

В. В. Приходько

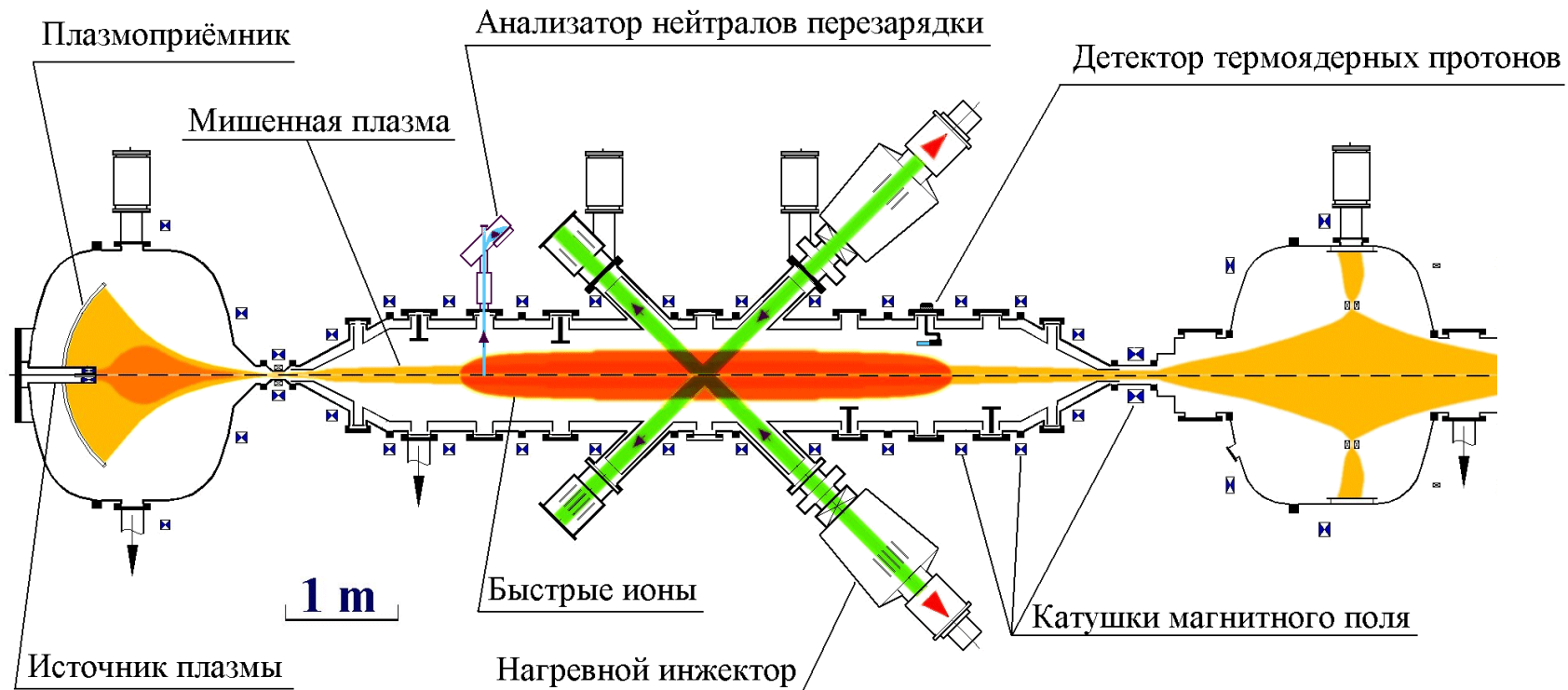
Удержание анизотропных горячих ионов с конечным β в установке ГДЛ

(по материалам кандидатской диссертации)

Структура диссертации:

- Введение
- Изучение пространственных профилей плотности быстрых ионов в ГДЛ в режимах с высоким значением параметра β
- Эксперимент с компактным пробкотроном на установке ГДЛ
- Выводы

ГДЛ – модель источника нейтронов



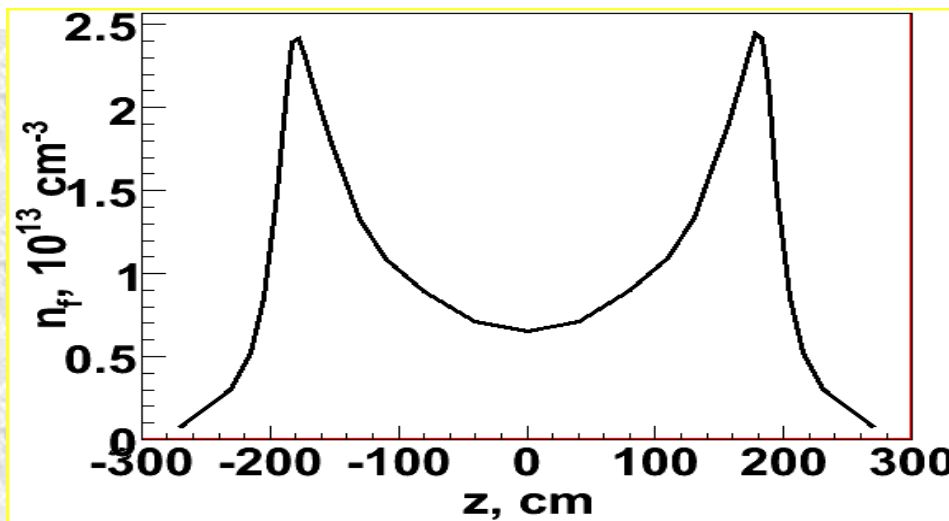
Особенности эксперимента:

$$2\rho_{fi} / a_w \approx 0.5,$$

$$n_f / n_w \approx 0.5,$$

$$\beta \approx 0.4,$$

$$A \sim 1.$$



Магнитная система:

$$R=35, B_0=2.6 \text{ кГс.}$$

Мишенная плазма:

$$\text{водород, } n_w = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3},$$

$$T_w \approx 100 \text{ эВ, } a_w = 22 \text{ см.}$$

Инжекционная система:

$$\text{дейтерий, } E_0 = 18\text{-}20 \text{ кэВ,}$$

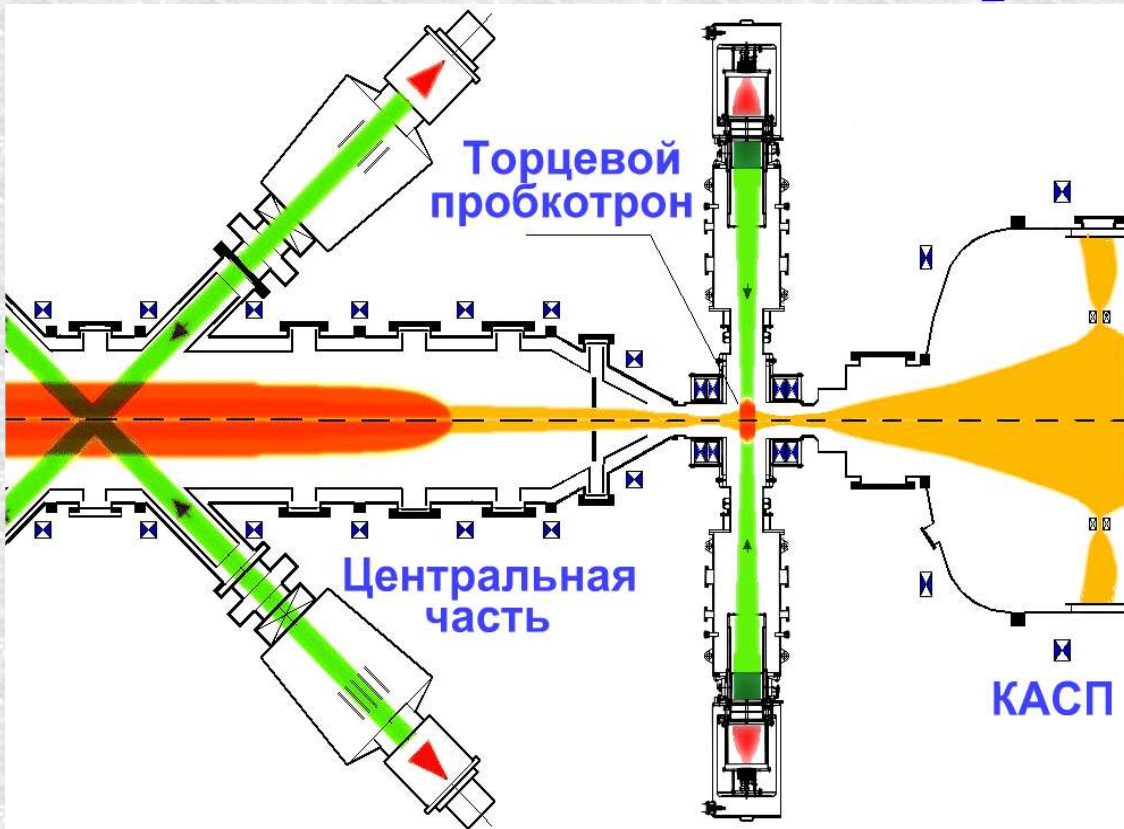
$$\theta = 45^\circ, P_{inj} = 4 \text{ МВт, } \tau_{inj} = 1 \text{ мс.}$$

Anikeev A.V., et. al., Nucl. Fus., **40**, №4, (2000)

Maximov V.V., et. al., Nucl. Fusion., **44**, (2004).

