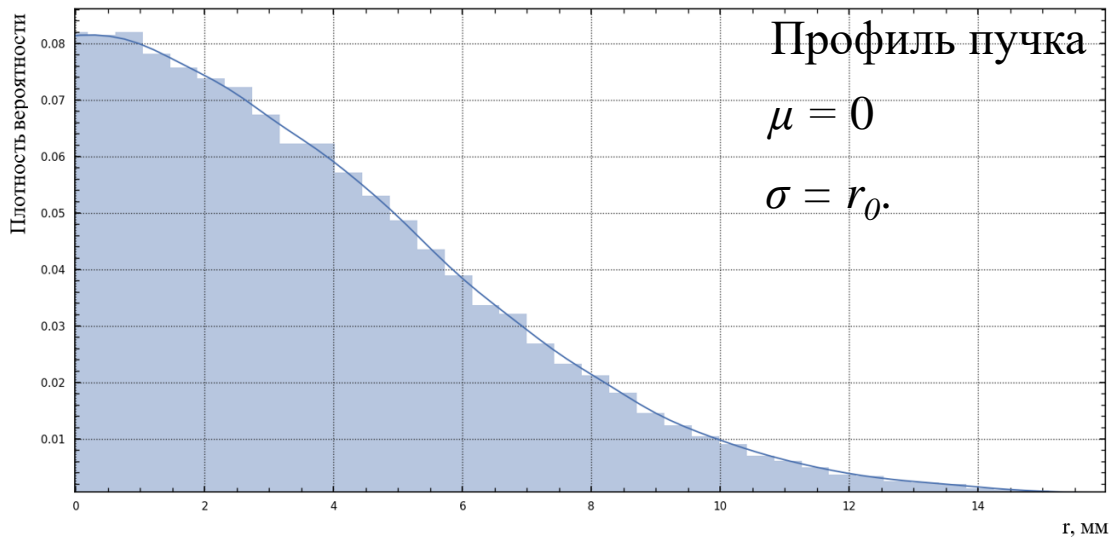
Поляризации газовой мишени

P_z	P_{zz}	Мультиполи 1		MFT1 После	Мультиполи 2		MFT2 После	m_i
		До	После		До	После		
0	+1	1		ВКЛ 2 ↔ 4			ВЫКЛ 1 3	+1 -1
		2	1		1	1		
		3	2		3	3		
		4	3		4	3		
		5						
		6						
-2/3	0	1		ВЫКЛ			ВКЛ 1 ↔ 4 2 3 4	0 -1 -1
		2	1		1	1		
		3	2		2	2		
		4	3		3	3		
		5						
		6						

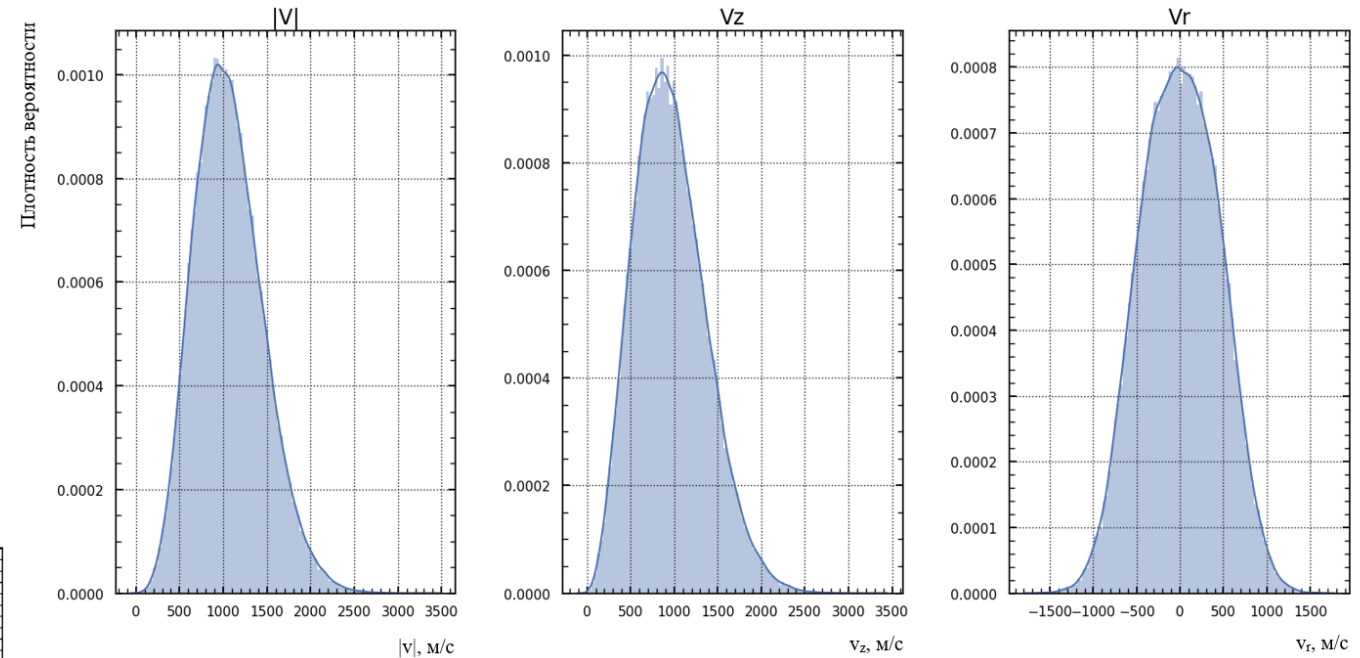
Моделирование поляризатора

Атомарный пучок задается генератором начальных событий, который рождает частицу со следующими параметрами:

1. Координата частицы (z, r)
2. Скорость частицы вдоль оси OZ v_z , и скорость вдоль оси Or v_r
3. Проекция полного атомарного спина.



Распределение по скоростям

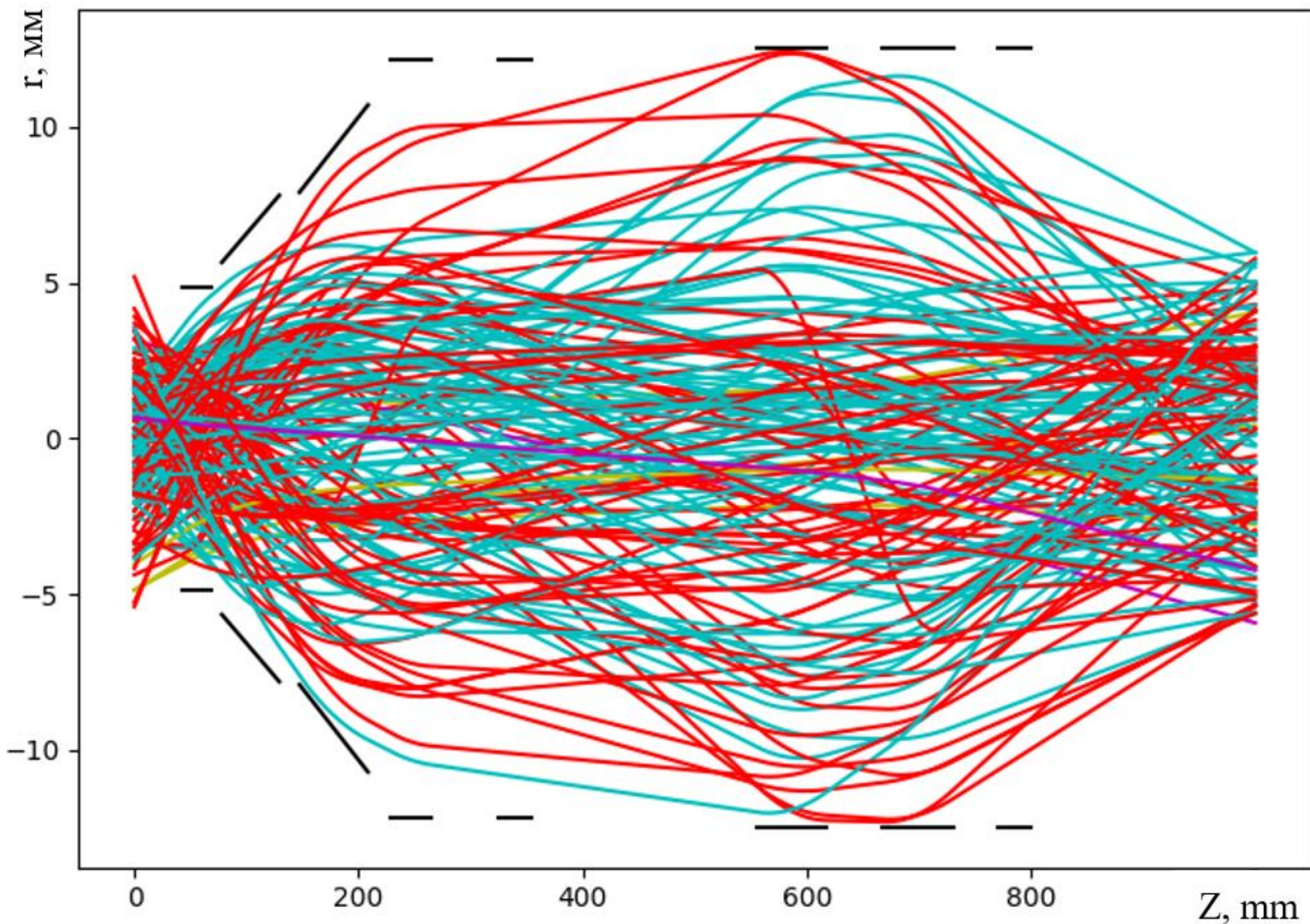


Поляризация частицы задается согласно равномерному распределению, так чтобы начальный атомарный поток был не поляризованным

$$\mu = \sqrt{\frac{8kT}{10\pi m}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{3kT}{10m}}$$

Моделирование поляризатора



$$P_z(I = 1) = \frac{N_{(m_i = +1)} - N_{(m_i = -1)}}{N_{(m_i = +1)} + N_{(m_i = 0)} + N_{(m_i = -1)}}$$

$$P_{zz}(I = 1) = \frac{1 - 3N_{(m_i = 0)}}{N_{(m_i = +1)} + N_{(m_i = 0)} + N_{(m_i = -1)}}$$

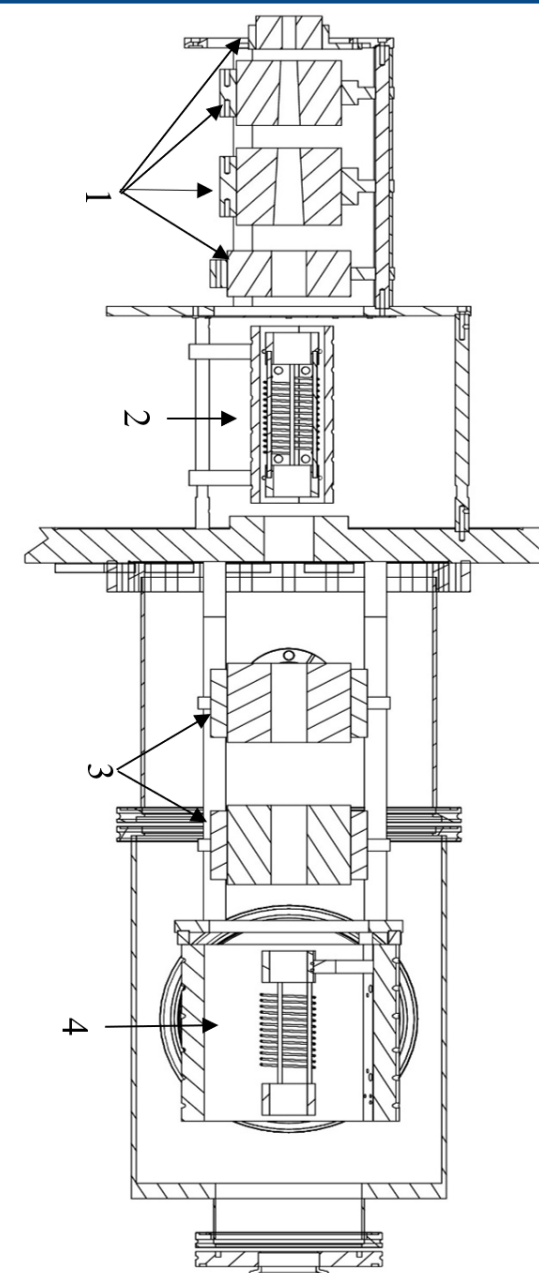
Цвет	Проекция момента
Синий	$m_j = +1/2, m_i = 1$
Зеленый	$m_j = +1/2, m_i = 0$
Красный	$m_j = +1/2, m_i = -1$
Голубой	$m_j = -1/2, m_i = -1$
Пурпурный	$m_j = -1/2, m_i = 0$
Желтый	$m_j = -1/2, m_i = +1$

Интенсивность пучка 0.17%
 Векторная поляризация -0,9
 Тензорная поляризация 0,86

	$P_{z, \text{эксп}}$	$P_{zz, \text{эксп}}$	$P_{z, \text{модел.}}$	$P_{zz, \text{модел.}}$
ANKE PABS	$+0.88 \pm 0.01$	$+0.88 \pm 0.03$	$+0.89 \pm 0.03$	$+0.90 \pm 0.03$
	-0.91 ± 0.01	$+0.85 \pm 0.2$	-0.91 ± 0.03	$+0.89 \pm 0.03$
	$+0.005 \pm 0.003$	$+0.90 \pm 0.02$	-0.06 ± 0.08	$+0.90 \pm 0.04$
	$+0.005 \pm 0.003$	-1.71 ± 0.03	-0.08 ± 0.03	-1.58 ± 0.07
HERMES PABS	$+0.92 \pm 0.01$	$+0.88 \pm 0.02$	$+0.94 \pm 0.021$	$+0.89 \pm 0.03$
	-0.91 ± 0.01	$+0.94 \pm 0.02$	-0.92 ± 0.011	$+0.95 \pm 0.01$
	-0.02 ± 0.01	$+0.99 \pm 0.02$	-0.05 ± 0.08	$+0.96 \pm 0.05$
	-0.02 ± 0.01	-1.77 ± 0.02	-0.03 ± 0.02	-1.64 ± 0.04

