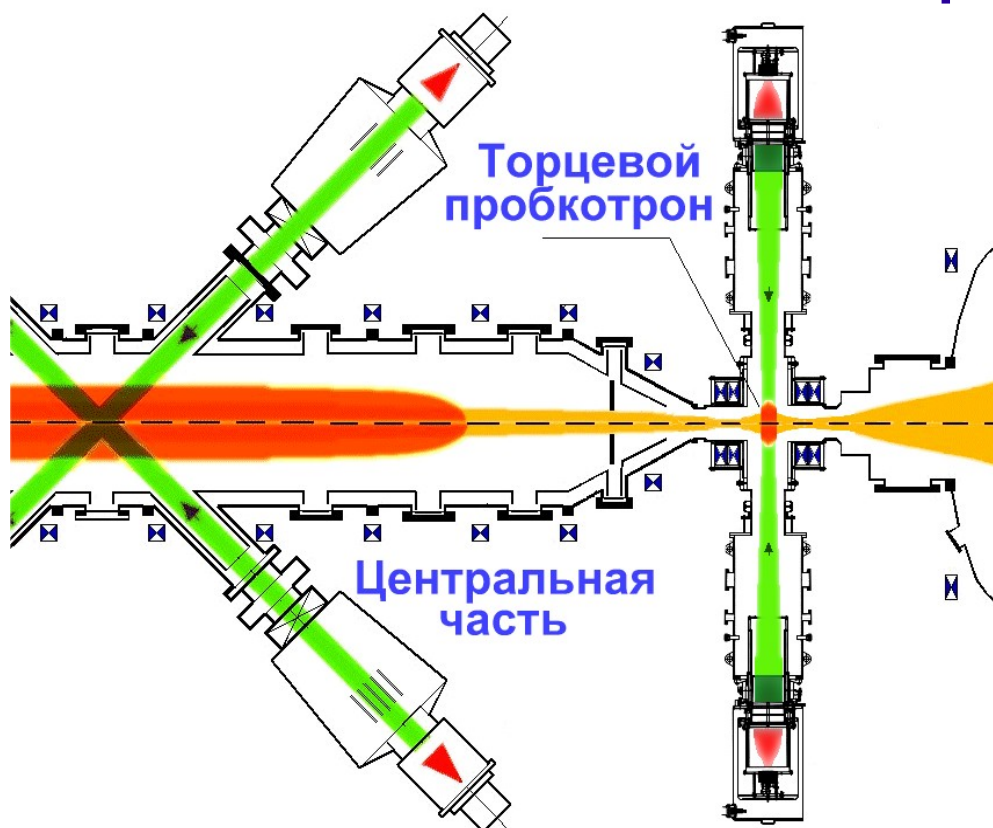


# Подавление продольных потерь в ГДЛ с помощью амбиполярной пробки

Аникеев А.В., Багрянский П.А., Беклемишев А.Д.,  
Бурцев А.С., Иванов А.А., Киреенко А.В.,  
Кириллов К.Ю., Коржавина М.С., Лизунов А.А.,  
Максимов В.В., Мурахтин С.В., Приходько В.В.,  
Пинженин Е., Солдаткина Е.И., Соломахин А.Л.

# Компактный пробкотрон на ГДЛ



## Магнитная система:

*центр ГДЛ:* 2.7 кГс,  
*пробка:* 60 кГс,  
*центр КП:* 27 кГс.

## Центральная ячейка:

### тёплая плазма:

водород,  
*плотность:*  $2-3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  
*температура:* 100 эВ;

### нагревные пучки:

водород,  
*мощность:* 2-2.5 МВт,  
*захват:* 40-50%,  
*длительность:* 5 мс.

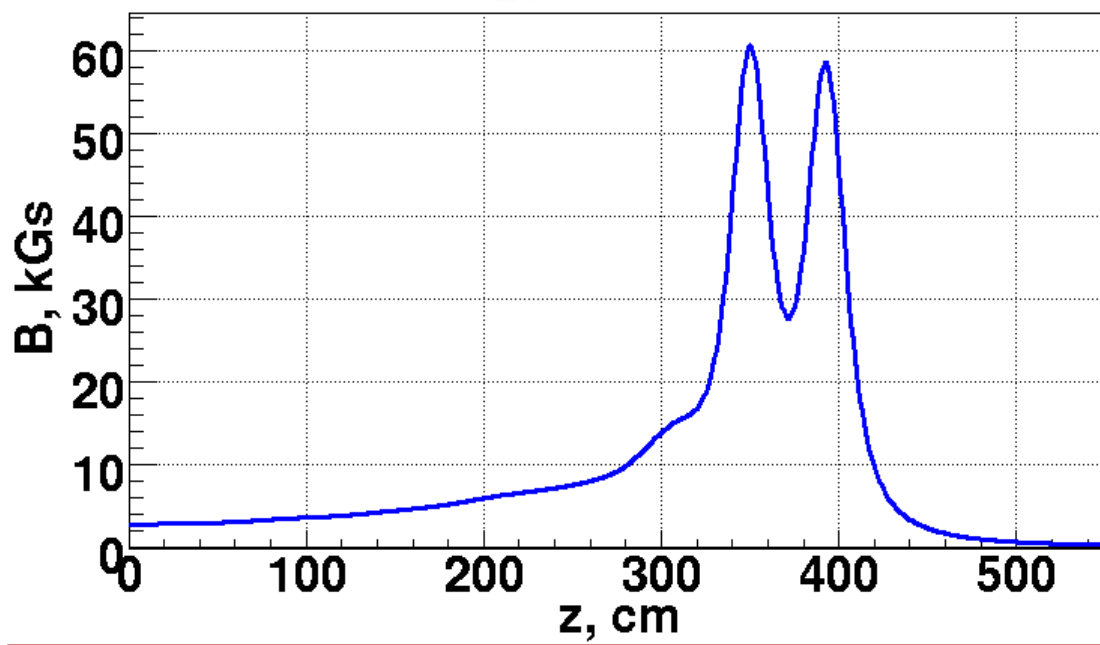
## КП:

### нагревные пучки:

дейтерий,  
*мощность* до 0.8 МВт,  
*захват* 10-15%,  
*длительность* 4 мс;

### горячие ионы:

*средняя энергия* 13 кэВ;  
*плотность:* до  $4.5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .



# Диагностики и измеряемые параметры

## Центральная ячейка:

- Приёмники пучков — захват пучков, линейная плотность тёплой плазмы;
- Диамагнитные петли — энергосодержание компонент плазмы;
- Томсоновское рассеяние — температура и относительная плотность электронов.