Ivanov A.A., et.al., Phys. Rev. Lett., **90**, №10 (2003)

Компактный пробкотрон на ГДЛ



Особенности
эксперимента:

$$2\rho_{fi} / a_w \approx 0.1, n_f / n_w \gg 1, \\ \beta \approx 0.01, A=50.$$

Камера КП:

$$L=30 \text{ см}, D=70 \text{ см}.$$

Магнитная система:

$$R=2, B_0=22.5 \text{ кГс}.$$

Мишенная плазма:

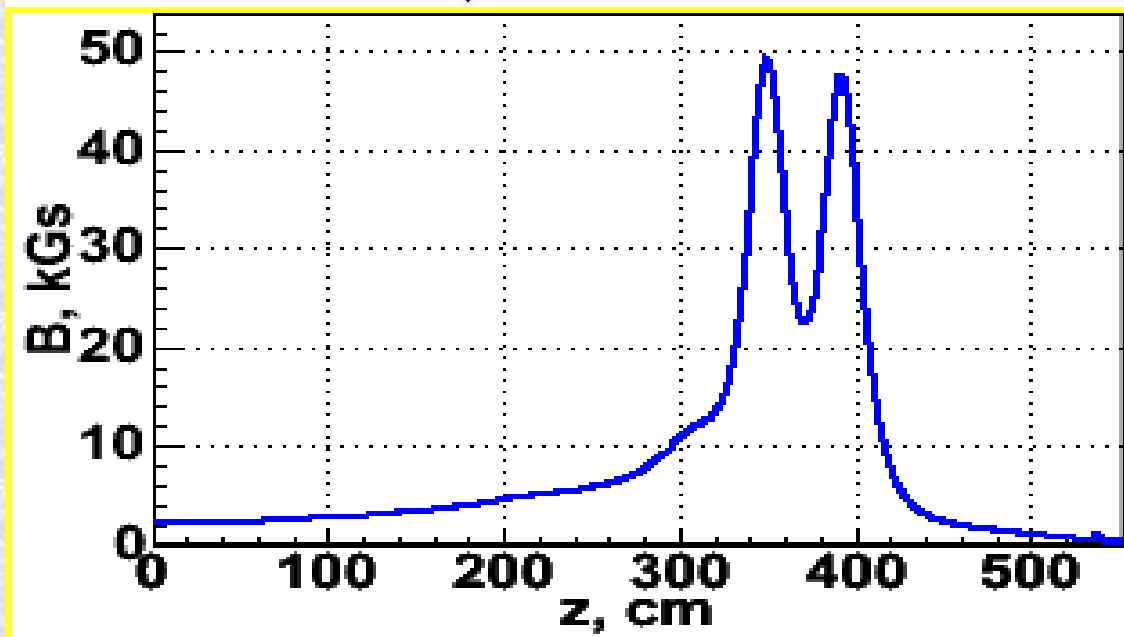
$$\text{водород, } n_w \approx 10^{13} \text{ см}^{-3},$$

$$T_w \approx 70 \text{ эВ}, a_w = 9 \text{ см}.$$

Инжекционная система:

$$\text{водород, } E_0 = 17 \text{ кэВ}, \theta = 90^\circ,$$

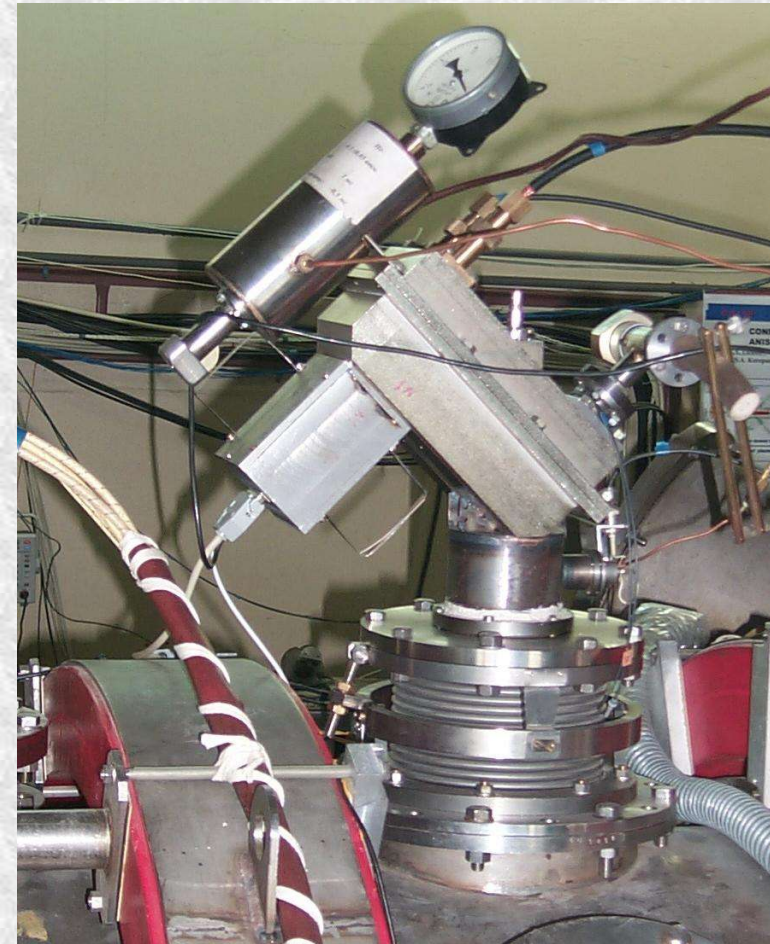
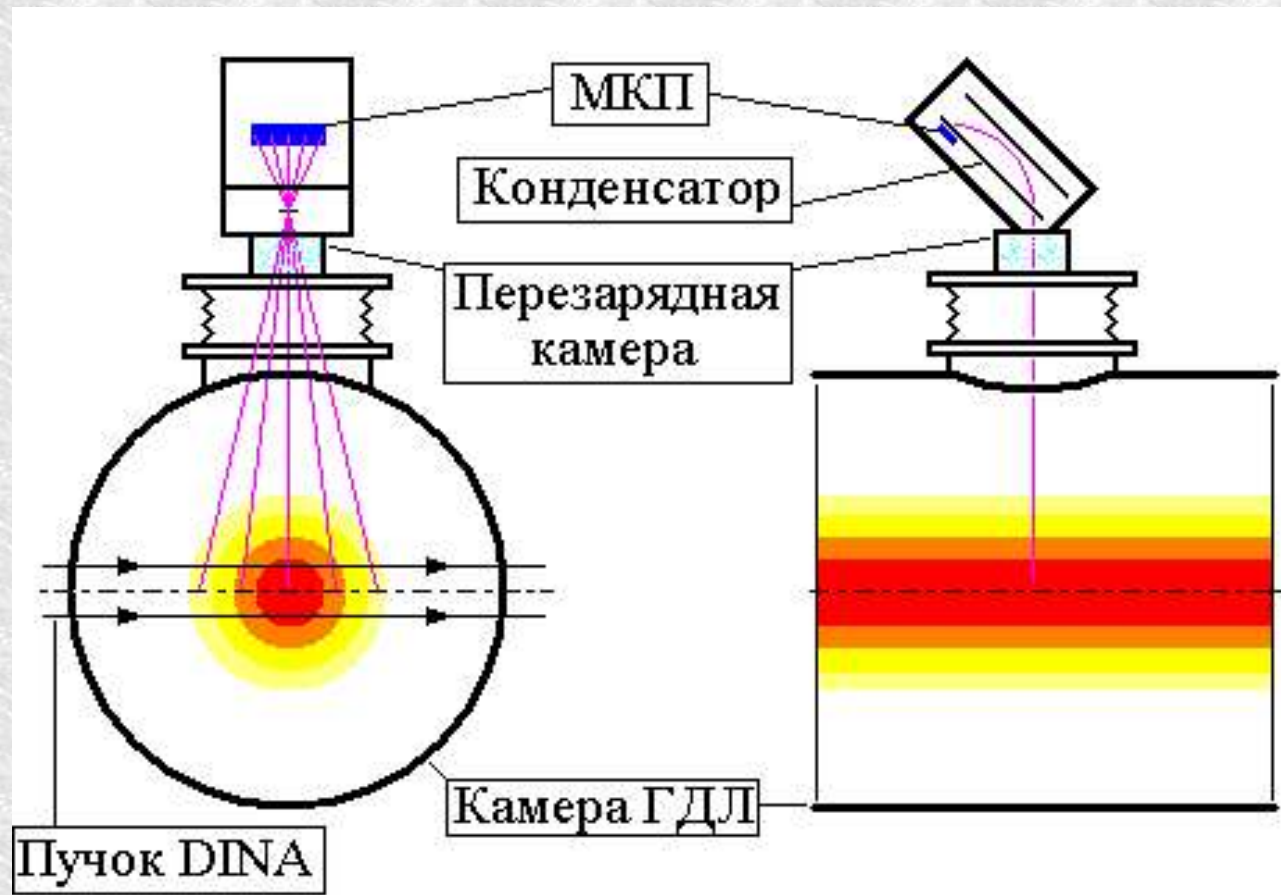
$$P_{inj} = 0.2 \text{ МВт}, \tau_{inj} = 0.9 \text{ мс}.$$



Основные задачи исследований:

- Изучение радиального профиля плотности быстрых ионов вблизи области остановки в режимах с $\beta=40\%$;
- Изучение горячих анизотропных ионов с $n_f/n_w > 1$ в компактном пробкотроне.