Выбор оптимальной конструкции поляризатора

	$P_{z, \text{теор}}$	$P_{zz, \text{теор}}$	$P_{z, \text{модел.}}$	$P_{zz, \text{модел.}}$	Интенсивность, %
Конструкция №1 (6666 66)	0	+1	$+0.06 \pm 0.08$	$+0.89 \pm 0.02$	0.20 ± 0.02
	- 1/3	+1	-0.26 ± 0.06	$+0.92 \pm 0.03$	0.21 ± 0.02
	-1	+1	-0.92 ± 0.02	$+0.92 \pm 0.02$	0.16 ± 0.01
Конструкция №2 (6646 46)	0	+1	-0.46 ± 0.06	$+0.86 \pm 0.04$	0.13 ± 0.01
	- 1/3	+1	-0.63 ± 0.05	$+0.94 \pm 0.03$	0.14 ± 0.01
	-1	+1	-0.95 ± 0.02	$+0.95 \pm 0.04$	0.14 ± 0.01
Конструкция №3 (8888 88)	0	+1	-0.50 ± 0.05	$+0.86 \pm 0.05$	0.22 ± 0.01
	- 1/3	+1	-0.58 ± 0.07	$+0.88 \pm 0.03$	0.20 ± 0.01
	-1	+1	-0.89 ± 0.03	$+0.89 \pm 0.04$	0.21 ± 0.01



Сравнение результатов моделирования с теорией

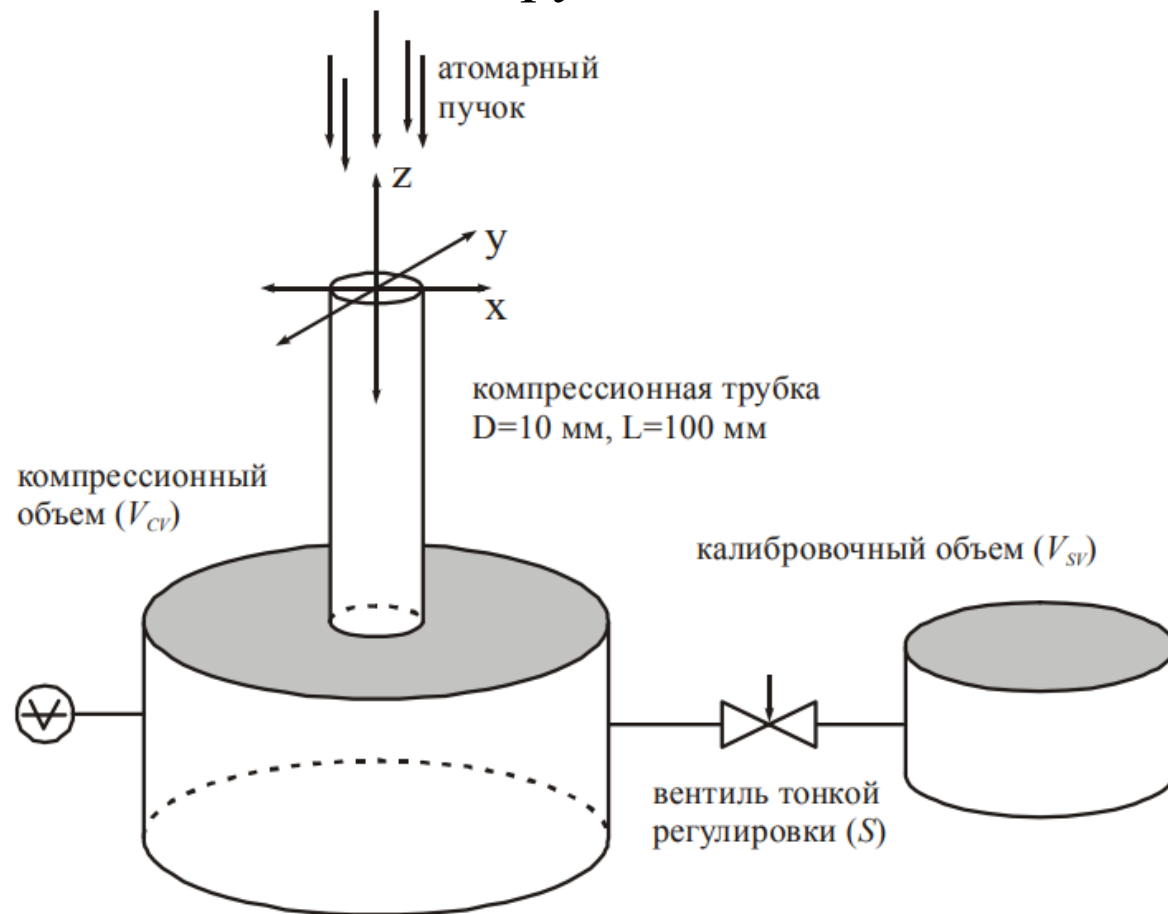
$P_{z, \text{теор}}$	$P_{zz, \text{теор}}$	$P_{z, \text{модел.}}$	$P_{zz, \text{модел.}}$	Интенсивность, %
1/2	- 1/2	0.46 ± 0.03	-0.26 ± 0.07	0.20 ± 0.01
- 1/2	- 1/2	-0.46 ± 0.04	-0.41 ± 0.14	0.18 ± 0.02
0	+1	0.06 ± 0.08	0.89 ± 0.02	0.20 ± 0.02
- 2/3	0	-0.58 ± 0.04	-0.12 ± 0.12	0.21 ± 0.01
- 1/3	+1	-0.26 ± 0.06	0.92 ± 0.03	0.21 ± 0.02
-1	+1	-0.89 ± 0.02	0.89 ± 0.02	0.16 ± 0.01



Параметры оптимизации

1. Оптимизация величины входного потока
2. Оптимизация по температуре сопла диссоциатора
3. Оптимизация по вводимой высокочастотной мощности
4. Юстировка сопла

Устройство для абсолютных измерений интенсивности пучка – компрессионная трубка



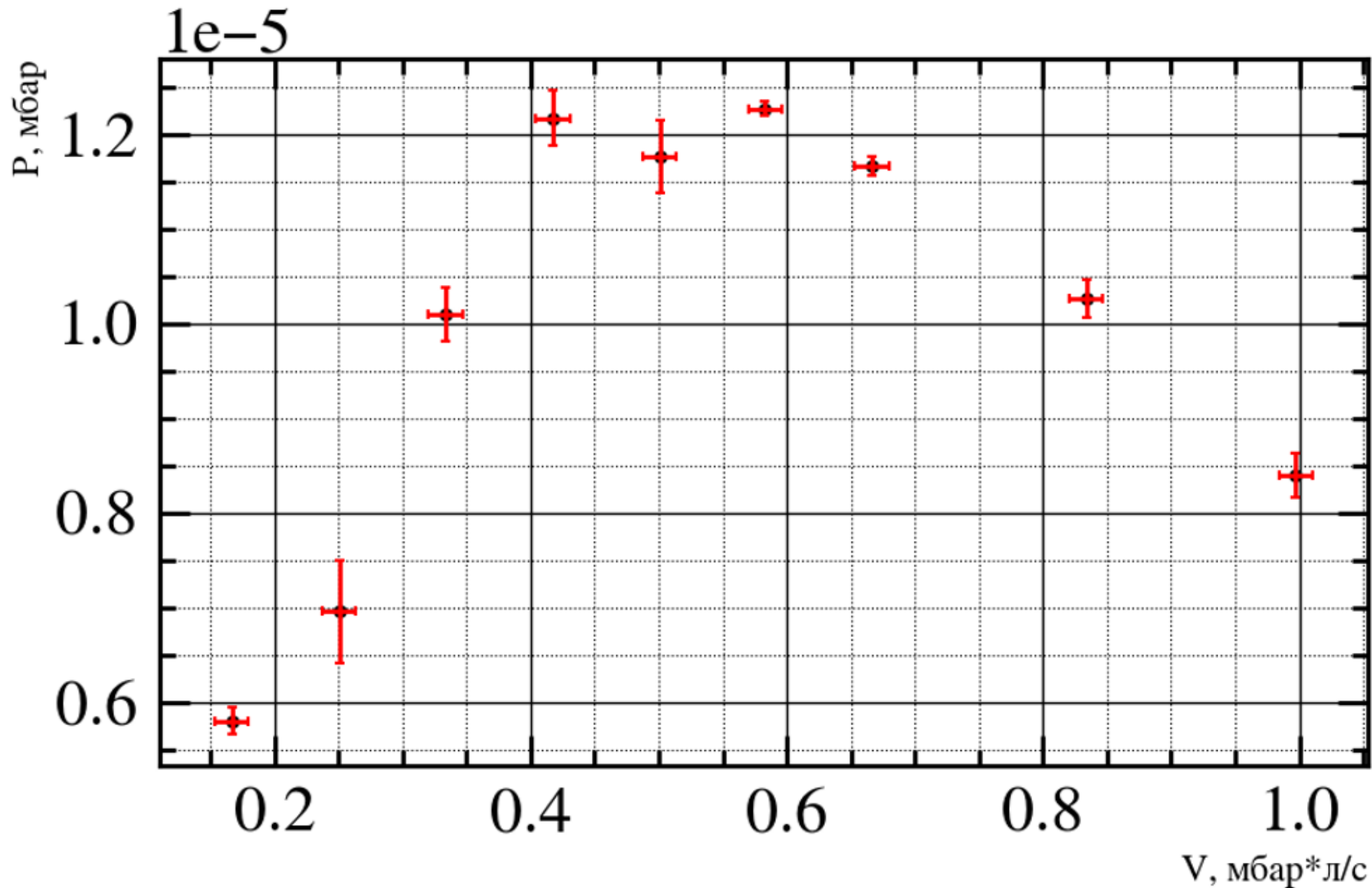


График зависимости давления в компрессионной трубке от потока газа в диссоциатор, при температуре сопла 80 К и ВЧ - мощности 200 Вт



Оптимизация по температуре сопла

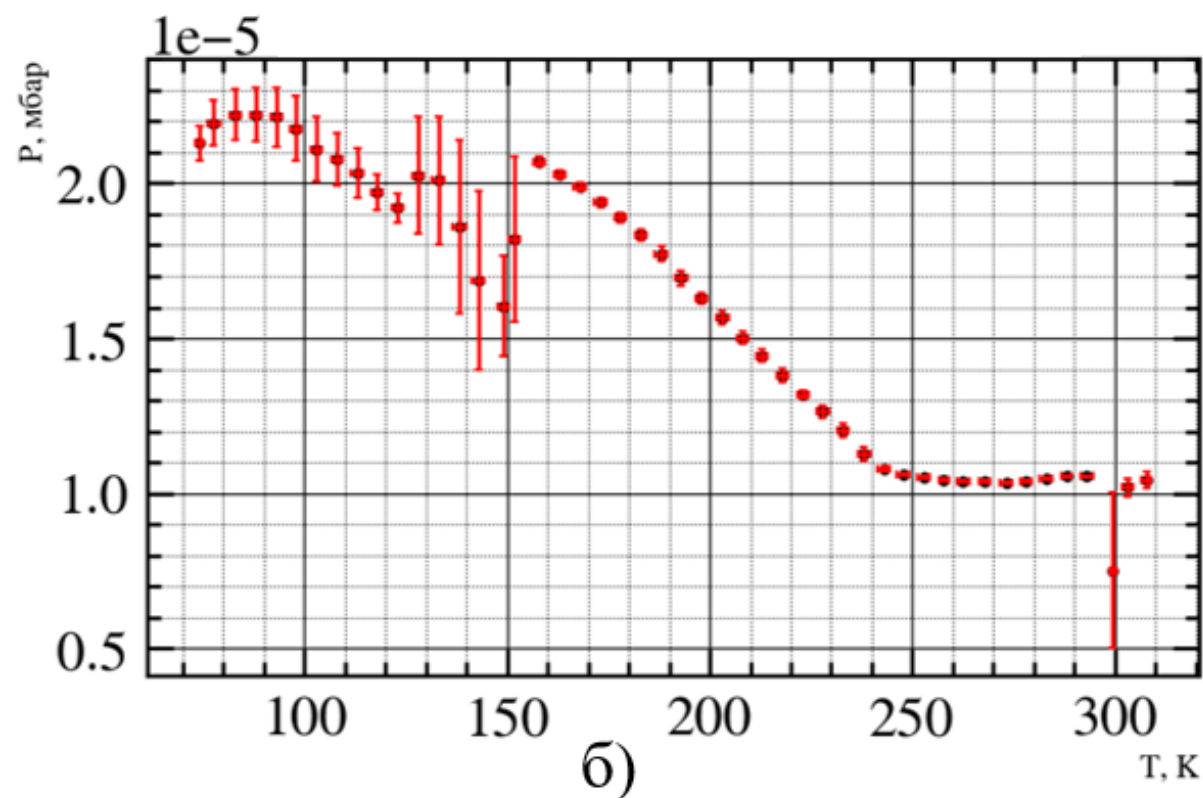
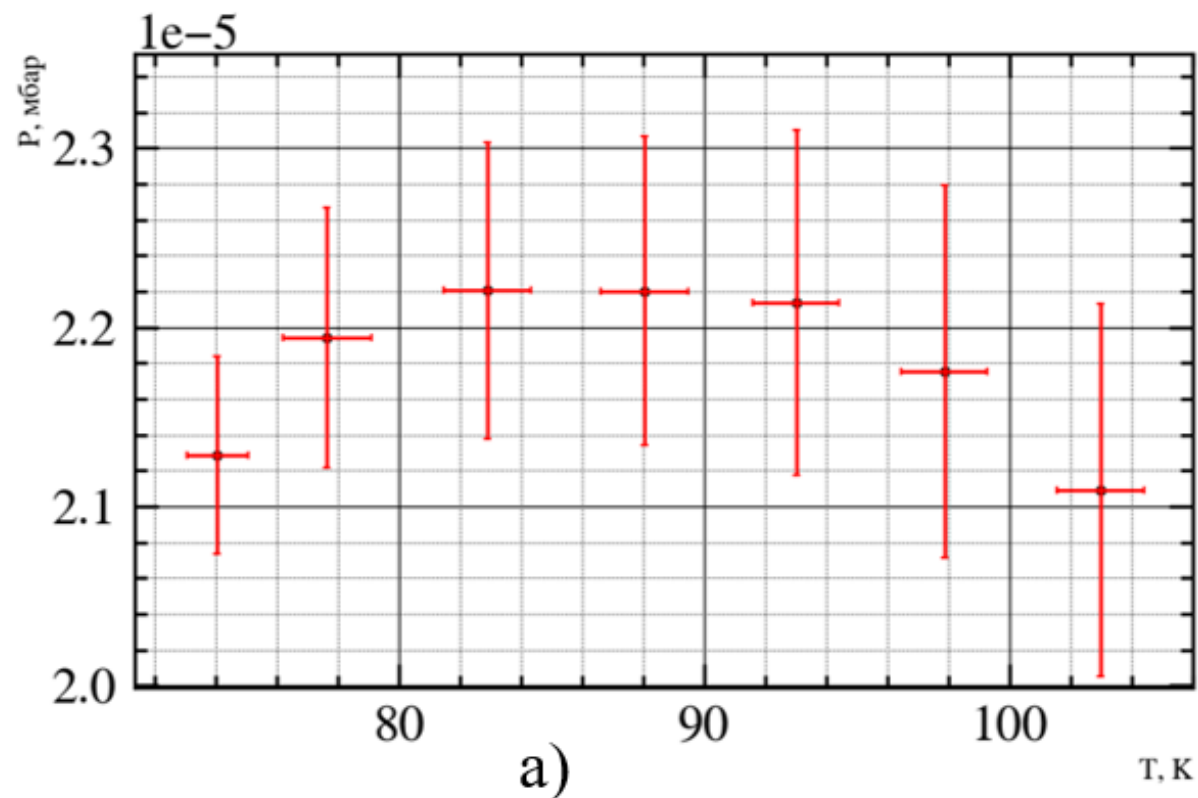