## КП:

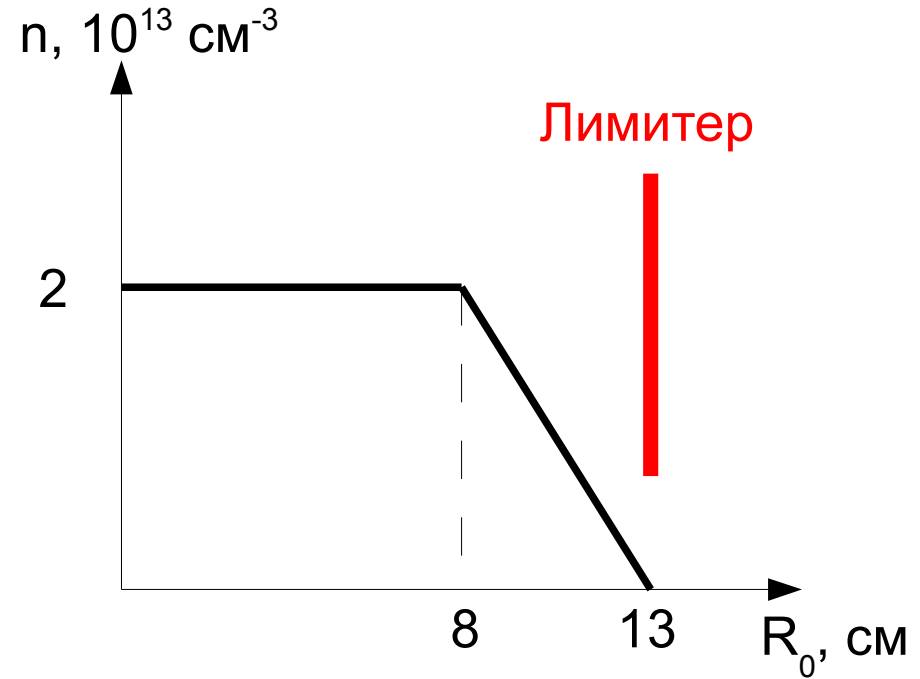
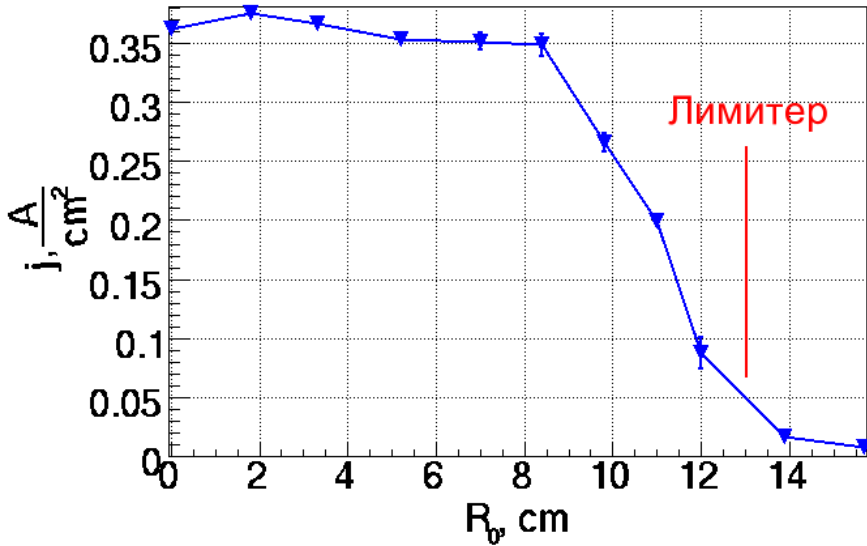
- Приёмники пучков и калориметры — захват пучков, полная инжектированная энергия;
- Дисперсионный интерферометр — линейная плотность электронов;
- Анализатор атомов перезарядки — пространственные профили плотности быстрых ионов.

## Расширитель:

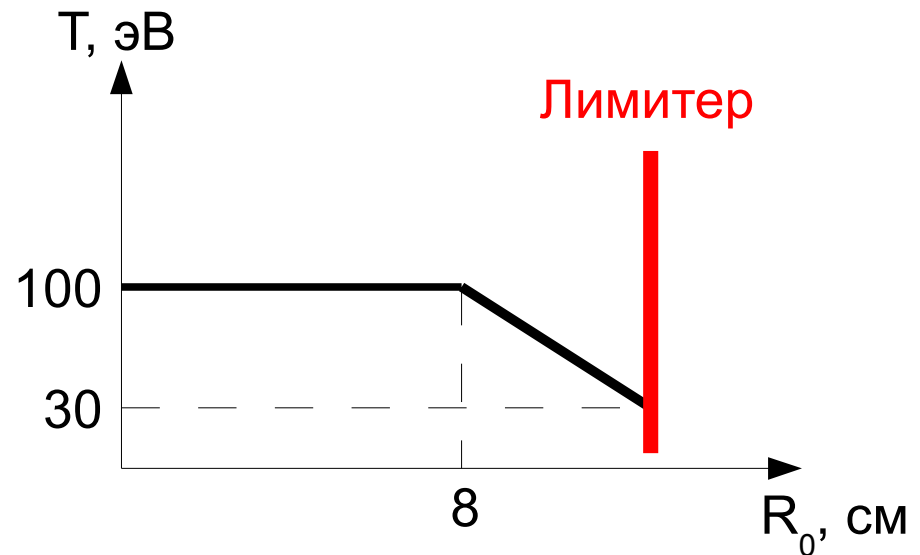
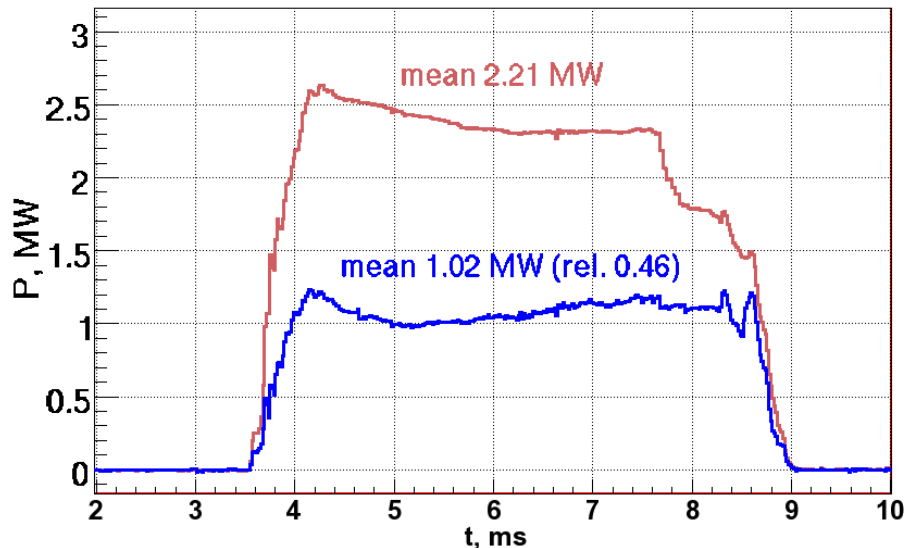
- Трёхсеточный зонд — ток ионов;
- Энергоанализатор — энергетический спектр ионов.

# Центральная ячейка: радиальные профили

Томсоновское рассеяние: плотность и температура постоянны на  $R_0 = 0 \dots 8$  см.