Анализатор нейтралов перезарядки



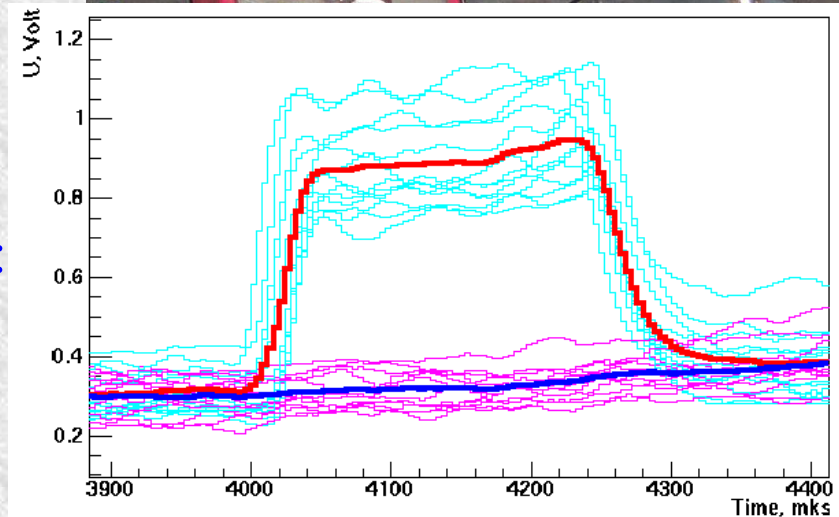
Мишень: пучок атомов водорода,
 $E_b = 40$ кэВ,
 $j_b = 0.25$ экв.А/см²,
 $D_b = 4$ см.

Система регистрации:

11 каналов,
 $\tau = 18$ мкс,
 $\Delta E/E = 6\%$.

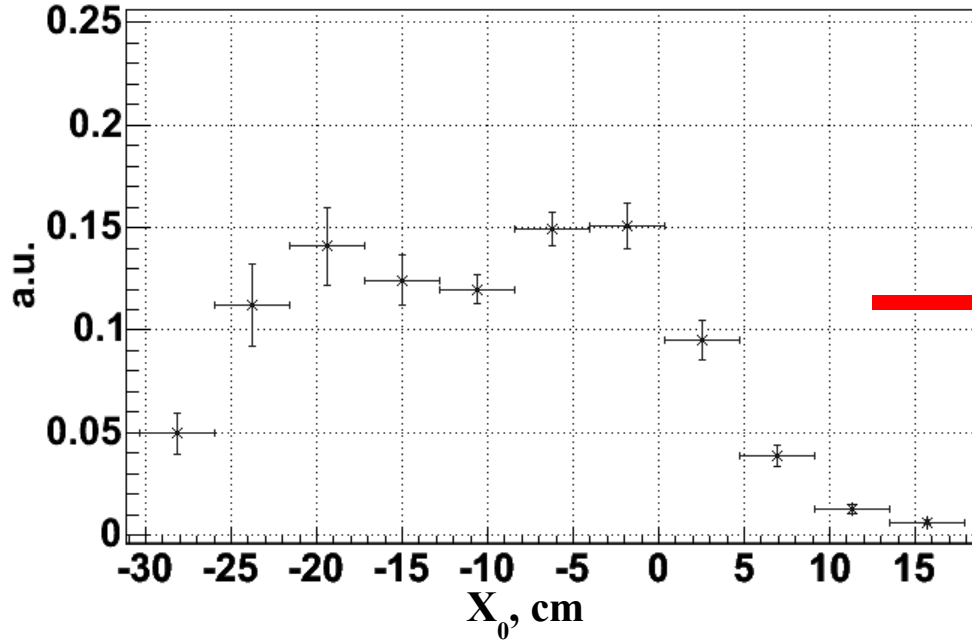
Размеры сканируемой области:

один канал $4 \times 4 \times 3$ см³,
 суммарно $4 \times 4 \times 35$ см³.



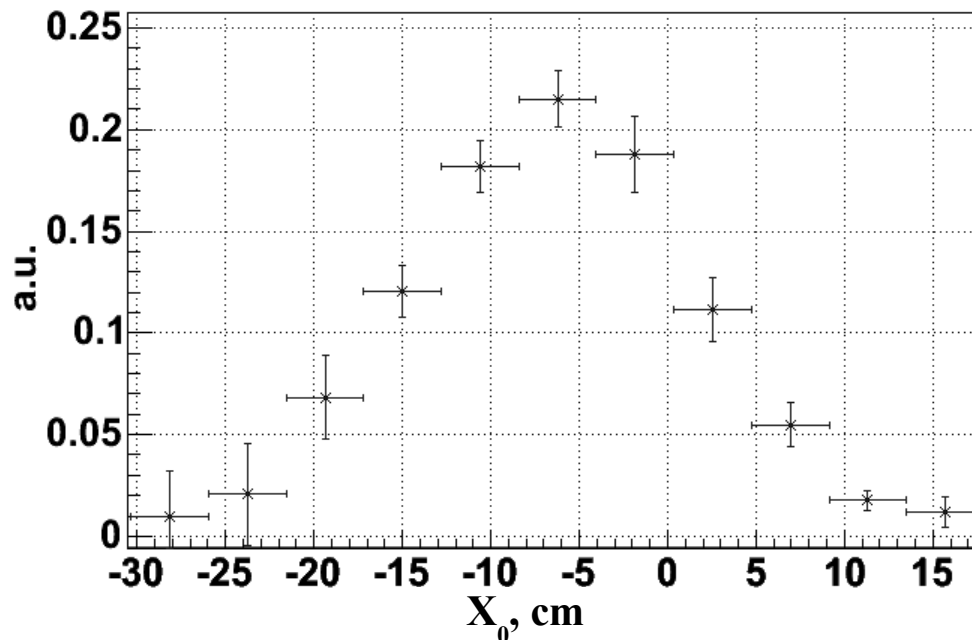
Профили потока нейтралов перезарядки

$\alpha=31$ cm, $E=20$ keV

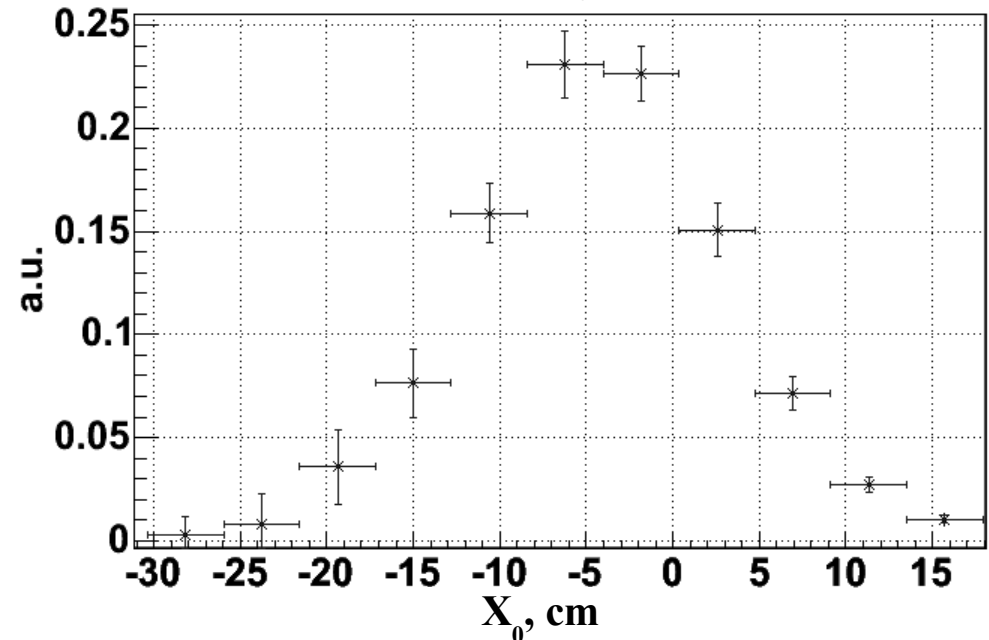


Соответствует профилю плотности ларморовских центров быстрых ионов, вычисленному по экспериментальным профилям плотности мишенной плазмы и нагревным пучков с учётом всех процессов захвата.