График зависимости давления в компрессионной трубке от температуры сопла: а - в диапазоне от 70 до 110 К, б - в диапазоне от 0 до 310 К



Оптимизация по вводимой ВЧ- мощности

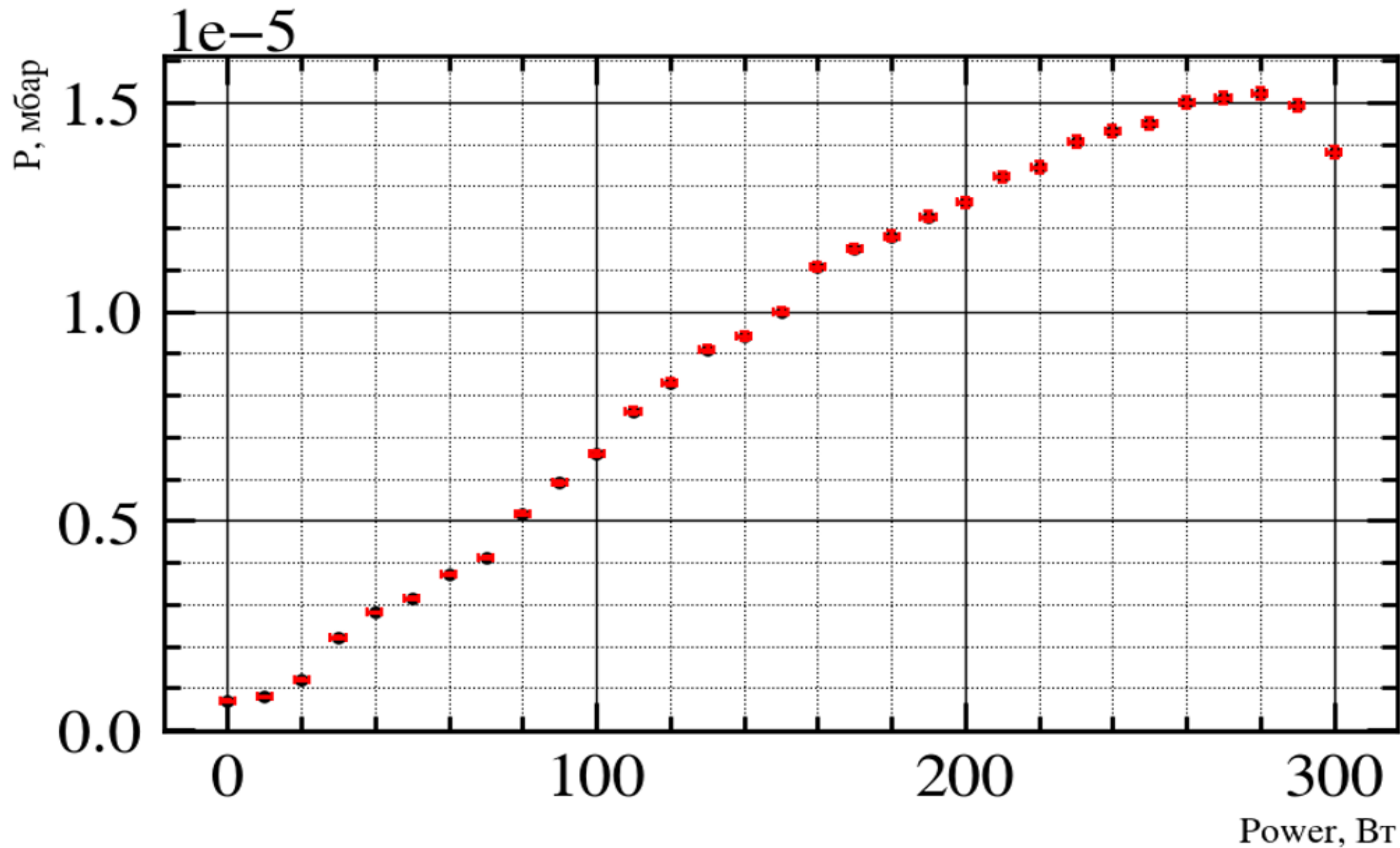
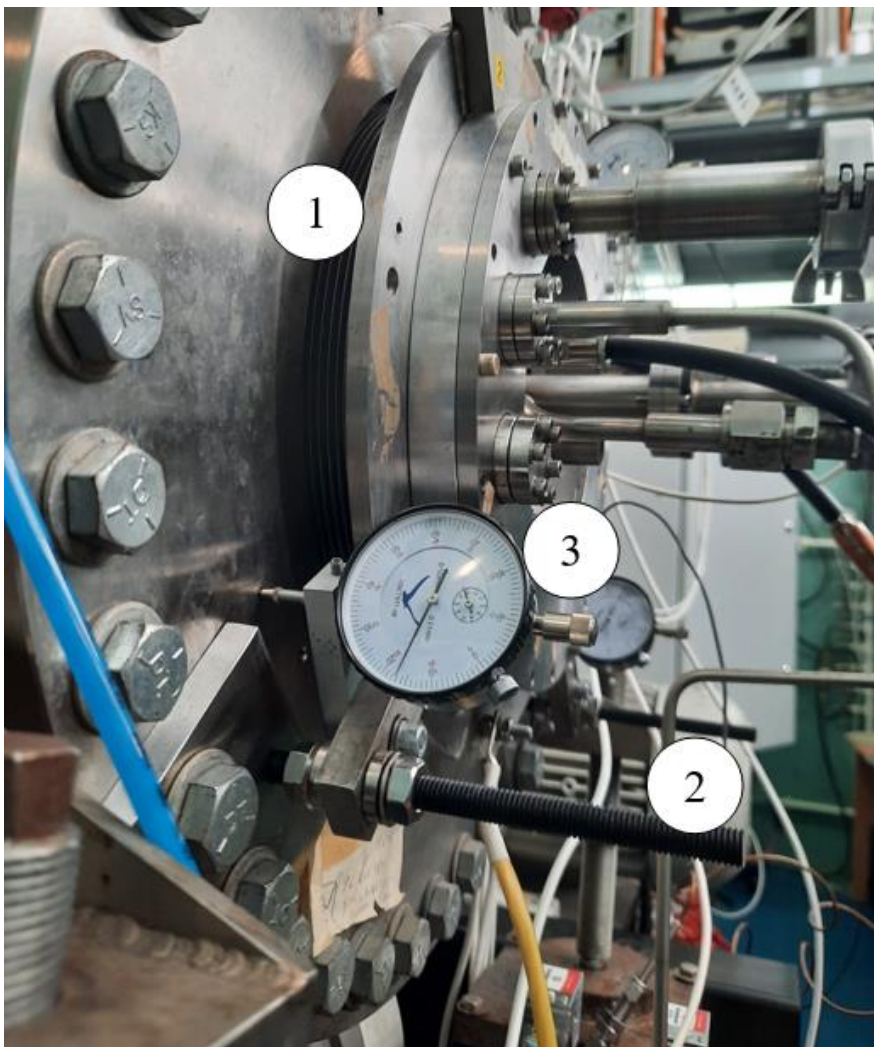


График зависимости
давления в
компрессионной
трубке от ВЧ
мощности

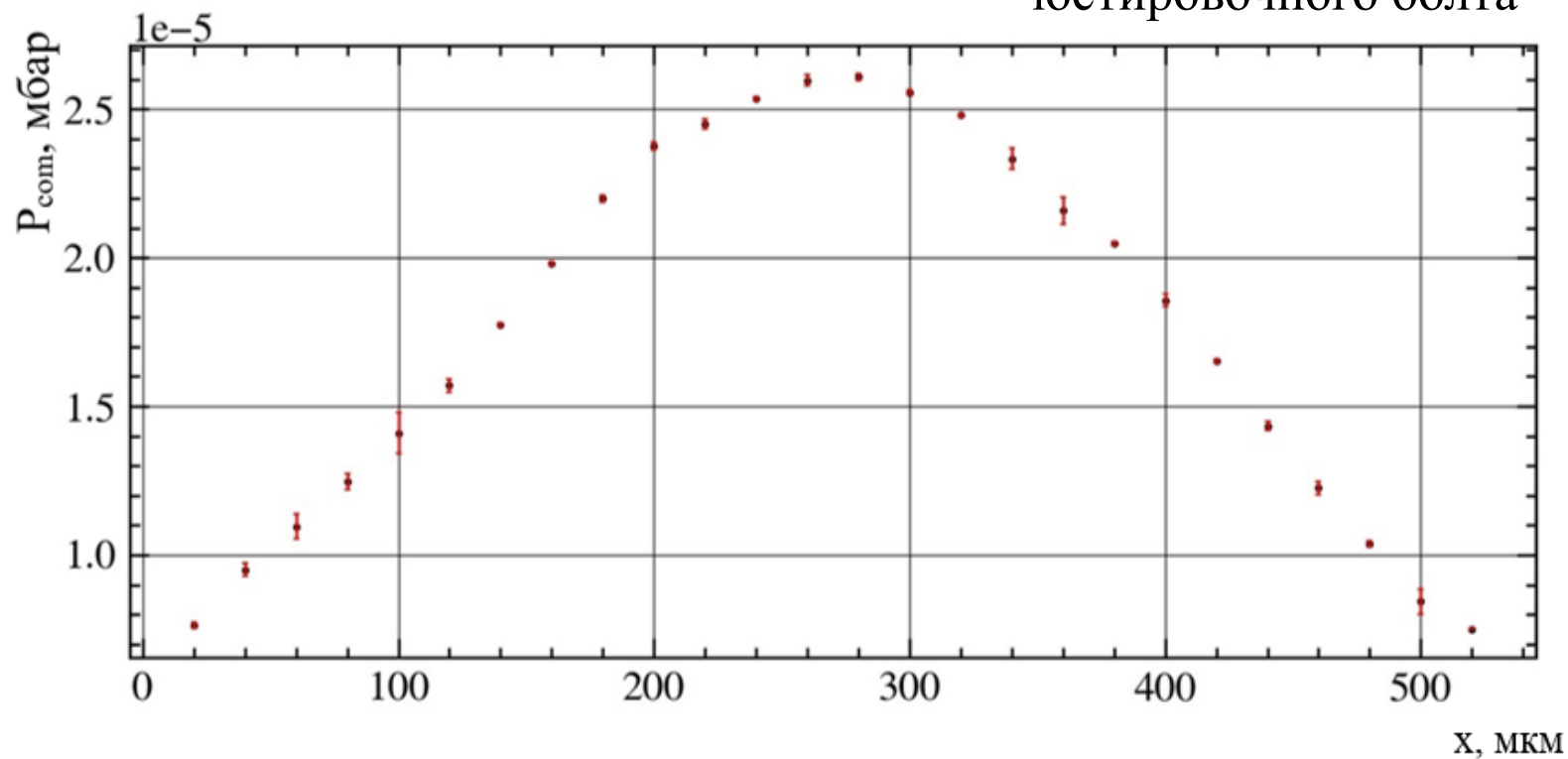


Юстировка сопла



Крепление диссоциатора к вакуумному объему. 1 – сильфон, 2 -регулирующий болт №1, 3 – микрометр

График зависимости давления от положения юстировочного болта





Заключение

- Разработан диссоциатор
- Проведено моделирование пролета атомарного пучка через поляризатора
- Выбрана оптимальная конструкция поляризатора
- Произведена оптимизация источника по температуре сопла (83 К), вводимой высокочастотной мощности (280 Вт) и по количеству вводимого газа (0.58 мбар·л/с)
- Произведена юстировка сопла

Разработанный и оптимизированный источник атомарного поляризованного пучка позволяет получить мишень интенсивностью $4.3 * 10^{16}$ атомов дейтерия.

Планы на дальнейшую работу:

- Увеличение интенсивности дейтериевого пучка до уровня $1 * 10^{17}$ атомов/с
- Сборка и отладка ячеек сверхтонкого перехода
- Измерение поляризации
- Оптимизация источника по степени поляризации (не ниже 90% для векторной и тензорной) и интенсивности пучка

Что необходимо для выполнения работ:

- Переработка электрической схемы диссоциатора (с последовательного контура на параллельный)
- Высоковольтный генератор с частотой 13.56 МГц
- Поляриметр
- Квадрупольный масс- спектрометр



НИЦ КИ - ПИЯФ



Спасибо за внимание!