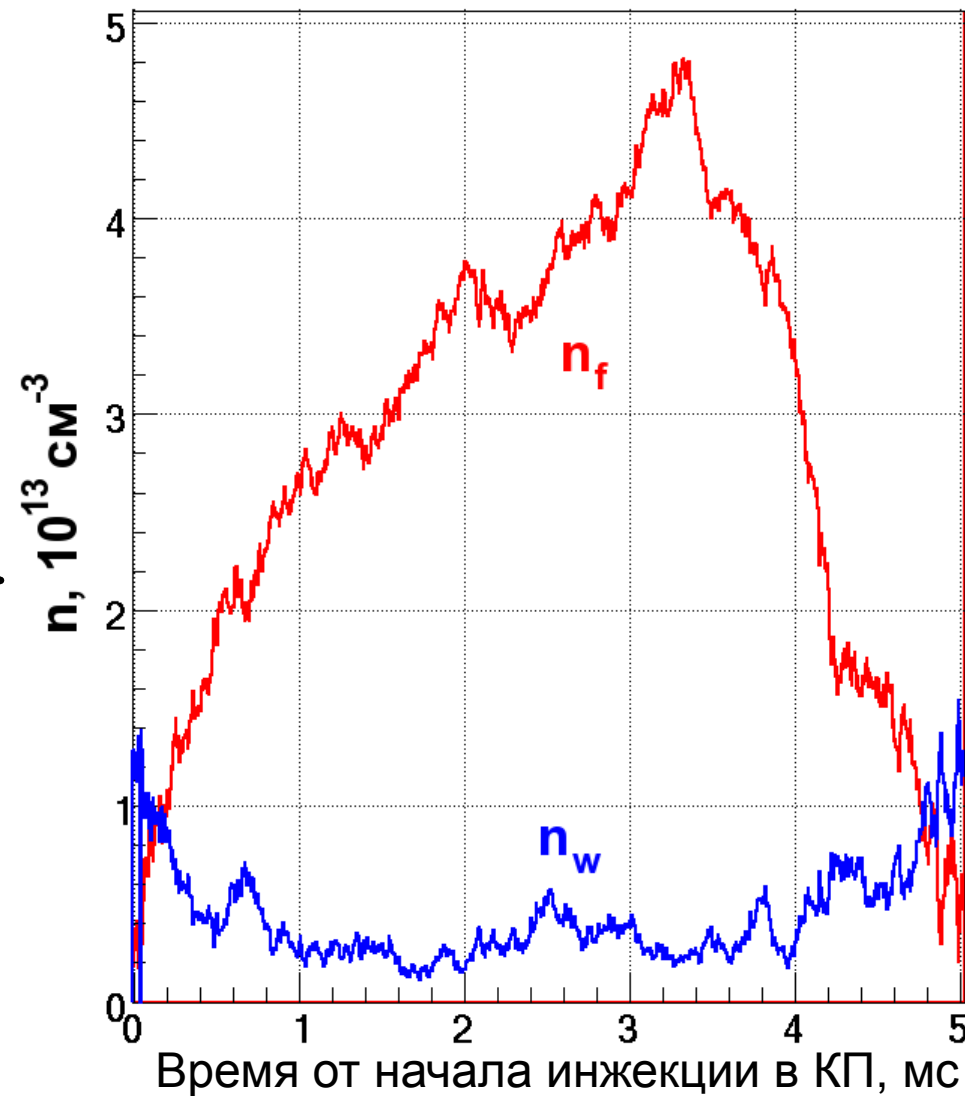
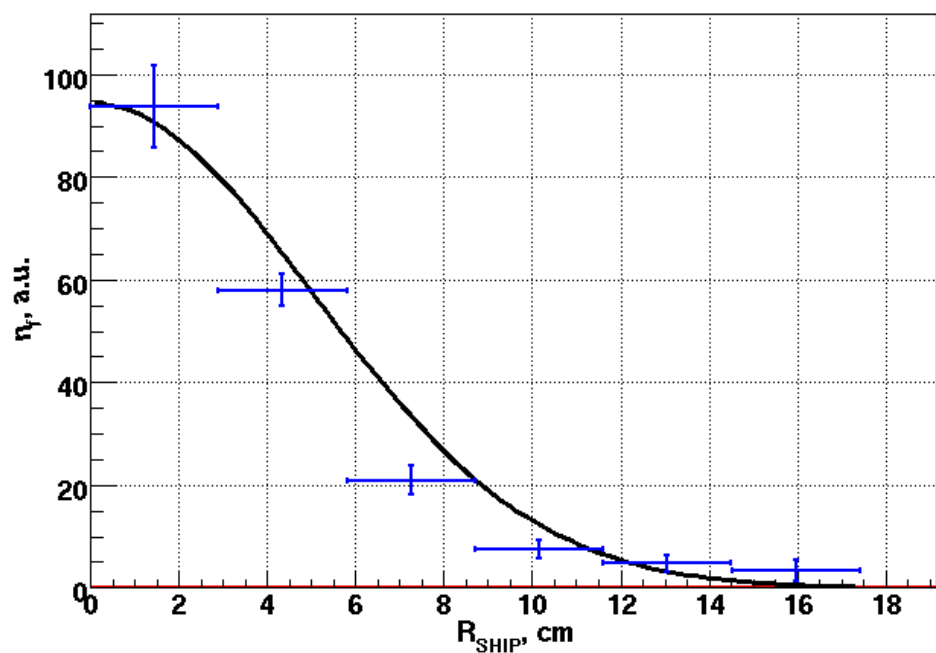
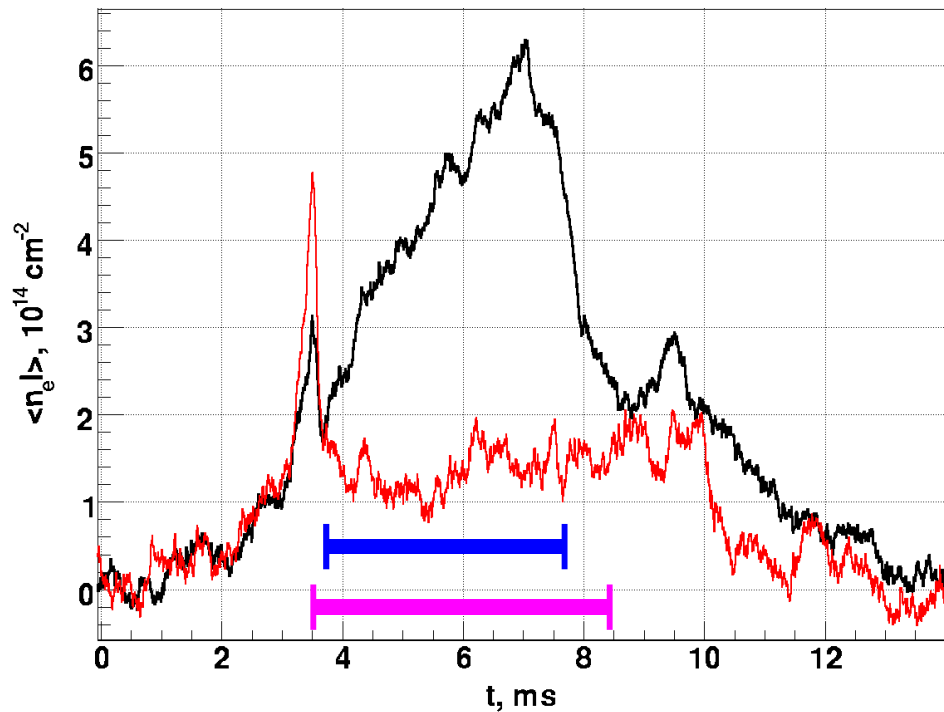