$\alpha=19$ cm, $E=16$ keV



$\alpha=16$ cm, $E=13$ keV



Детектор протонов DD-реакций

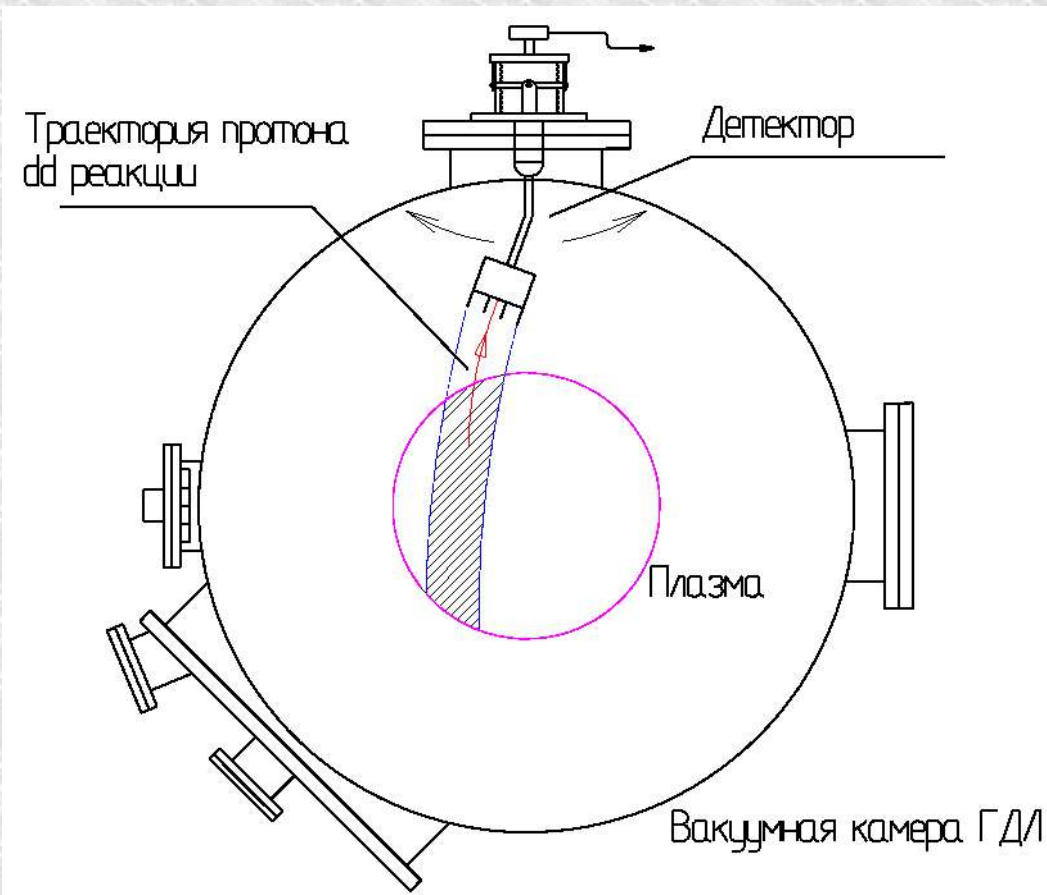
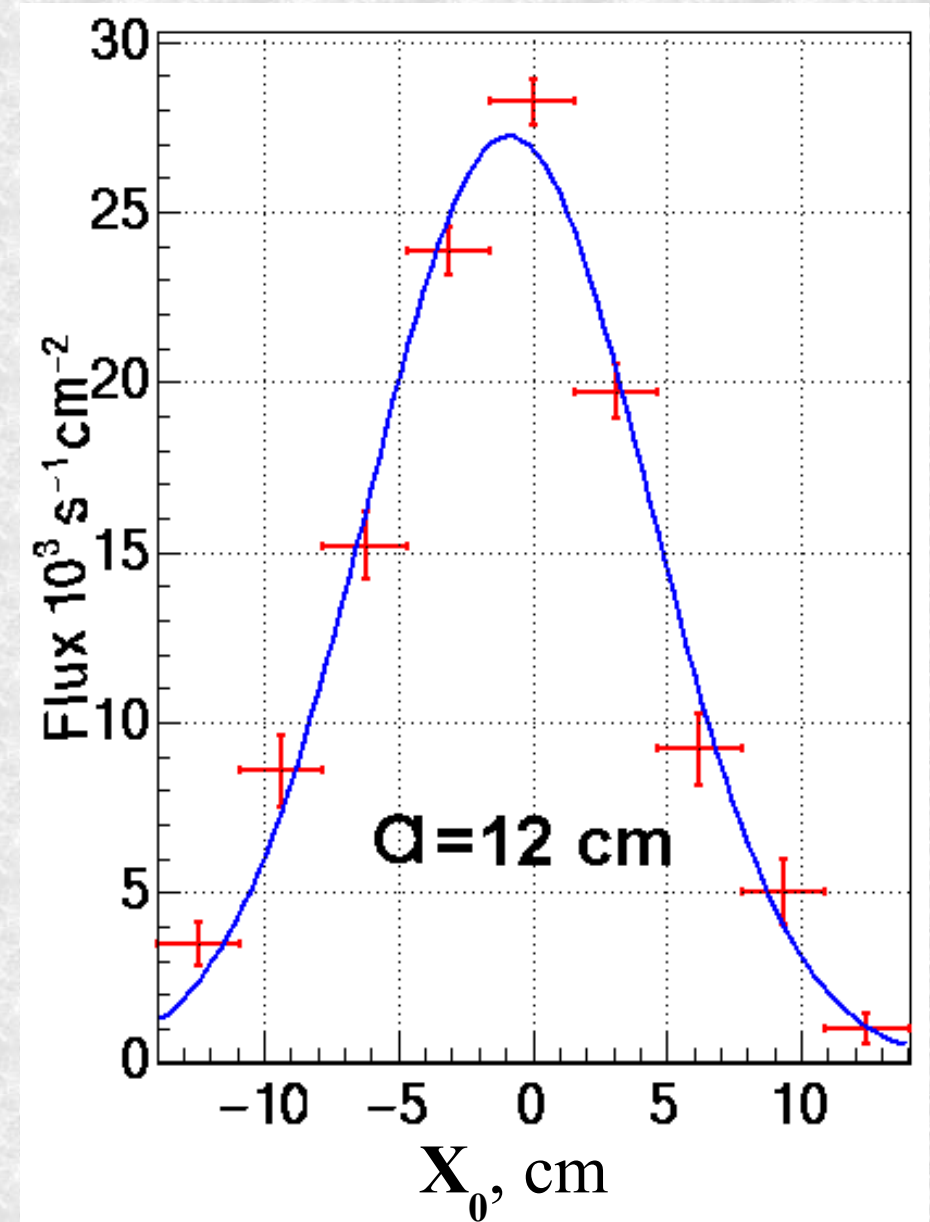


Схема установки детектора протонов

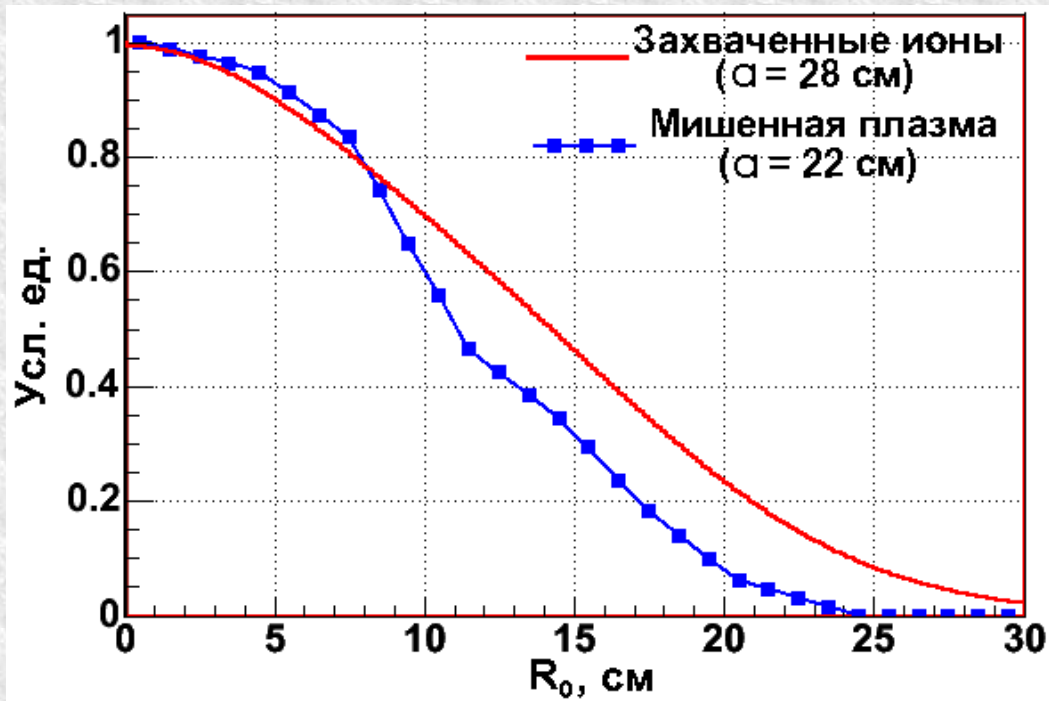


Профиль потока протонов.