P_z
(vector)

P_{zz}
(tensor)

-2/3

0

0

+1

-1/3

+1

-1

+1

$\pm 1/2$

-1/2

atomic beam

$d_{\text{nozzle}} = 2 \text{ mm}$

\vec{D} , 0.01 eV

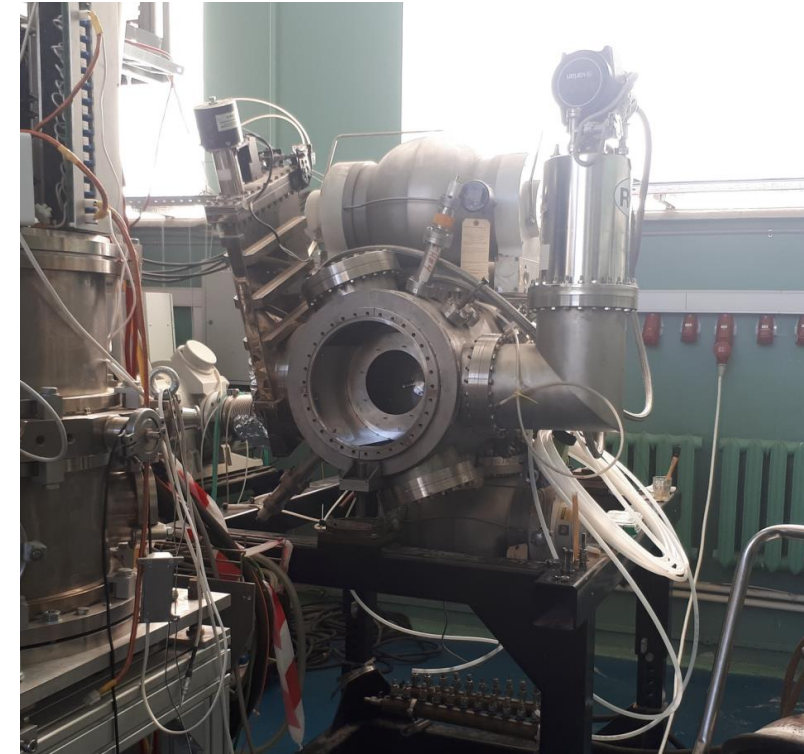
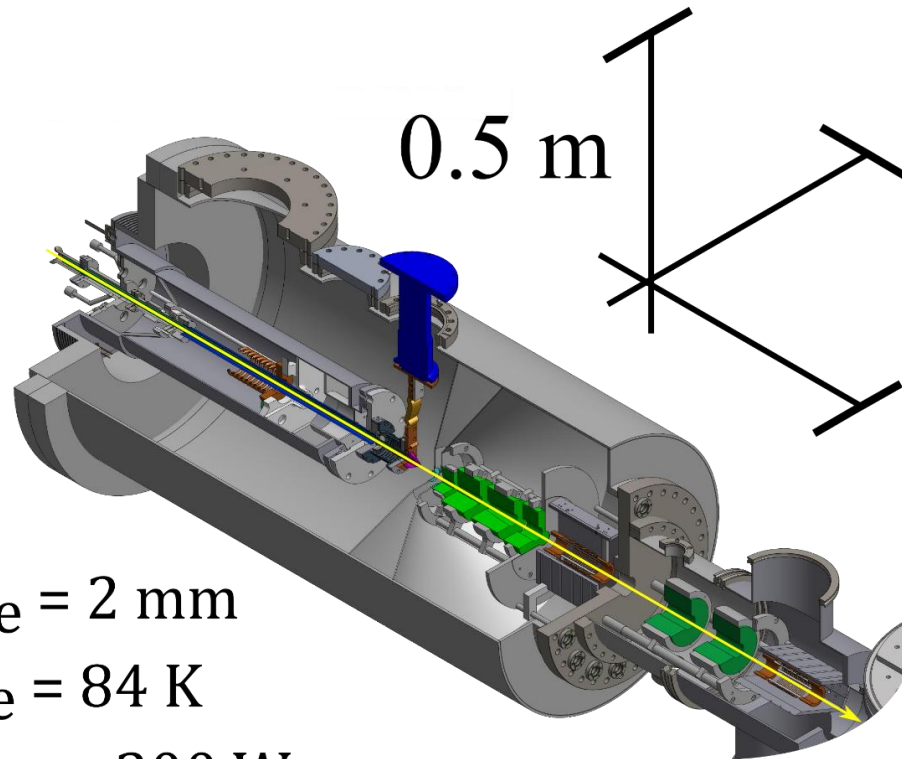
$T_{\text{nozzle}} = 84 \text{ K}$

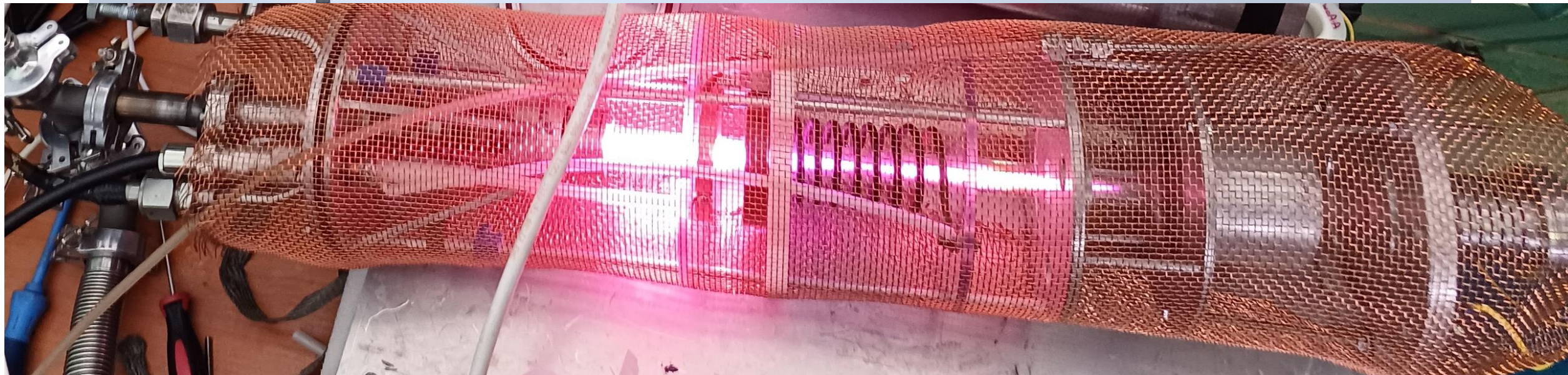
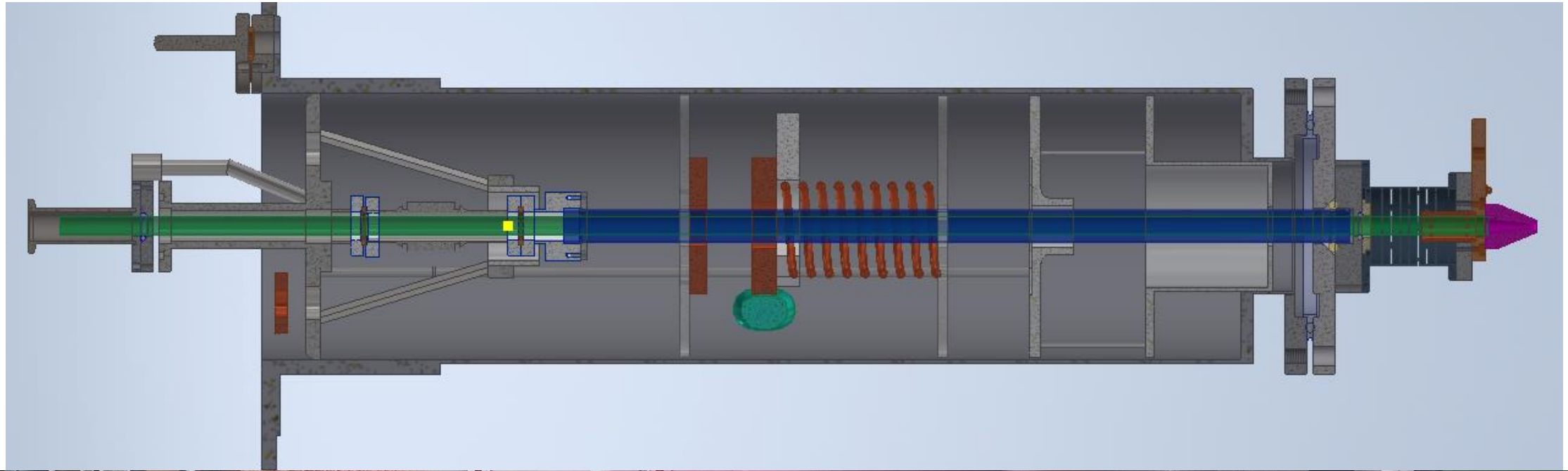
$2 \cdot 10^{16}$ atoms/s

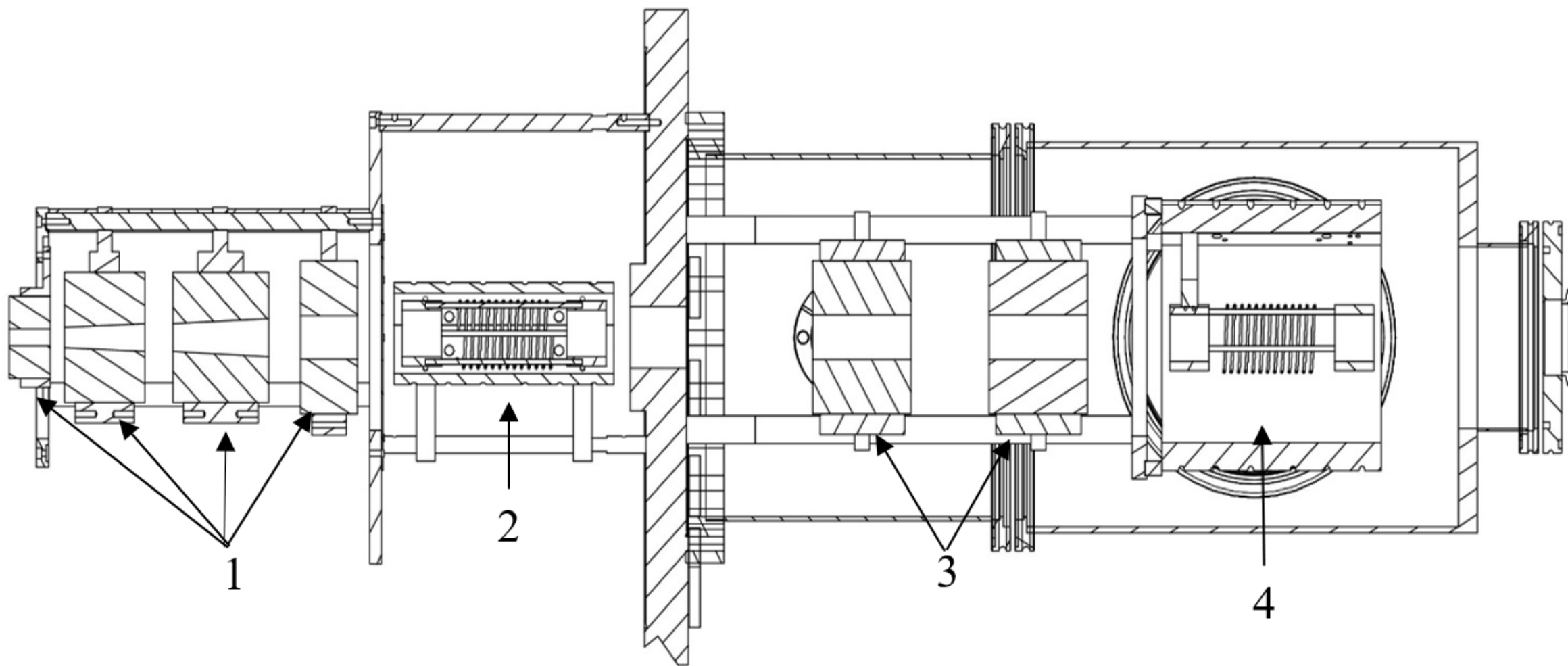
RF power = 300 W

Polarizing system:

Sextupoles + Quadrupoles + MFT + Sextupoles + MFT



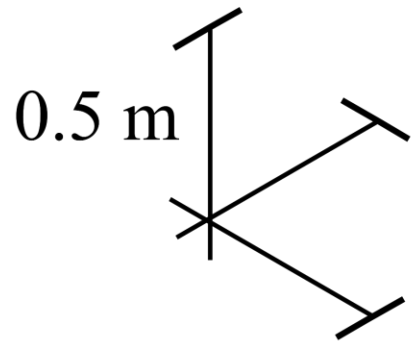
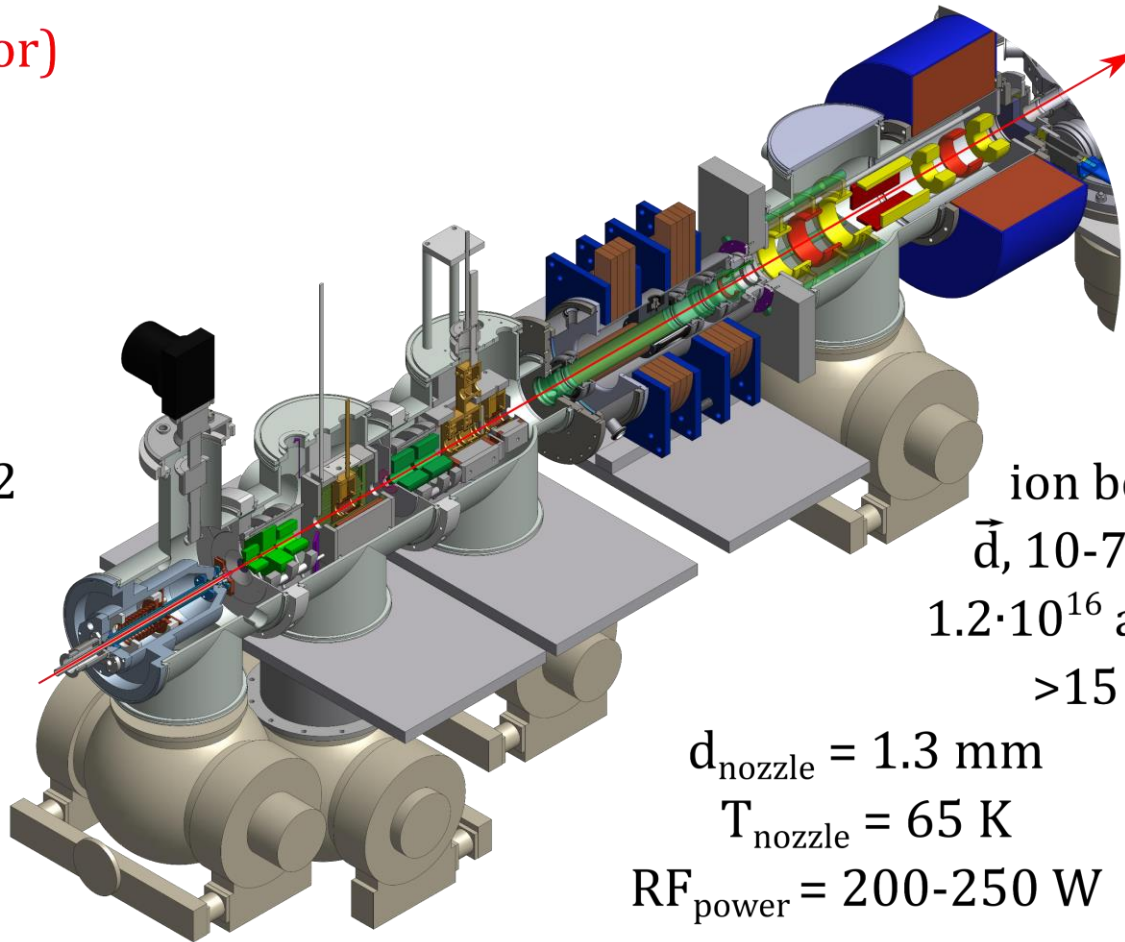