Плотность тока ионов без инжекции в КП

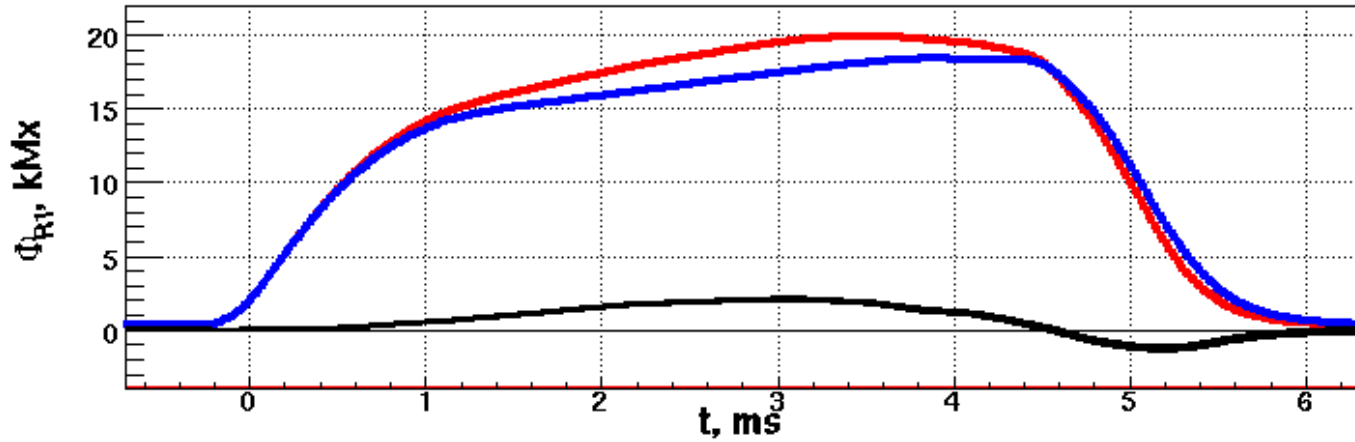


Инжектированная и захваченная мощности

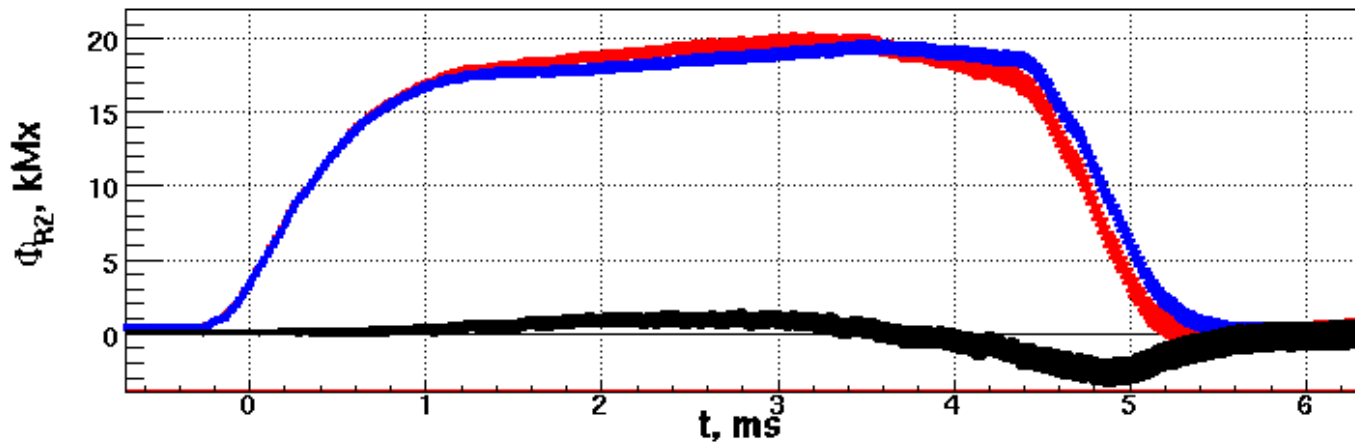
# КП: быстрые ионы



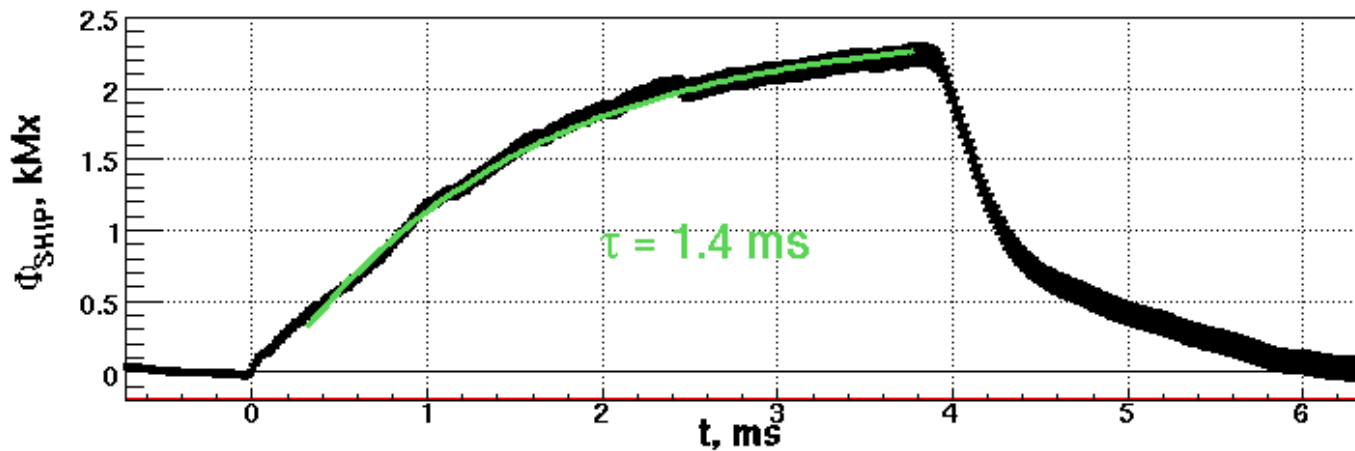
# Диамагнетизм плазмы



Тёплая плазма:  