Соответствует профилю плотности быстрых ионов с шириной $a_{fi} = 18 \text{ cm}$.

Сравнение с результатами расчётов

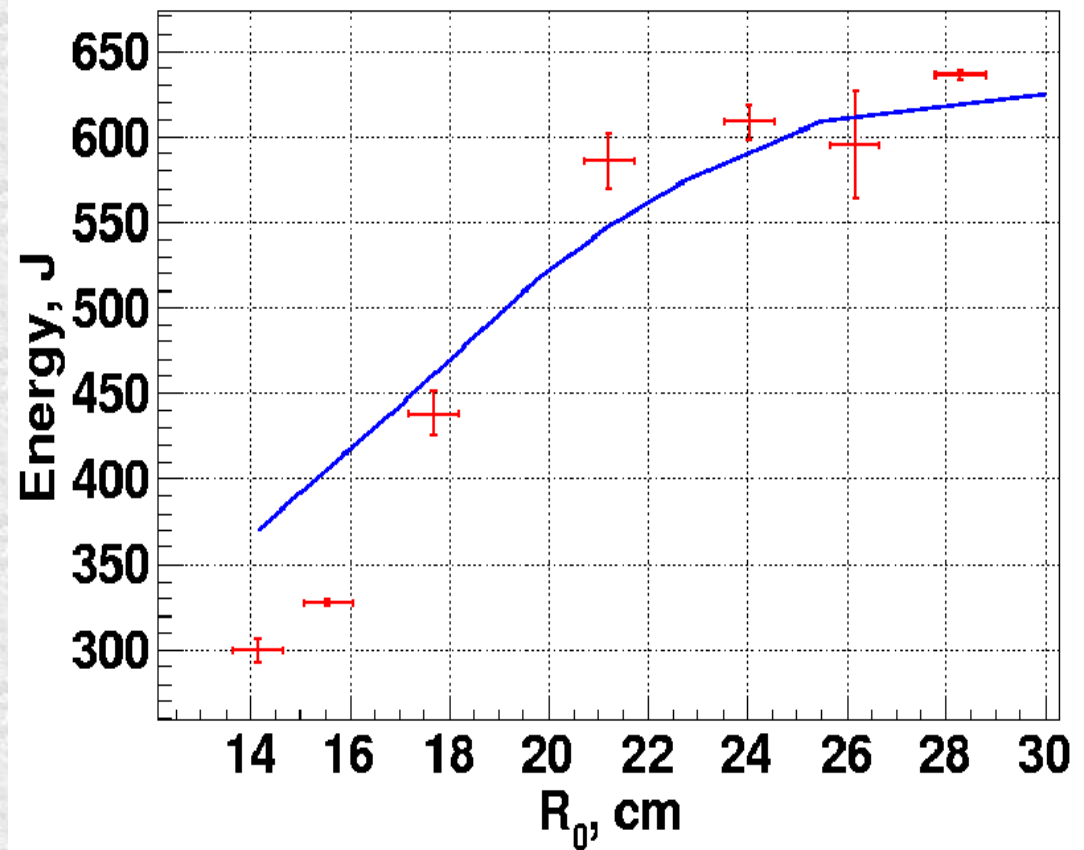
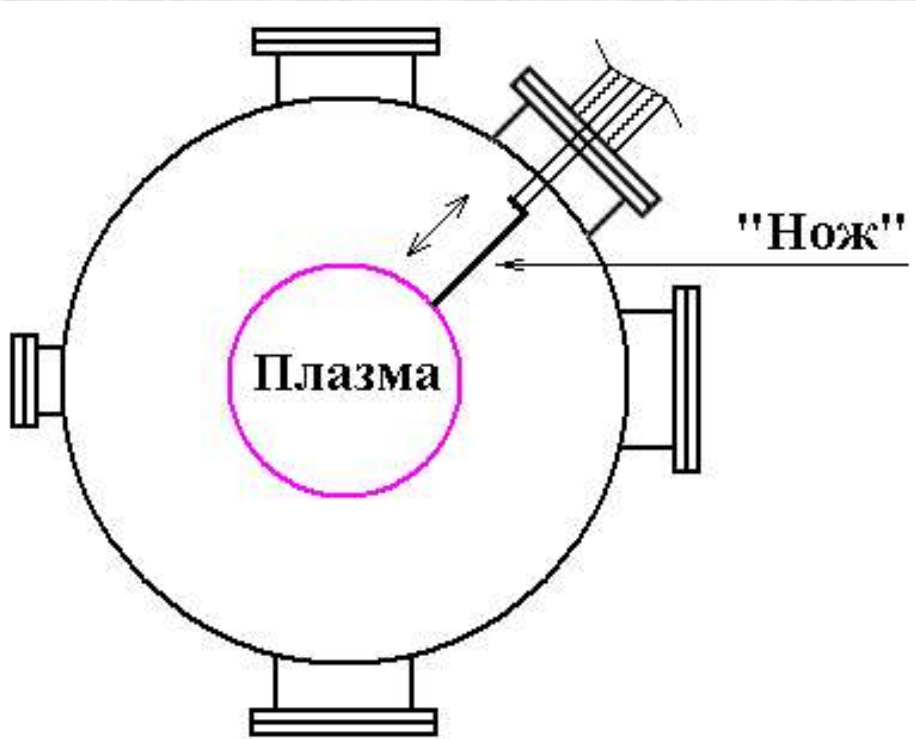
Параметр	a_w	a_{fi}	a_{DD}
Расчёт	22 см	28 см	20 см
Эксперимент	22 см	31-16 см	12 см



Модель учитывала:

- радиальный профиль плотности и температуры мишенной плазмы;
- параметры нагревных пучков и процессы захвата;
- парные кулоновские столкновения быстрых ионов с мишенной плазмой.

Эксперимент с подвижным лимитером



$$\tau_{bounce} = 15 \text{ мкс}$$

$$\tau_{\nabla B} = 4 \text{ мкс}$$

Энергосодержание плазмы (точки — результаты эксперимента, сплошная линия — численный расчёт)

Обоснования

2D-задача (*Tsidulko Yu.A.*, Phys. Plasmas, **11**, p.4420 (2004)):

- Однородность вдоль магнитного поля, все частицы имеют одну энергию $E=E_0=\text{const}$, магнитный момент сохраняется $\mu=\text{const}$.
- Энергетически выгодно собрать частицы вблизи оси.
Характерное время перераспределения $t \sim 10^3 \tau_{ci} = 250 \text{ мкс}$.
- Теорема Лиувилля: профиль плотности быстрых ионов монотонно спадает \Rightarrow сжатия не происходит.

3D-задача (*Колесников Е. Ю., Цидулко Ю. А.*, Тезисы докладов XXXIII Звенигородской конференции, стр. 57 (2006)):