Чертеж поляризатора ABS PolFusion, 1, 3– первая и вторая группа магнитов, 2,4 - MFT1 и MFT2

p_z (vector)	p_{zz} (tensor)
$\pm 2/3$	0
0	+1
0	-2
-1/3	± 1
+1/3	± 1
$\pm 1/3$	-1/2

0.5 m

ion beam

\vec{d} , 10-75 keV

$1.2 \cdot 10^{16}$ atoms/s

$> 15 \mu\text{A}$

$d_{\text{nozzle}} = 1.3 \text{ mm}$

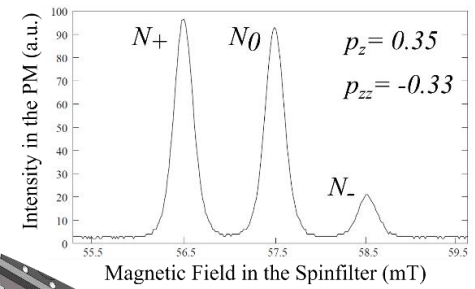
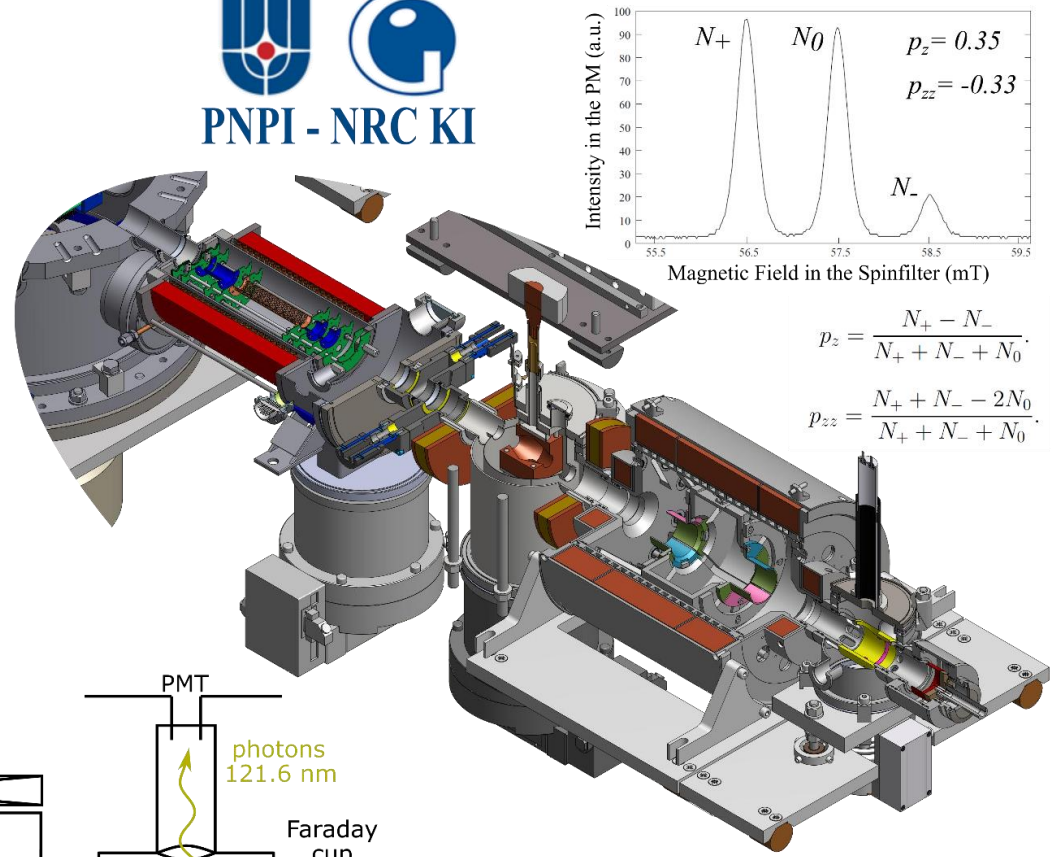
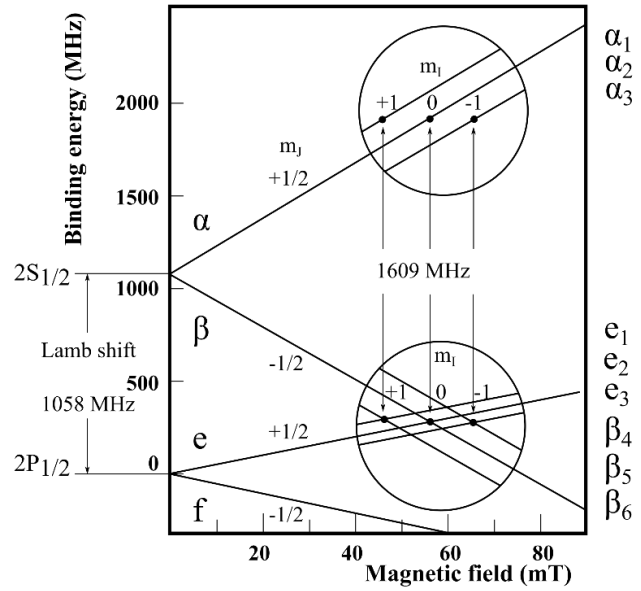
$T_{\text{nozzle}} = 65 \text{ K}$

$\text{RF}_{\text{power}} = 200\text{-}250 \text{ W}$

Polarizer:

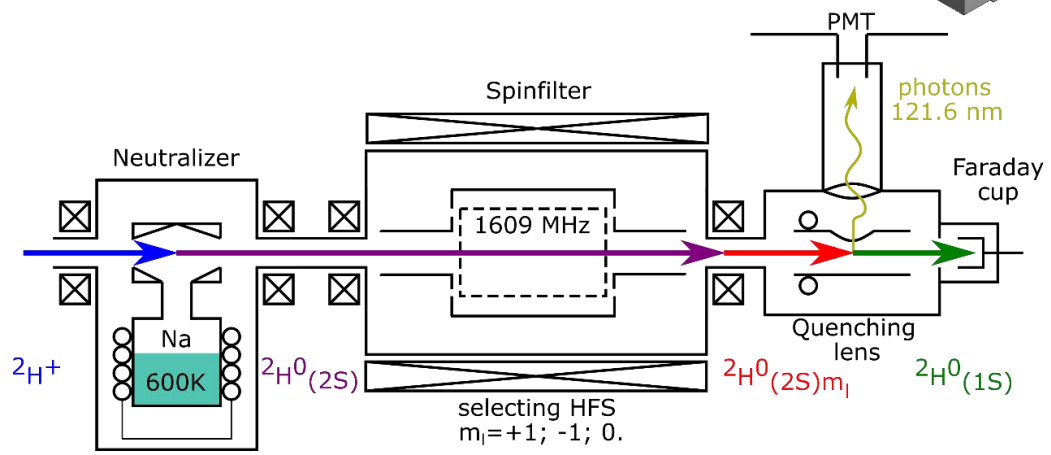
Sextupoles + WFT + Sextupoles + WFT + SFT1 (460 MHz) + SFT2 (350 MHz)





$$p_z = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_- + N_0}$$

$$p_{zz} = \frac{N_+ + N_- - 2N_0}{N_+ + N_- + N_0}$$



$$\frac{L - R}{L + R} = \frac{\frac{3}{2} P_{ZZ} \sin \beta A_y}{1 + \frac{1}{2} P_{ZZ} [\sin^2 \beta A_{yy} + \cos^2 \beta A_{zz}]}$$

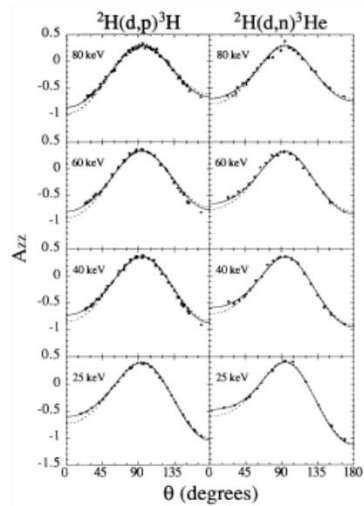
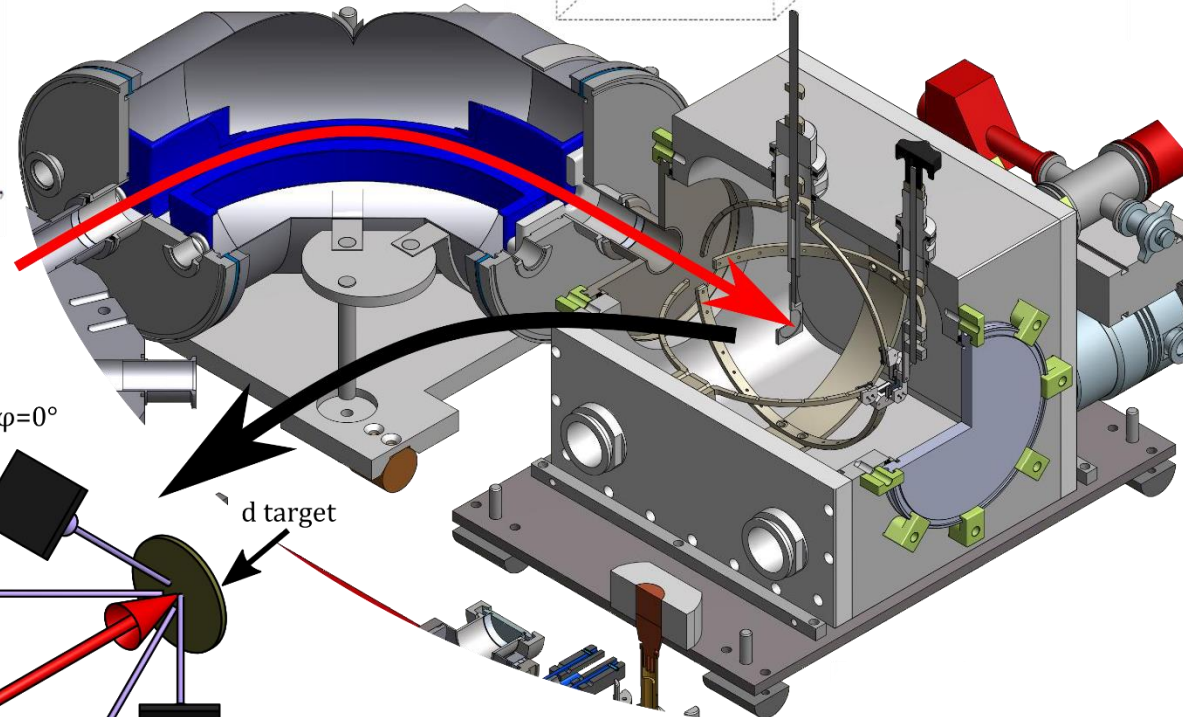
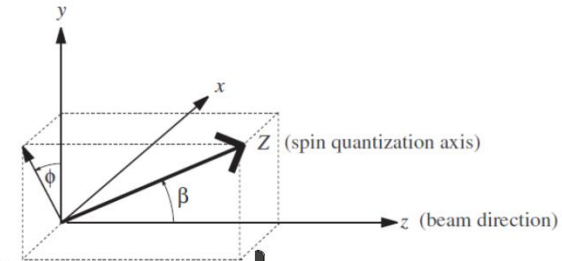
$$\frac{U - D}{U + D} = \frac{P_{ZZ} \sin \beta \cos \beta A_{xz}}{1 + \frac{1}{2} P_{ZZ} [\sin^2 \beta A_{xx} + \cos^2 \beta A_{zz}]}$$

$$\frac{2(L - R)}{L + R + U + D} = \frac{\frac{3}{2} P_{ZZ} \sin \beta A_y}{1 + \frac{1}{4} P_{ZZ} [3(\cos^2 \beta - 1) A_{zz}]}$$

$$\frac{2(U - D)}{L + R + U + D} = \frac{P_{ZZ} \sin \beta \cos \beta A_{xz}}{1 + \frac{1}{4} P_{ZZ} [3(\cos^2 \beta - 1) A_{zz}]}$$