 $\max(\Delta\Phi/\Phi) \approx 10\%$



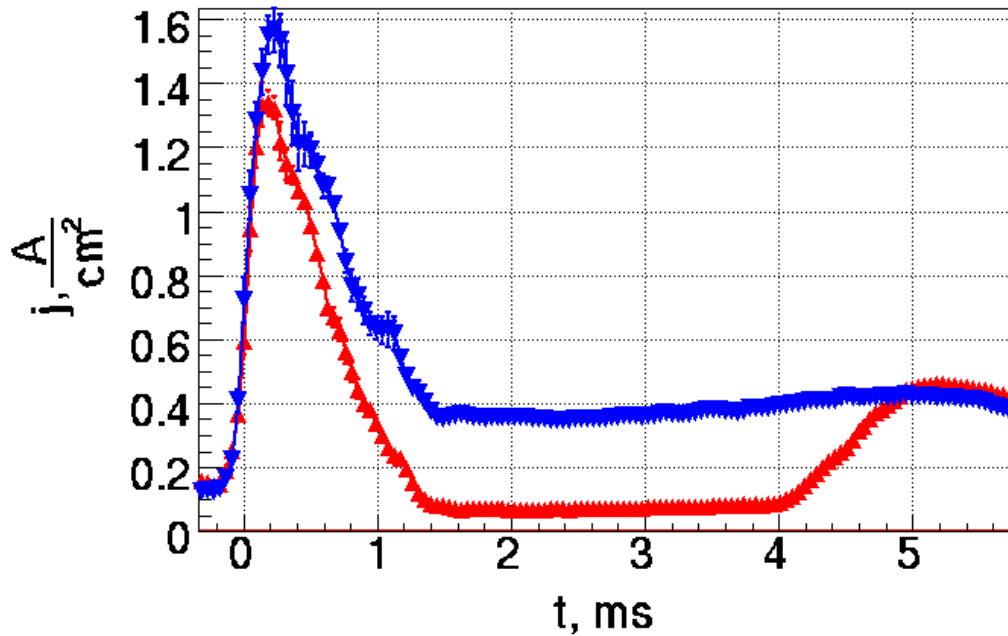
Быстрые ионы:  
 $\max(\Delta\Phi/\Phi) \approx 5\%$



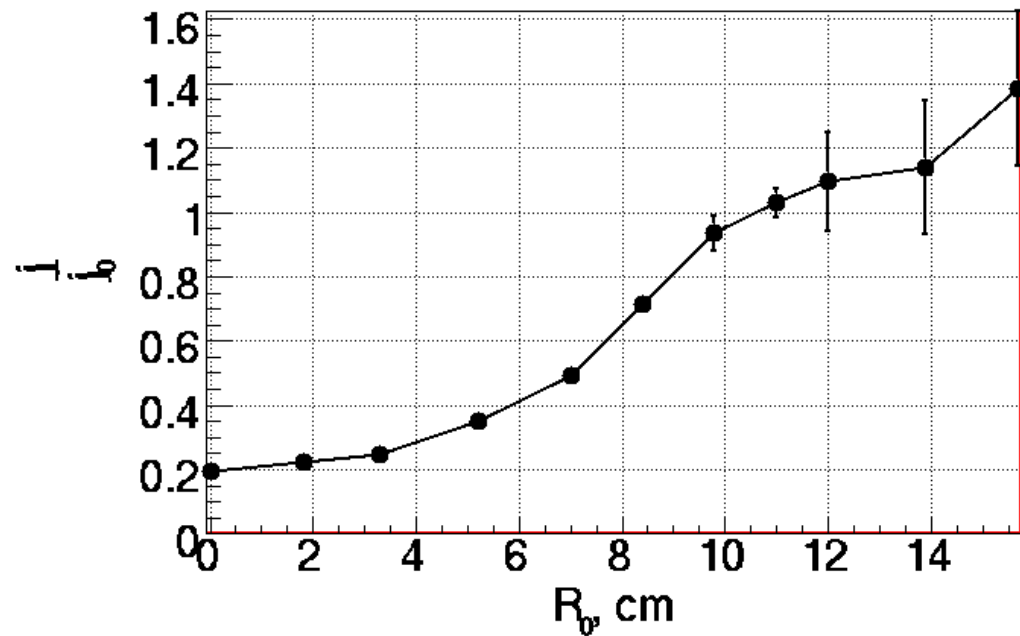
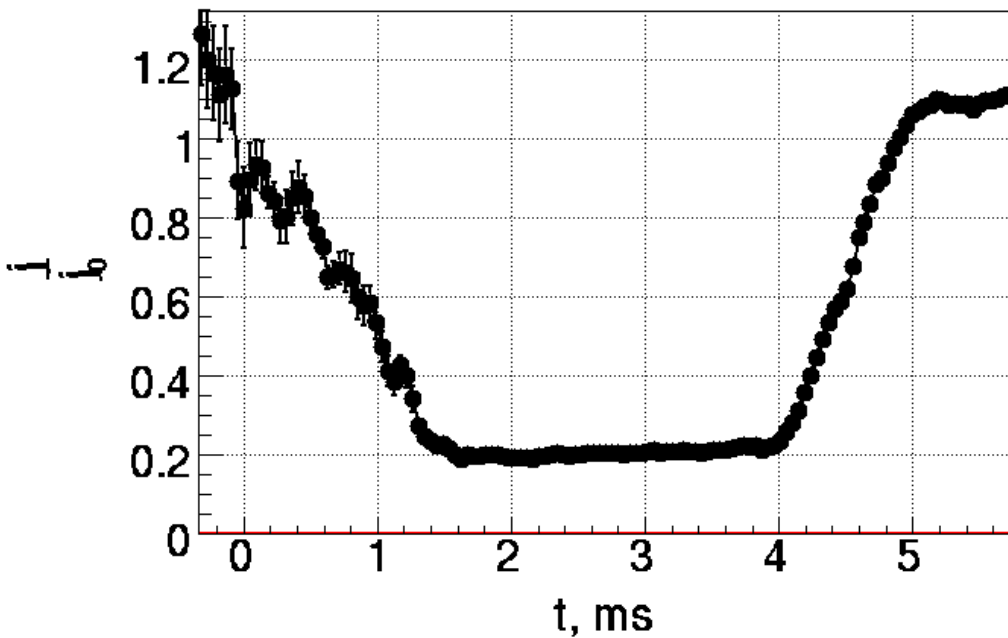
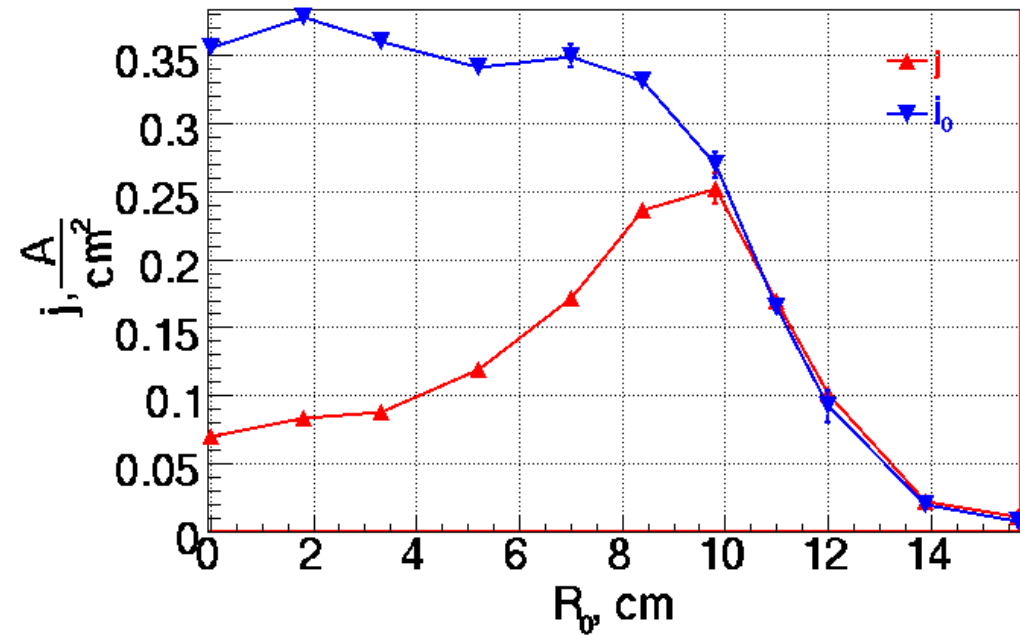
$\tau_{ie}^E \approx 1.1$  мс