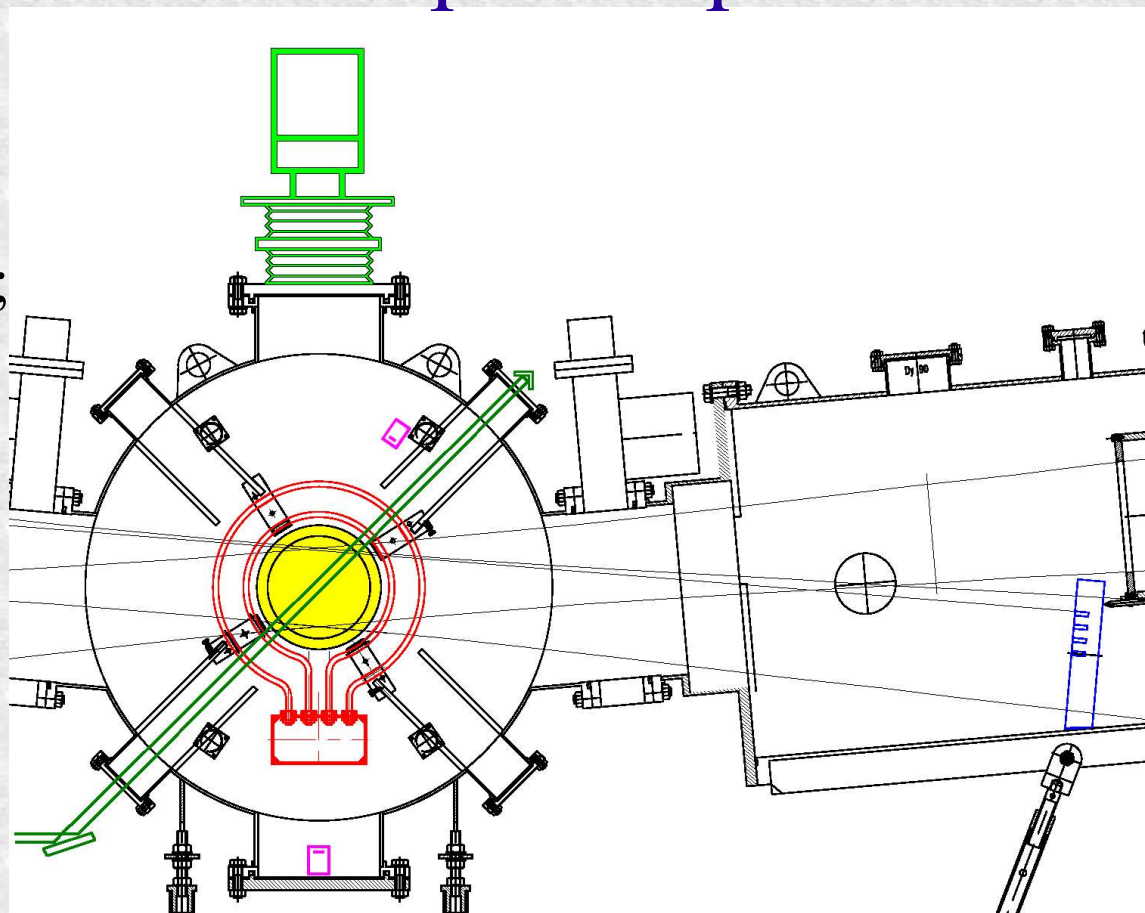
- Резонансные траектории: $\Omega_{\varphi} / \Omega_b = m/n$.
- Асимметричные возмущения могут приводить к радиальному переносу частиц на резонансных траекториях.

Эксперимент с компактным пробкотроном

Диагностики:

Компактный пробкотрон:

- Приёмники пучков и калориметр;
- Боллометры;
- Диаманитная петля;
- Анализатор нейтралов перезарядки;
- Дисперсионный интерферометр;
- Пучково-спектроскопическая диагностика (MSE).



Расширитель:

- СВЧ-интерферометр;
- Анализатор продольных энергий ионов.

Центральная ячейка:

- Томсоновское рассеяние.

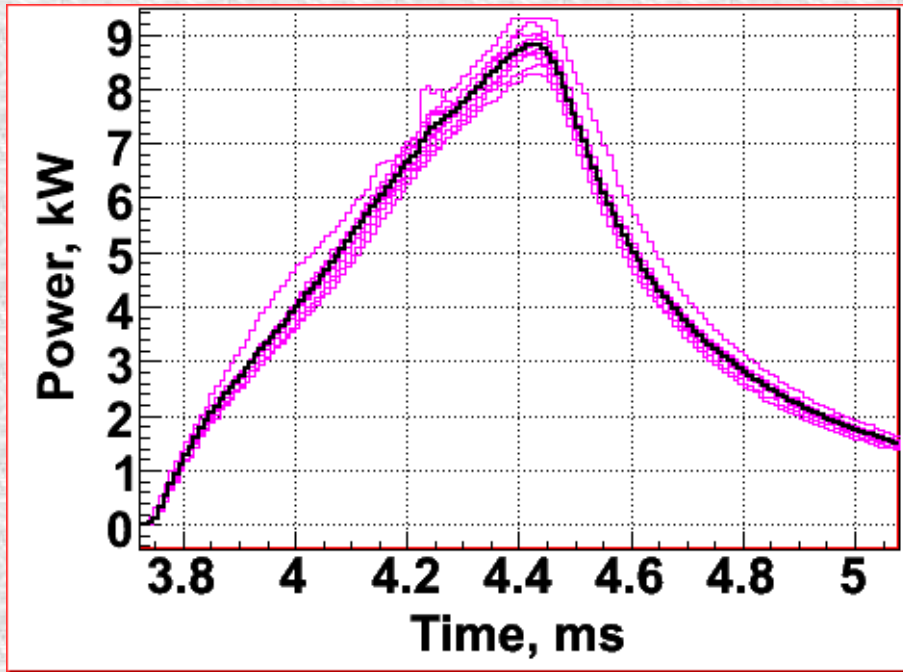
Камера КП: $L=30$ см, $D=70$ см.

Магнитная система: $R=2$, $B_0=22.5$ кГс.

Мишенная плазма: водород,
 $n_w \approx 10^{13}$ см⁻³, $T_w \approx 70$ эВ, $a_w = 9$ см.

Инжекционная система: $\theta=90^\circ$, водород,
 $E_0=17$ кэВ, $P_{inj}=0.2$ МВт, $\tau_{inj}=0.9$ мс.

Поток энергии на первую стенку

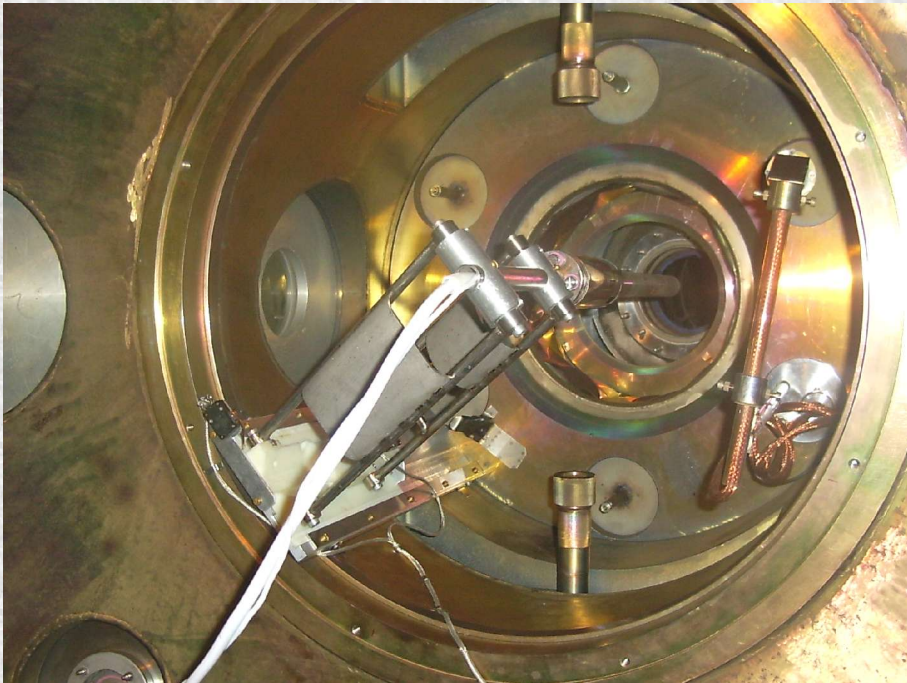


Максимальная мощность потерь на первую стенку 9 ± 0.5 кВт.

Оценки перезарядных потерь быстрых ионов:

на нагревных пучках 8 кВт,
на «тёплых атомах» 0.5 кВт.

Вывод: поток энергии на первую стенку определяется в основном перезарядкой быстрых ионов на атомарных пучках.