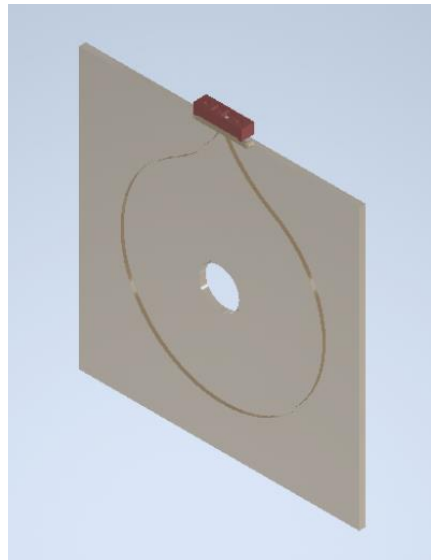
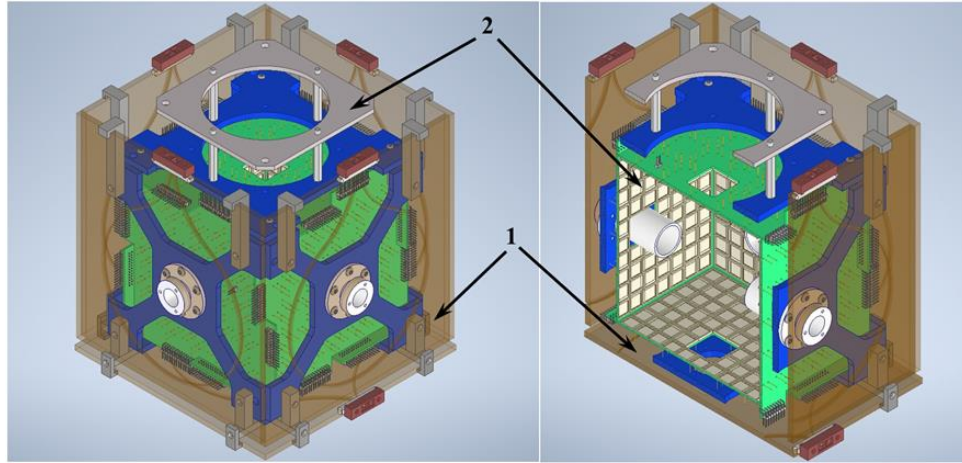
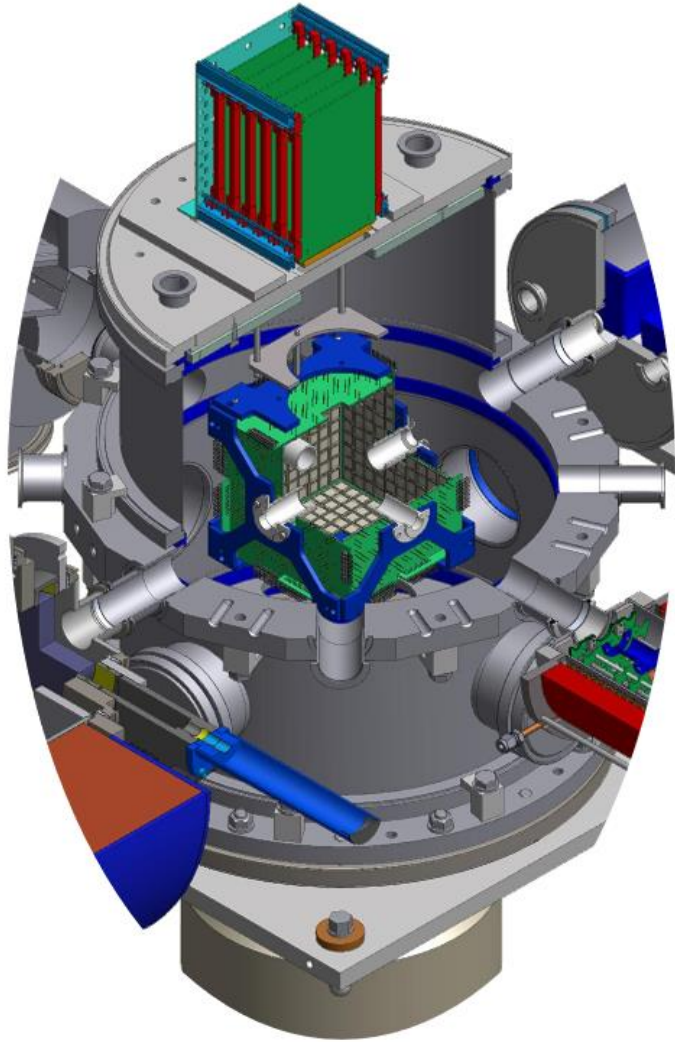
$$\frac{(L + R) - (U + D)}{L + R + U + D} = \frac{-\frac{1}{4} P_{ZZ} \sin^2 \beta (A_{xx} - A_{yy})}{1 + \frac{1}{4} P_{ZZ} [3(\cos^2 \beta - 1) A_{zz}]}$$

G.G. Ohlsen, P.W. Keaton, Jr., Nucl. Instr. and Meth. **109**, 41 (1973).



K. Fletcher, *et al.*, Phys. Rev. C **49**, 2305 (1994).

4π - детектор



- ① concentrator
- ② top flange
- ③ signal cables
- ④ detector cube



Сечение реакции

$$\begin{aligned} \sigma(\Theta, \Phi) = \sigma_0(\Theta) \{ & 1 + \frac{3}{2} [A_y^{(b)}(\Theta)p_y + A_y^{(t)}q_y] + \frac{1}{2} [A_{zz}^{(b)}(\Theta)p_{zz} + A_{zz}^{(t)}(\Theta)q_{zz}] \\ & + \frac{1}{6} [A_{xx-yy}^{(b)}(\Theta)p_{xx-yy} + A_{xx-yy}^{(t)}(\Theta)q_{xx-yy}] \\ & + \frac{2}{3} [A_{xz}^{(b)}(\Theta)p_{xz} + A_{xz}^{(t)}(\Theta)q_{xz}] \\ & + \frac{9}{4} [C_{y,y}(\Theta)p_yq_y + C_{x,x}(\Theta)p_xq_x + C_{x,z}(\Theta)p_xq_z \\ & + C_{z,x}(\Theta)p_zq_x + C_{z,z}(\Theta)p_zq_z] \\ & + \frac{3}{4} [C_{y,zz}(\Theta)p_yq_{zz} + C_{zz,y}(\Theta)p_{zz}q_y] \\ & + C_{y,xz}(\Theta)p_yq_{xz} + C_{xz,y}(\Theta)p_{xz}q_y + C_{x,yz}(\Theta)p_xq_{yz} \\ & + C_{yz,x}(\Theta)p_{yz}q_x + C_{z,yz}(\Theta)p_zq_{yz} + C_{yz,z}(\Theta)p_{yz}q_z \\ & + \frac{1}{4} [C_{y,xx-yy}(\Theta)p_yq_{xx-yy} + C_{xx-yy,y}(\Theta)p_{xx-yy}q_y \\ & + C_{zz,zz}(\Theta)p_{zz}q_{zz}] \\ & + \frac{1}{3} [C_{zz,xz}(\Theta)p_{zz}q_{xz} + C_{xz,zz}(\Theta)p_{xz}q_{zz}] \\ & + \frac{1}{12} [C_{zz,xx-yy}(\Theta)p_{zz}q_{xx-yy} + C_{xx-yy,zz}(\Theta)p_{xx-yy}q_{zz}] \\ & + \frac{4}{9} [C_{xz,xz}(\Theta)p_{xz}q_{xz} + C_{yz,yz}(\Theta)p_{yz}q_{yz}] \\ & + \frac{8}{9} [C_{xy,yz}(\Theta)p_{xy}q_{yz} + C_{yz,xy}(\Theta)p_{yz}q_{xy}] \\ & + \frac{16}{9} C_{xy,xy}(\Theta)p_{xy}q_{xy} \\ & + \frac{1}{9} [C_{xz,xx-yy}(\Theta)p_{xz}q_{xx-yy} + C_{xx-yy,xz}(\Theta)p_{xx-yy}q_{xz}] \\ & + \frac{1}{36} C_{xx-yy,xx-yy}(\Theta)p_{xx-yy}q_{xx-yy} \\ & + \frac{1}{2} [C_{x,xy}(\Theta)p_xq_{xy} + C_{xy,x}(\Theta)p_{xy}q_x + C_{z,xy}(\Theta)p_zq_{xy} \\ & + C_{xy,z}(\Theta)p_{xy}q_z] \} \end{aligned}$$

$$p_z(q_z), p_{zz}(q_{zz}) \neq 0$$

$$\begin{aligned} \sigma(\Theta, \Phi) = \sigma_0(\Theta) \{ & 1 + \frac{3}{2} [A_{zz}^{(b)}(\Theta)p_{zz} + A_{zz}^{(t)}(\Theta)q_{zz}] \\ & + \frac{9}{4} C_{z,z}(\Theta)p_zq_z + \frac{1}{4} C_{zz,zz}(\Theta)p_{zz}q_{zz} \} \end{aligned}$$

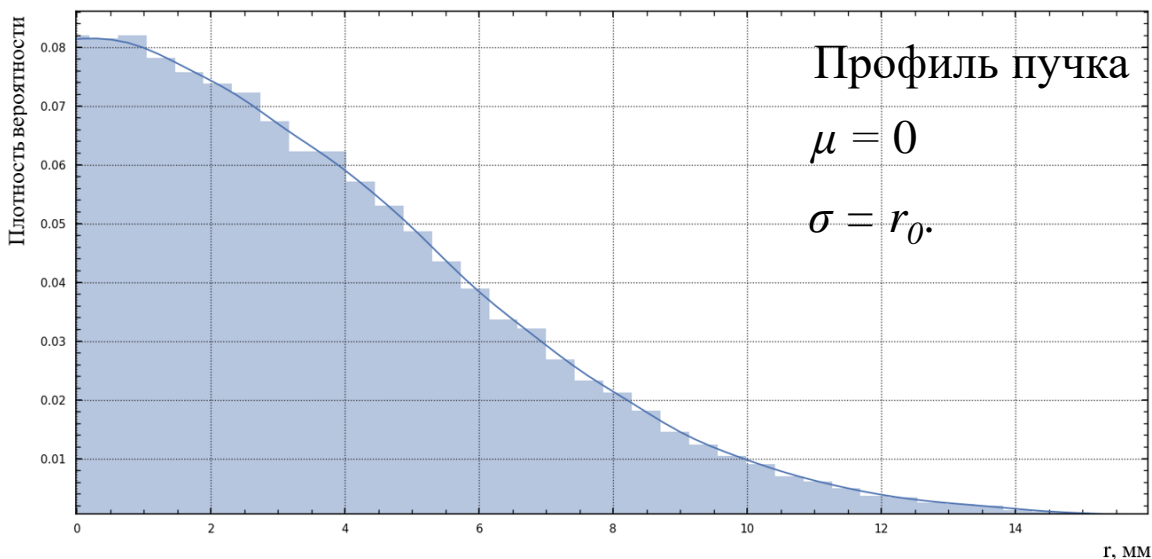
$$(p_{i,j} \neq 0, q_{i,j} = 0):$$

$$\begin{aligned} \sigma(\Theta, \Phi) = \sigma_0(\Theta) \cdot \{ & 1 + 3/2 A_y(\Theta) p_y + 1/2 A_{xz}(\Theta) p_{xz} \\ & + 1/6 A_{xx-yy}(\Theta) p_{xx-yy} \\ & + 2/3 A_{zz}(\Theta) p_{zz} \} \end{aligned}$$

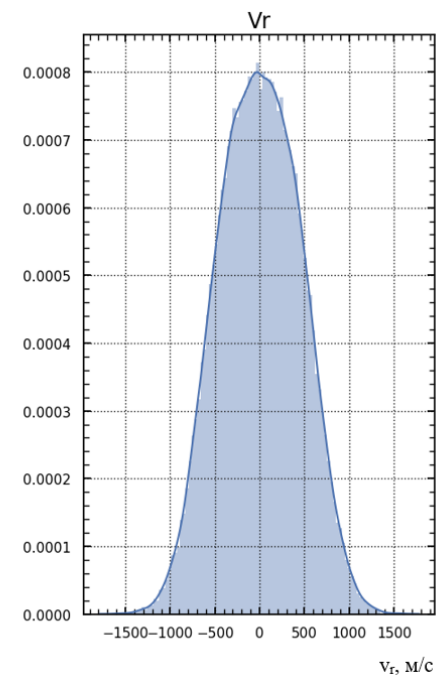
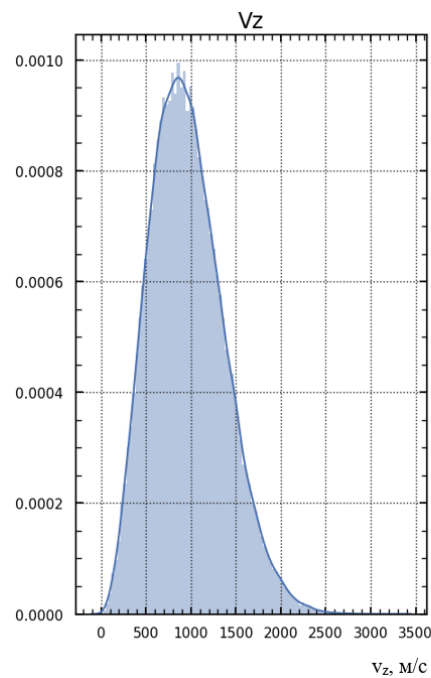
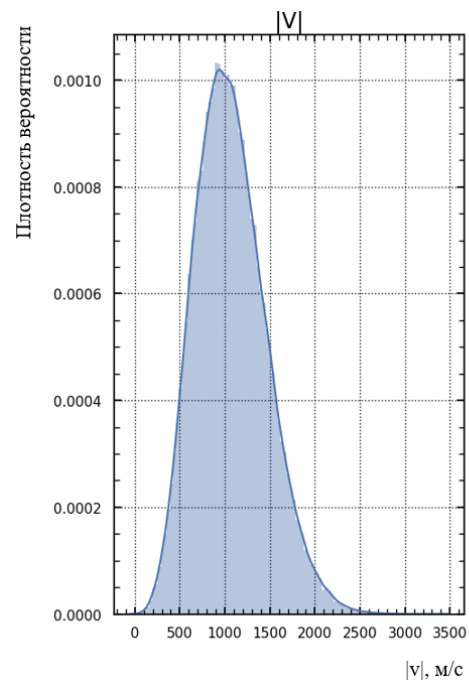
Генератор начальных условий

Атомарный пучок задается генератором начальных событий, который рождает частицу со следующими параметрами:

1. Координата частицы (z, r)
2. Скорость частицы вдоль оси OZ v_z , и скорость вдоль оси Or v_r
3. Проекция полного атомарного спина.