# Ток ионов в расширителе

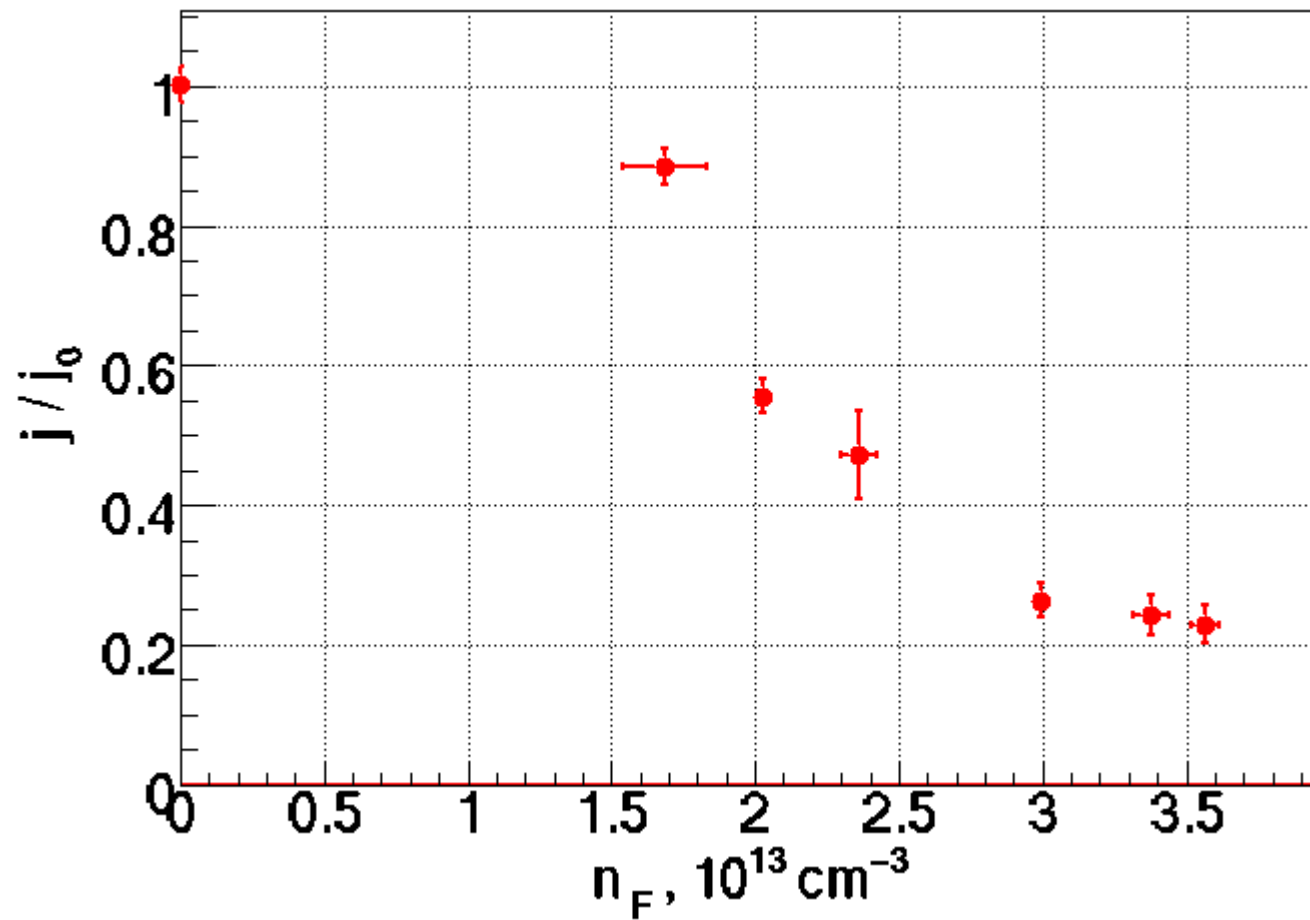
На оси системы



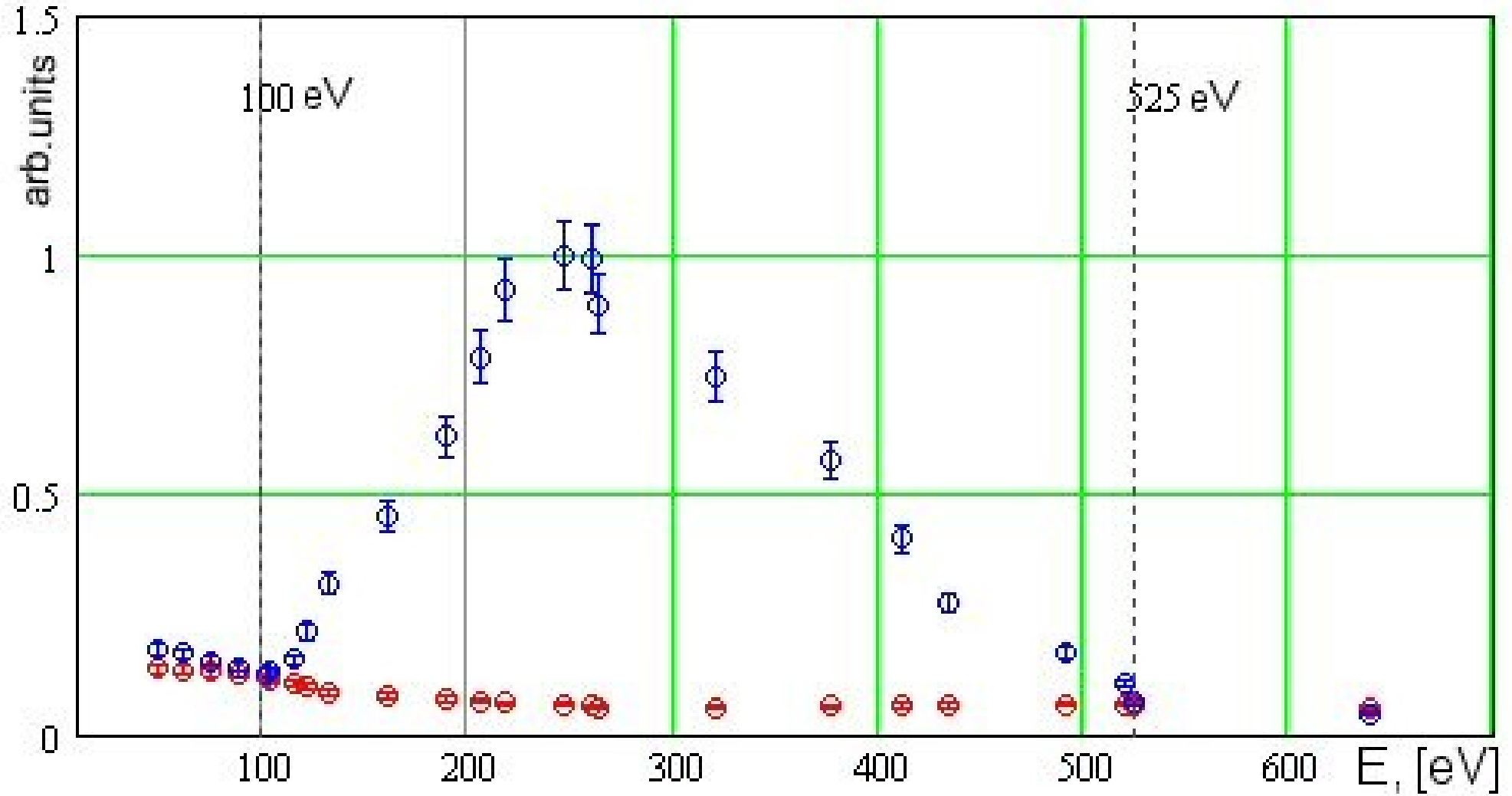
2 мс от начала инжекции в КП



# Ток ионов в расширителе



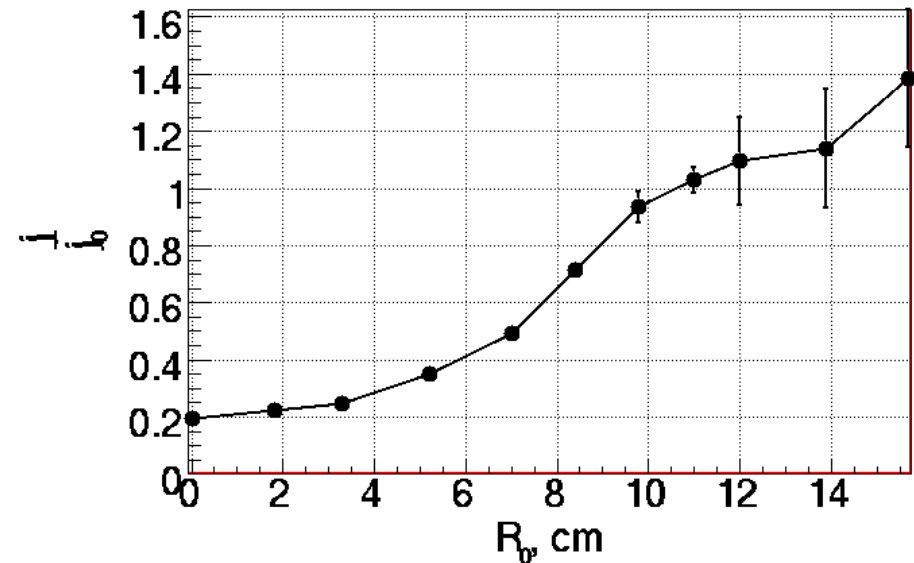
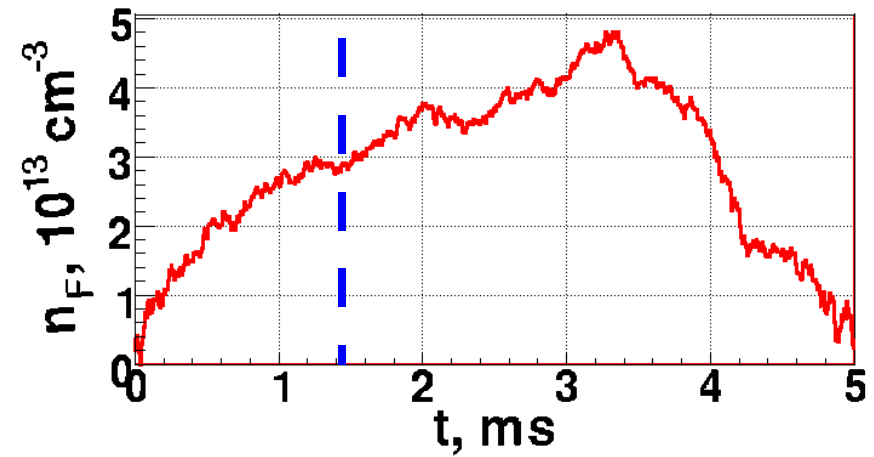
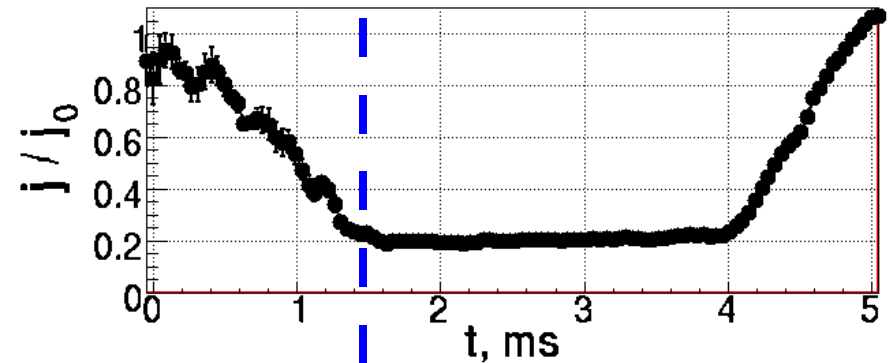
# Энергетический спектр ионов в расширителе



Время: 2 мс после начала инжекции в КП

# Вопросы

- Чем определяется степень подавления при  $n_f \sim n_0$ ?
- Почему ток не меняется при росте плотности быстрых ионов?
- Почему степень подавления отличается на разных радиусах?



# Гидродинамика

И.А.Котельников, Д.Д.Рютов, Эффекты амбиполярного потенциала в двухкомпонентной газодинамической ловушке, препринт ИЯФ 85-19

$$m n_i v \frac{\partial v}{\partial z} = - \frac{\partial p_i}{\partial z} - e n_i \frac{\partial \phi}{\partial z},$$

$$0 = - \frac{\partial p_e}{\partial z} + e n_e \frac{\partial \phi}{\partial z},$$

$$p_i = n_i T_i, \quad p_e = n_e T_e, \\ T_e = const,$$

$$T_i = const \quad \text{либо} \quad p_i n_i^{-\gamma} = const, \quad \gamma = \frac{5}{3},$$

$$n_e = n_i + n_{дон},$$

$$n_i v = n_0 v_0 b, \quad b = \frac{B}{B_0}.$$

Уравнения движения

Уравнения состояния

Квазинейтральность

Сохранение потока  
вдоль силовой трубки

# Гидродинамика

Безразмерные переменные:  $\alpha = \frac{v}{v_0}$ ,  $\beta = \frac{m v_0^2}{2 T_i} \Rightarrow f(\alpha, \beta) = 0$

Имеет два решения для  $\alpha$ : до- и сверхзвуковое.