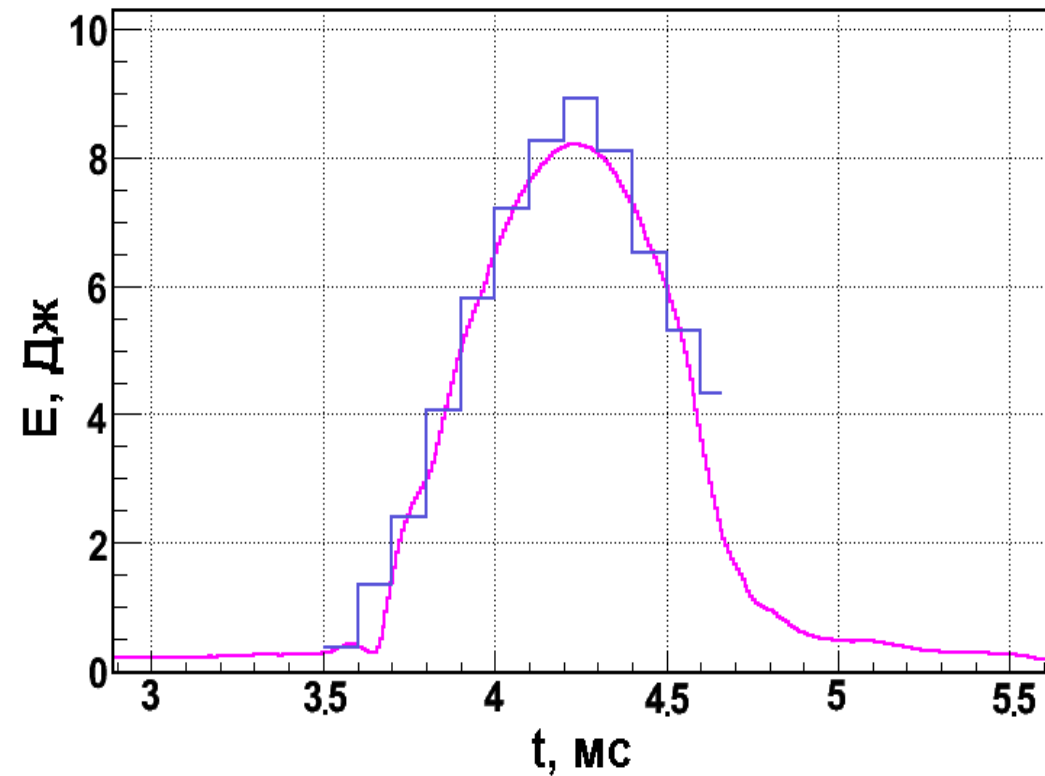


Линейная плотность и диамагнетизм плазмы

Линейная плотность электронов



Диамагнетизм плазмы



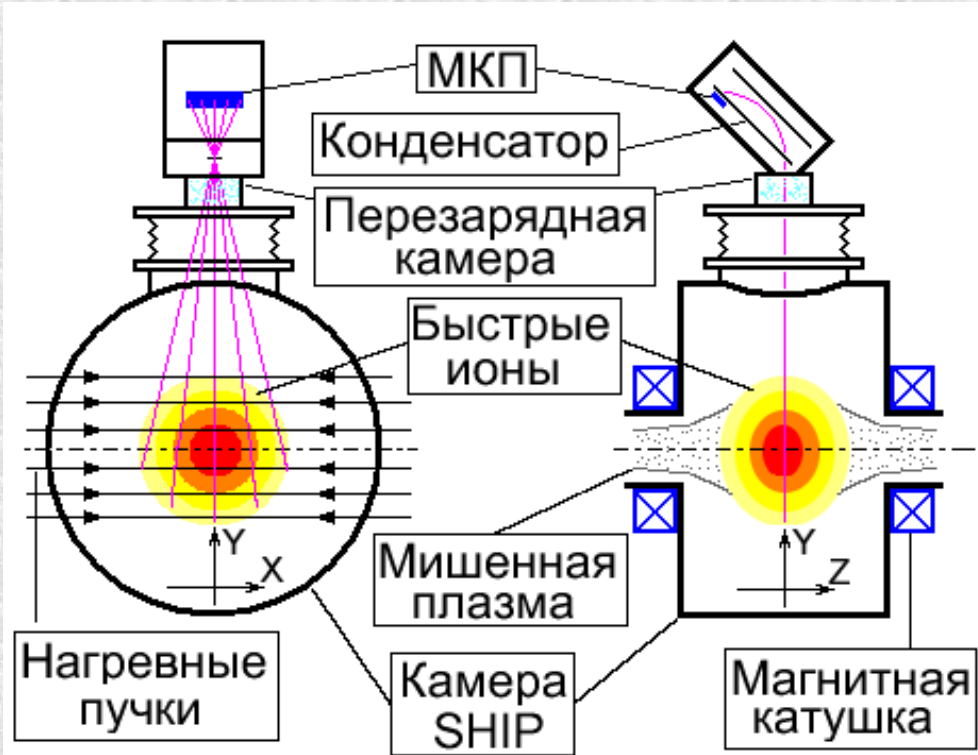
Течение мишенной плазмы в КП бесстолкновительное, однако функции распределения электронов и тёплых ионов близки к равновесным Максвелловским.

Эксперимент: $n_0 = 0.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; $n_f = 1.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; $n_w = 0.4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; $n_f / n_w = 3$.

Оценки: $n_0 = 0.8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; $n_f = 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; $n_w = 0.44 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; $n_f / n_w = 2.3$.

Вывод: удержание быстрых ионов в КП определяется классической кинетикой парных кулоновских столкновений и перезарядкой.