Распределение по скоростям



Поляризация частицы задается согласно равномерному распределению, так чтобы начальный атомарный поток был не поляризованным

$$\mu = \sqrt{\frac{8kT}{10\pi t}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{3kT}{10t}}$$

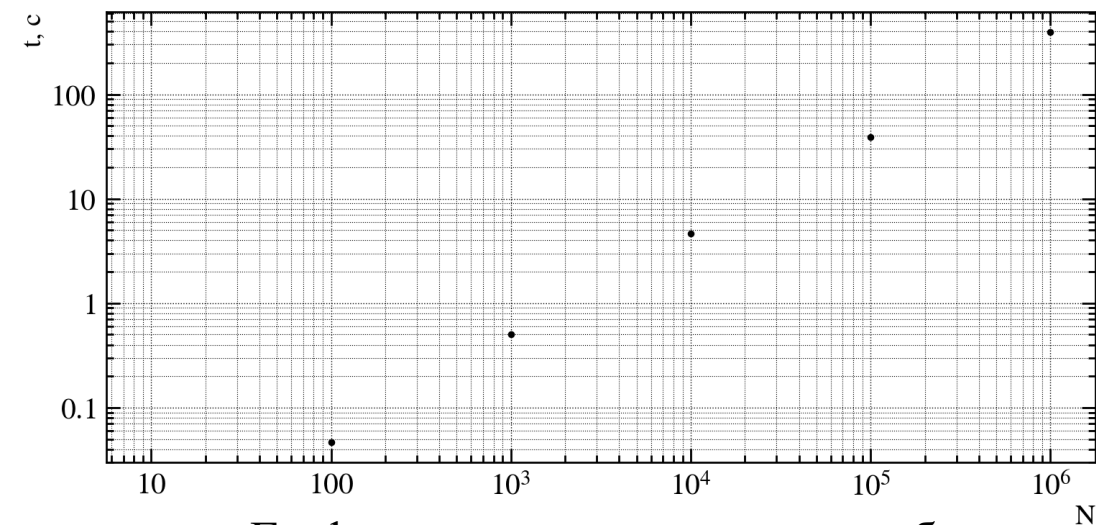


График зависимости времени работы программы от количества рождаемых частиц N .

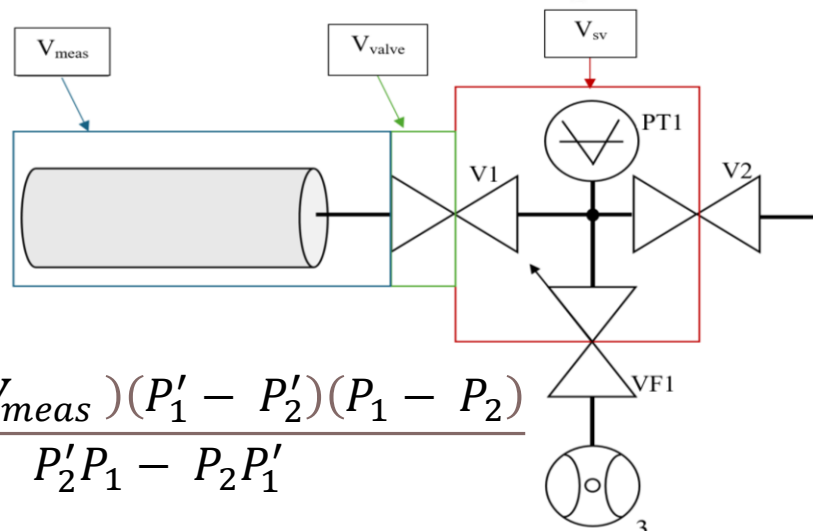
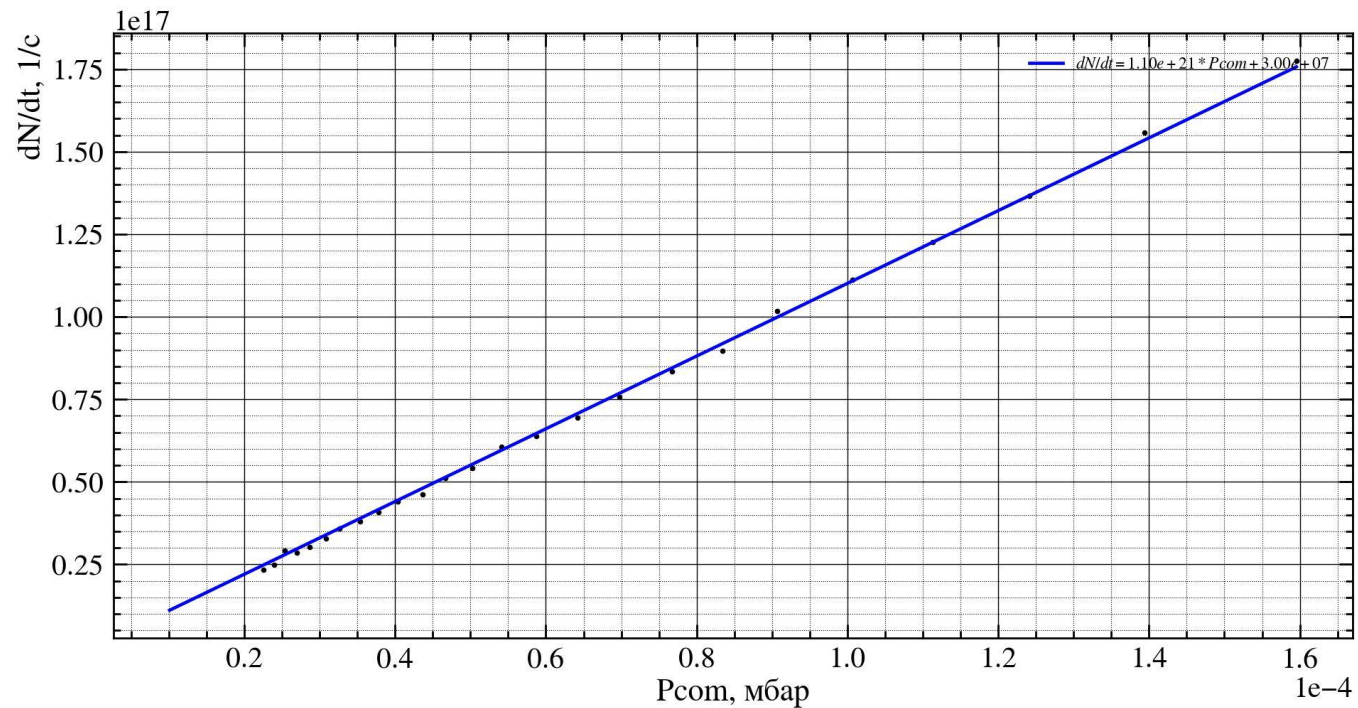
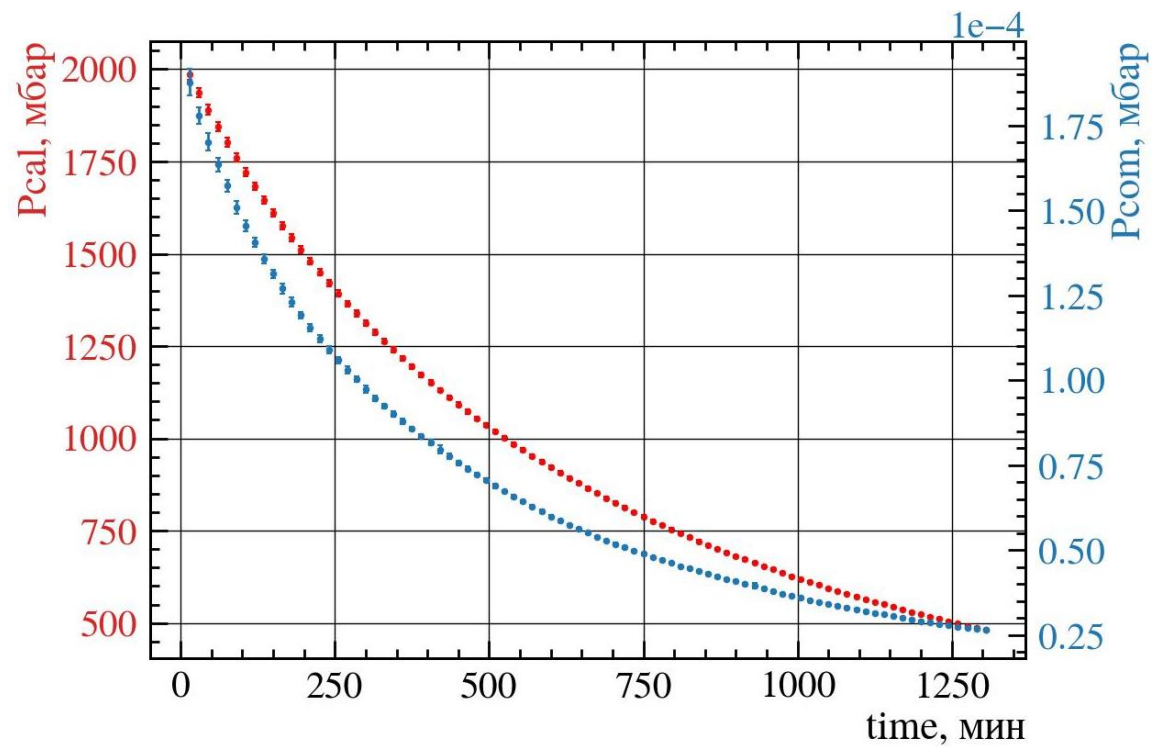
При расчете пролета вводились следующие допущения:

1. На границе магнита отсутствуют краевые эффекты, то есть частицы до магнита летят равномерно и прямолинейно.
2. Магнит бесконечно высокий.
3. Изменение скорости атомарного пучка вдоль оси Z не значительно: $v_z = const$

1. Рассчитанная в ходе моделирования интенсивность с хорошей точностью согласуется с интенсивностью, измеряемой на экспериментальных установках
2. Степень поляризации, рассчитанная в ходе моделирования, с учетом погрешности, лежит в диапазоне экспериментальных данных.
3. Время работы программы составляет $O(n)$.



Калибровка компрессионной трубки

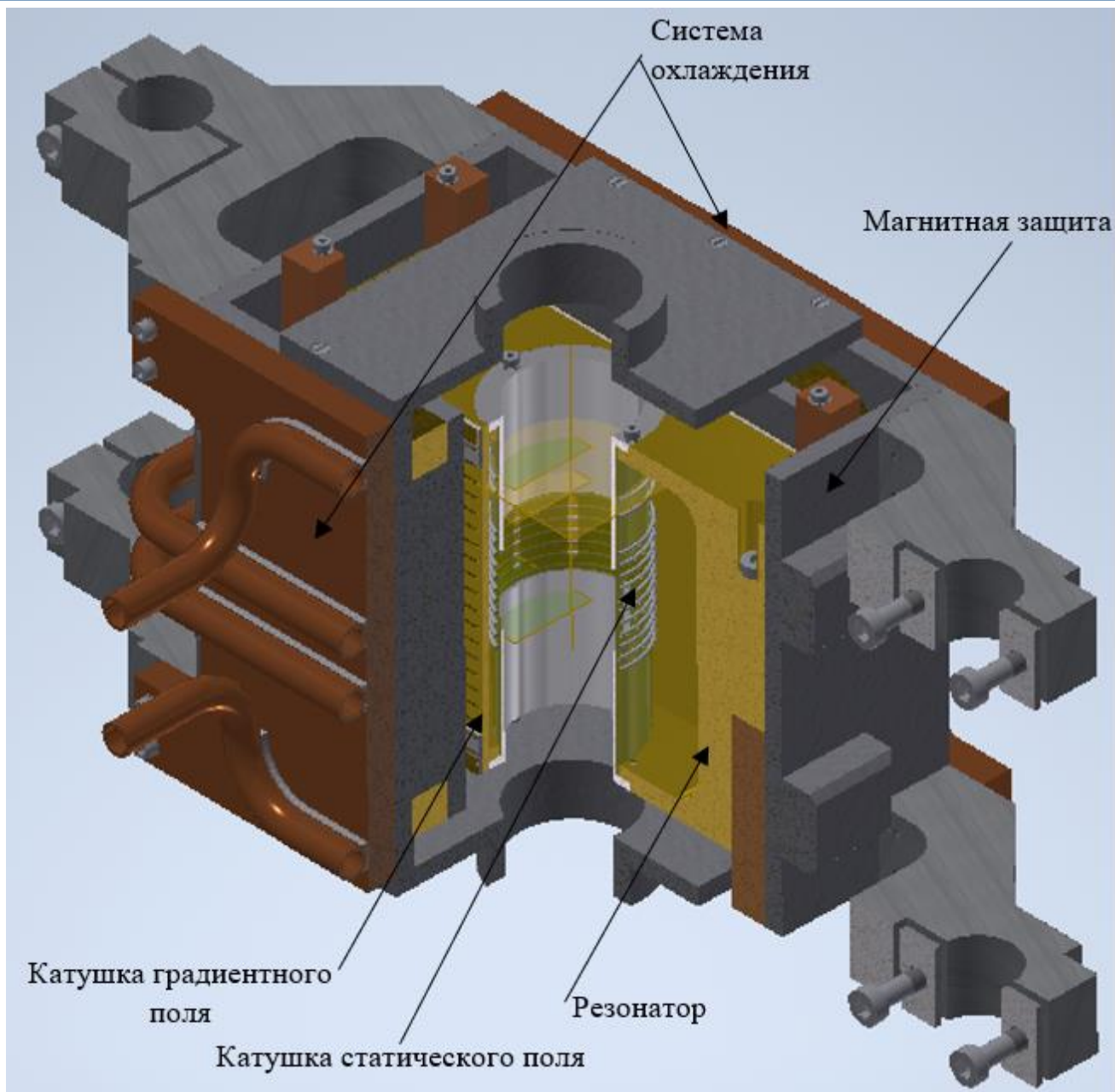


$$V_{sv} = \frac{(V'_{meas} - V_{meas})(P'_1 - P'_2)(P_1 - P_2)}{P'_2 P_1 - P_2 P'_1}$$

$$\frac{dN}{dt} = a \frac{V_{cal} \cdot \mu_{D_2}}{m_{D_2} \cdot R \cdot T_{cal}} \cdot \frac{dP_{cal}(t)}{dt}$$



Калибровка компрессионной трубки





Астрофизика

- Big bang
- Hydrogen burning
- Helium burning
- Advanced burning
- (carbon/neon/oxygen/silicon)
- s-process (neutron sources)
- p-process

Теория ядерного взаимодействия

- Широкий спектр моделей
- Сложности при описании прямых/непрямых измерений

Термоядерная энергетика

- Использование поляризованного топлива
- Увеличение сечения
- Управление угловым распределением вылета продуктов реакции
- Реакторы с малым выходом нейтронов