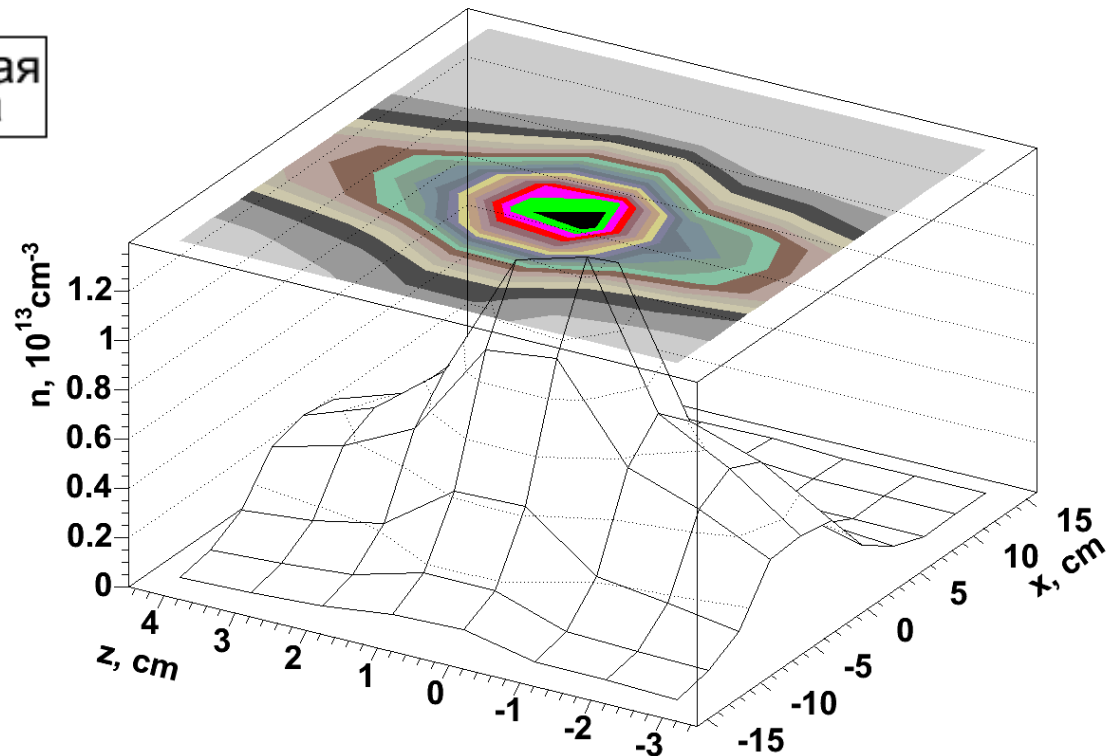
Профиль плотности быстрых ионов



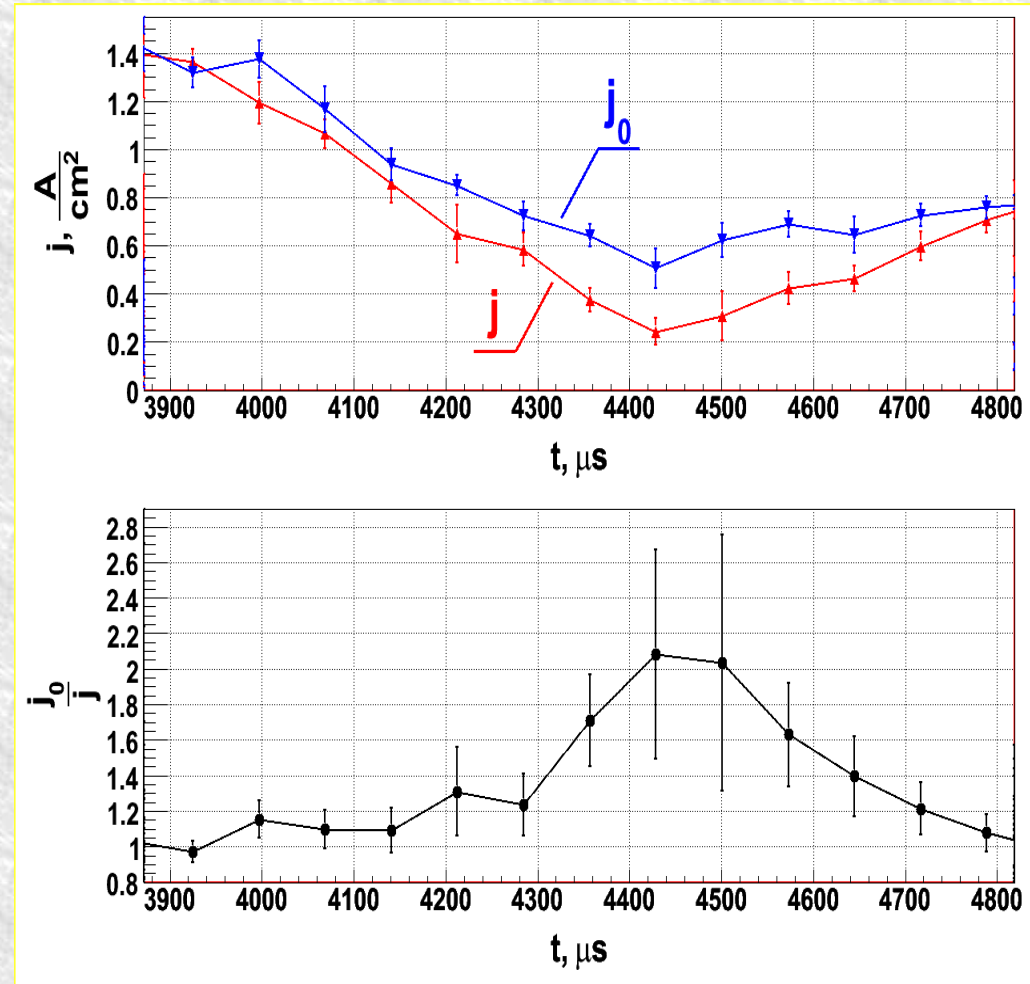
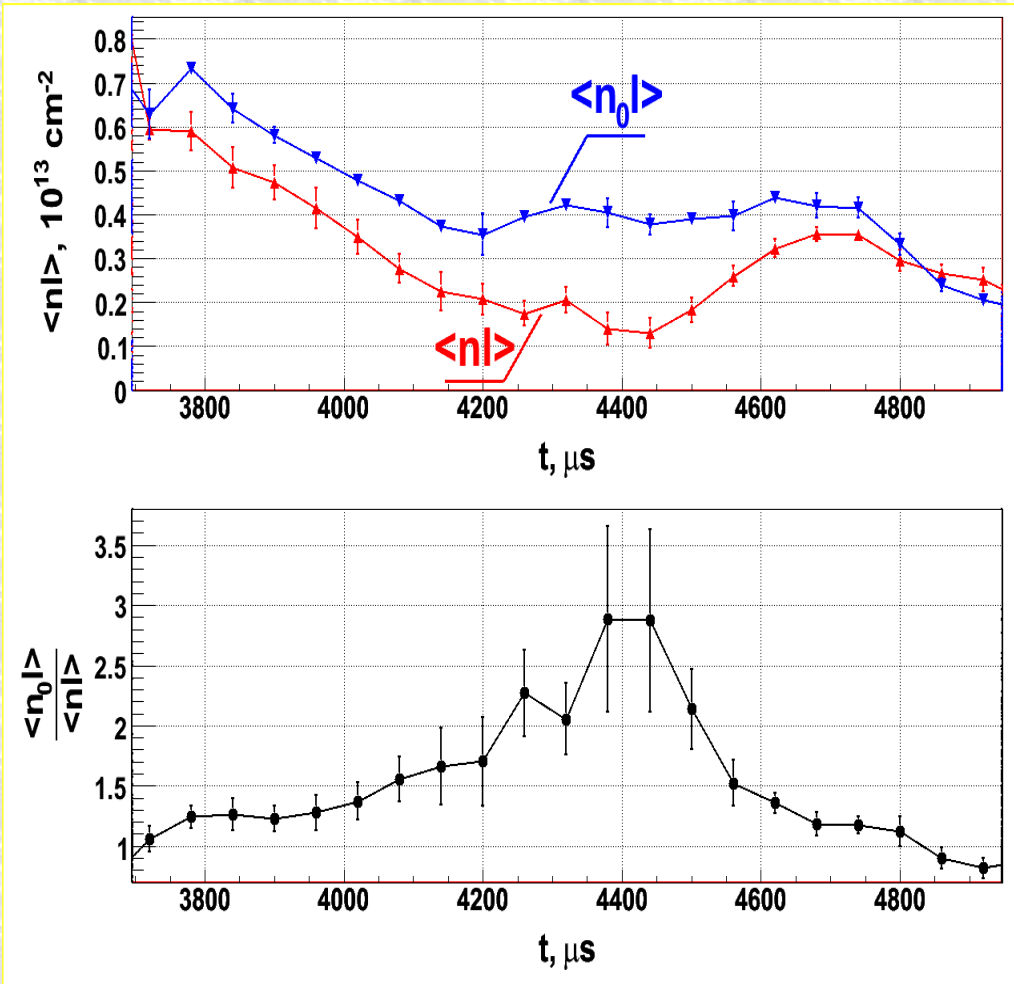
Плотность $1.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$;
 β 1%;
Размеры по уровню $1/e$:
вдоль оси z 5 см,
диаметр 13 см.

Мишень – нагревные пучки:
водород, $I=13$ эквив.А,
 $E_0=17$ кэВ, $D=8$ см.

Размеры сканируемой области:
один канал: $2.9 \times 8 \times 1.2 \text{ см}^3$;
суммарно: $32 \times 8 \times 1.2 \text{ см}^3$.



Амбиполярный эффект



Линейная плотность плазмы
в расширителе

Плотность потока плазмы
в расширителе на оси установки

Оценка: $j \sim n \sim \exp(-e\phi/T) \Rightarrow \frac{\langle n_0 l \rangle_{\text{КАСП}}}{\langle nl \rangle_{\text{КАСП}}} \approx \frac{j_0, \text{КАСП}}{j_{\text{КАСП}}} \approx \frac{n_0}{n_w} \approx 1.8$

Сравнение параметров КП и концевого пробкотрона ТМХ

Параметр:	КП	ТМХ
<i>Мощность инжекции, МВт</i>	0.2	3.5
<i>Энергия инжекции, кэВ</i>	17	13
<i>Плотность быстрых ионов, 10^{13} см^{-3}</i>	1.2	1
β	1%	7%
<i>Анизотропия $A = \langle W_{\perp} \rangle / \langle W_{\parallel} \rangle$</i>	50	14
βA^2	25	13

Достигнутая плотность быстрых ионов близка к соответствующей величине, полученной в конечном пробкотроне амбиполярной ловушки ТМХ в штатном режиме.

Основные результаты

- Создан анализатор нейтралов перезарядки, позволяющий регистрировать профили плотности потока атомов с заданной энергией.
- В экспериментах с высоким $\beta \approx 40\%$ исследован эффект формирования узкого радиального профиля плотности быстрых ионов. Показано, что столь узкие профили формируются не за счет потерь, а за счёт *переноса частиц к оси установки*.
- Проведен эксперимент по удержанию плазмоида горячих ионов с анизотропным распределением в компактном пробкотроне. Плотность быстрых ионов достигла $1.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и в *три раза* превысила плотность ионов мишенной плазмы. Показано, что удержание быстрых ионов определяется *классической кинетикой парных кулоновских столкновений* и *процессом перезарядки* на атомарных нагревных пучках.
- В экспериментах с компактным пробкотроном *зарегистрирован эффект амбиполярного запирания* потока плазмы из центральной ячейки установки ГДЛ. Поток уменьшался *вдвое* при достижении максимальной плотности быстрых ионов в КП.

Оценка анизотропии $A = \langle W_{\perp} \rangle / \langle W_{\parallel} \rangle$

$$A = \frac{n_w T_w + n_f E_f \langle \sin(\theta)^2 \rangle}{n_w T_w + n_f E_f \langle \cos(\theta)^2 \rangle}$$

Вблизи области остановки $\theta = \pi/2 \gg \Delta\theta$:

$$A \approx \frac{n_w T_w + n_f E_f \cos(\Delta\theta)^2}{n_w T_w + n_f E_f \sin(\Delta\theta)^2}$$

КП: $\Delta\theta = 5^\circ \Rightarrow A \approx 90$; более точное моделирование $A = 50$.

Центр ГДЛ: $\sin^2 \theta = R \cdot \sin^2 \theta_0$ ($\mu = \text{const}$), $\theta_0 = 45^\circ$ и $\Delta\theta_0 = 5^\circ \Rightarrow$
 $\Rightarrow \Delta\theta = 30^\circ$, $A \approx 3$.

Оценки параметров плазмы в КП

$\lambda_{ii} \approx 7$ м, $\lambda_{ee} \approx 3$ м \Rightarrow бесстолкновительное движение мишенной плазмы

$-e\phi_{КАСП} \gg T_e \Rightarrow$ равновесная функция распределения электронов

$$n_{захв} = \frac{\dot{N}_{захв} \tau_{ii}}{V_{КП}} = \frac{j_{прот} S_{КП}}{e} \omega_{захв} \frac{\tau_{ii}}{V_{КП}} = n_{прот} \frac{v_{прот} \tau_{ii}}{\lambda_{ii}} \approx n_{прот} \Rightarrow$$

\Rightarrow равновесная функция распределения тёплых ионов

Плотность быстрых ионов n_f и тёплых ионов n_w можно найти по плотностям электронов без инжекции в КП n_0

и с инжекцией в КП n_e :

$$n_e = n_0 \cdot e^{\frac{e\phi}{T_e}}, \quad n_w = n_0 \cdot e^{-\frac{e\phi}{T_w}}, \quad T_e \approx T_w, \quad n_e = n_w + n_j \Rightarrow$$

$$\Rightarrow n_w = \frac{n_0^2}{n_e}, \quad n_f = n_e - n_w = \frac{n_e^2 - n_0^2}{n_e}$$