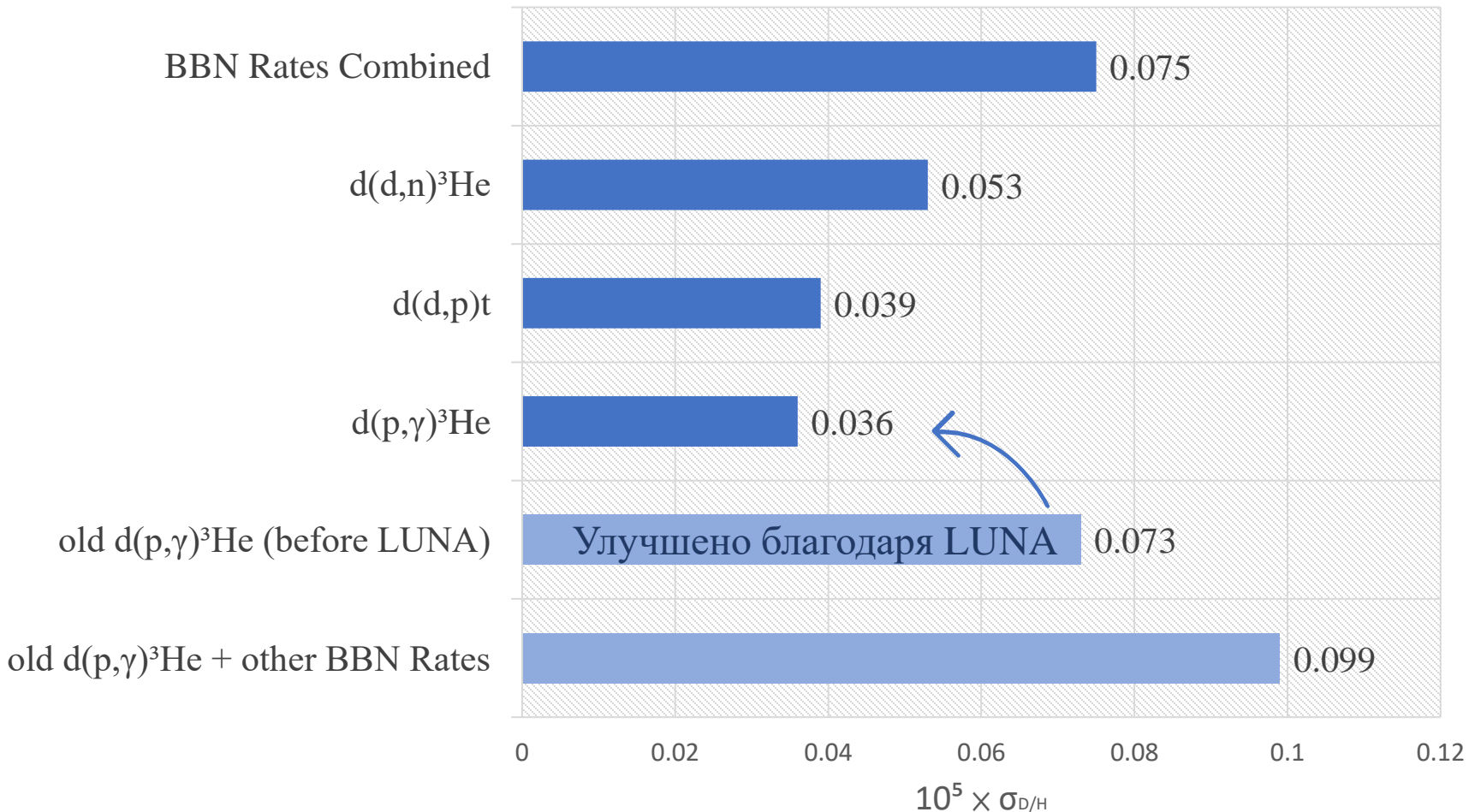
Прикладные аспекты

- Нарботка трития и гелия-3
- ^3He -ориентированная технология газоразрядных детекторов
- Источник нейтронов для наработки медицинских изотопов $^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$

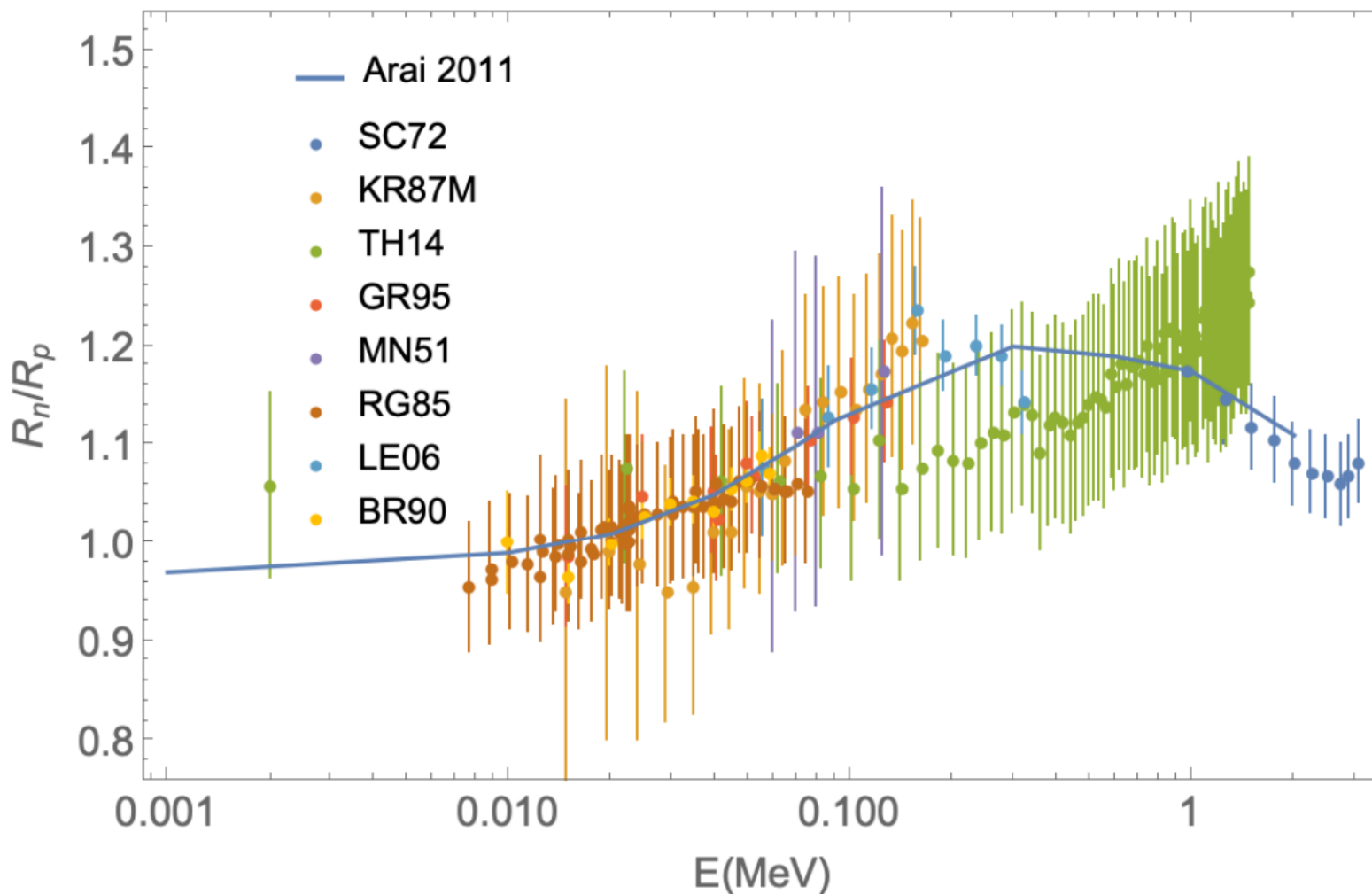


Big Bang нуклеосинтез → Первичное распределение изотопов D/H

Вклад ошибки в первичное распределение



**Необходимы
более точные
данные по dd-
синтезу!**



Отношения сечений процессов $d(d, n)^3\text{He}$ к $d(d, p)^3\text{H}$ из экспериментов (точки) и теории (сплошная линия).



Необходимы новые измерения сечения реакции неполяризованного dd-синтеза по обоим каналам!

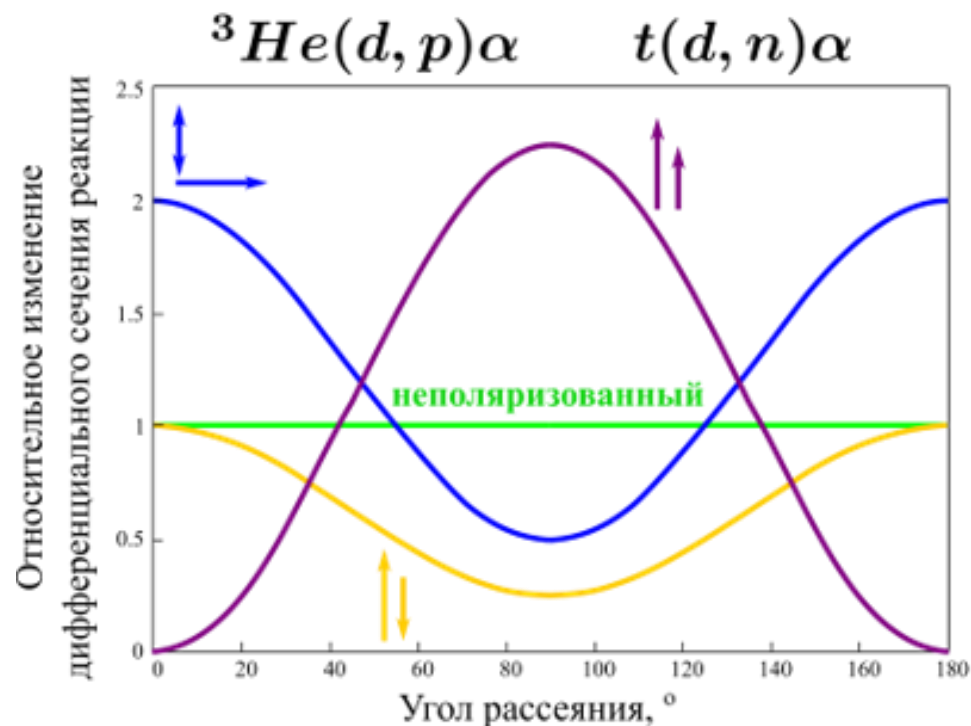
Ofelia Pisanti, Gianpiero Mangano, Gennaro Miele, and Pierpaolo Mazzella
Primordial Deuterium after LUNA: concordances and error budget (2020)

Теоретическое предсказание:
K. Arai, S. Aoyama, Y. Suzuki, P. Descouvemont, and D. Baye Phys. Rev. Lett. 107, 132502 (2011)



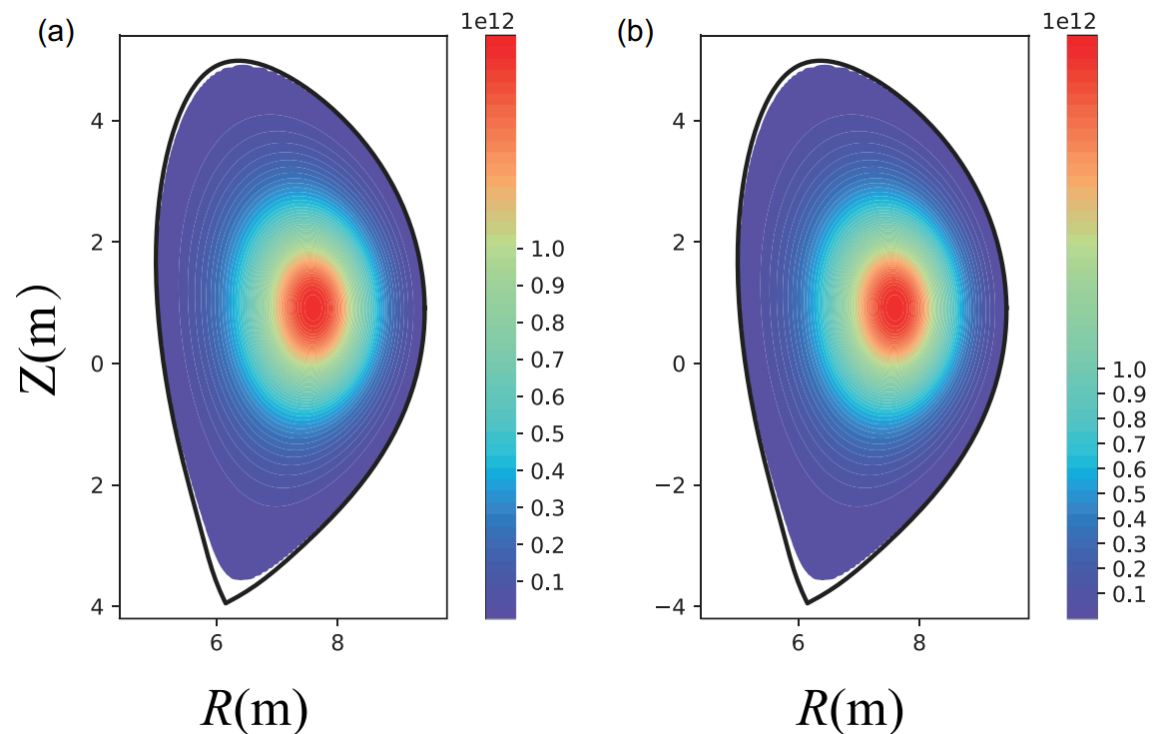
Термоядерный синтез и прикладные аспекты

- Увеличение сечения реакции
- Контроль над направлением разлета продуктов реакции
- Подавление нейтронного канала



Exp.: Ch. Leemann et al., *Helv. Phys. Acta* **44**, 141 (1971)
Theor.: G. Hupin et al. *Nature Com.* **10**, 321 (2019)

Распределения источников нейтронов в координатах (R, Z) для (а) неполяризованного случая и (б) случая полной параллельной поляризации.



W. Yang, G. Li, X. Gong, X. Gao, X. Li, H. Li... Effect of the Fusion Fuels' Polarization on Neutron Wall Loading Distribution in CFETR (2021)
<https://doi.org/10.1080/15361055.2021.1969064> (China Fusion Engineering Test Reactor (CFETR))