В точке, ограничивающей поток, решения сливаются:  $\frac{\partial f(\alpha, \beta)}{\partial \alpha} = 0$

**Изотерма ( $T_i = \text{const}$ ):**

$$f(\alpha, \beta) = \beta(\alpha^2 - 1) + \frac{T_e}{T_i} \ln \left( \frac{b}{\alpha} + \frac{n_{\text{don}}}{n_0} \right) + \ln \left( \frac{b}{\alpha} \right) = 0$$

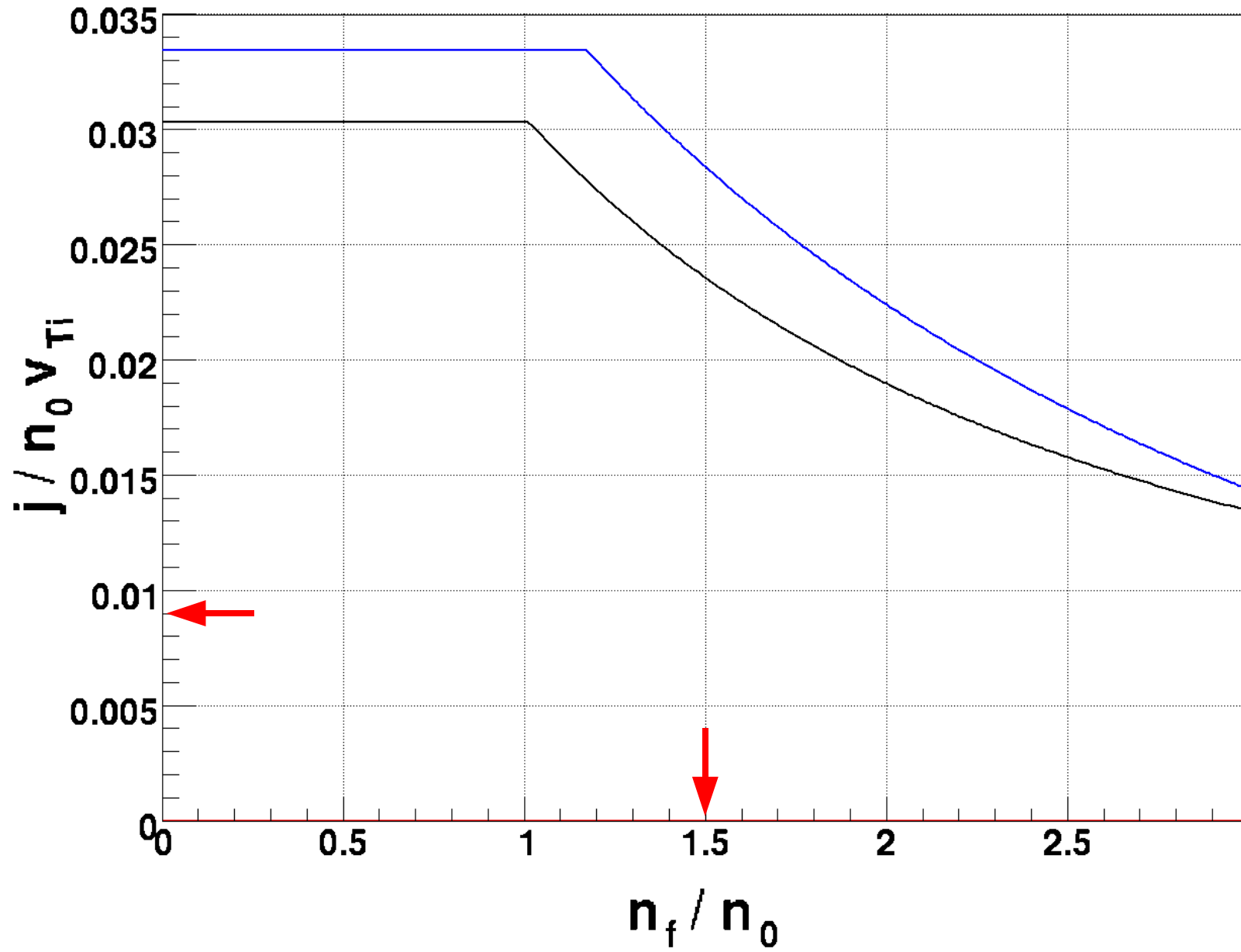
Имеет два решения.

**Адиабата ( $p_i n_i^{-\gamma} = \text{const}$ ):**

$$f(\alpha, \beta) = \beta(\alpha^2 - 1) + \frac{T_e}{T_i} \ln \left( \frac{b}{\alpha} + \frac{n_{\text{don}}}{n_0} \right) + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left( \left( \frac{b}{\alpha} \right)^{\gamma - 1} - 1 \right) = 0$$

При  $n_{\text{don}} \geq n_0 e^{\frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{T_i}{T_e}}$  не имеет дозвукового решения.

# Гидродинамика



Не совпадает по абсолютным значениям.

Нет сильного подавления на  $n_f \sim n_0$ .

# Кинетика, частые столкновения в центре

В.В.Мирнов, О.А.Ткаченко, Распределение электростатического потенциала в газодинамической ловушке, препринт ИЯФ 86-28

Электроны:

распределение Больцмана,  
квазинейтральность.

$$n_e = n_0 e^{\frac{e\phi}{T_e}}$$
$$n_e = n_{дон} + \int f(v) d^3 v$$

Ионы, основная ячейка:

частые столкновения,  
максвелловская функция распределения.

$$v, v_0 \text{ нормированы на } v_{Ti} = \sqrt{\frac{2T_i}{m}}$$

$$f_0(v_0) = \frac{n_0}{(2\pi)^{3/2}} e^{-v_0^2}$$

Ионы, пробка, КП и расширитель:

бесстолкновительное движение,

сохранение инвариантов,

$$f(v) d^3 v = b \frac{v_{\parallel 0}}{v_{\parallel}} f_0(v_0) d^3 v_0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} v^2 = v_0^2 - U, \quad U = \frac{e\phi}{T_i} \\ v_{\perp}^2 = b v_{\perp 0}^2, \quad b = \frac{B}{B_0} \end{array} \right.$$

отражение от эффективного потенциала

$$\sin^2(\theta_0) > \min_{0 < z' < z} \frac{1 - \frac{U(z')}{v_0^2}}{b(z')}$$

# Кинетика, частые столкновения в центре

Область  $(v_0, \theta_0)$ , откуда ионы долетают до точки  $z$ :

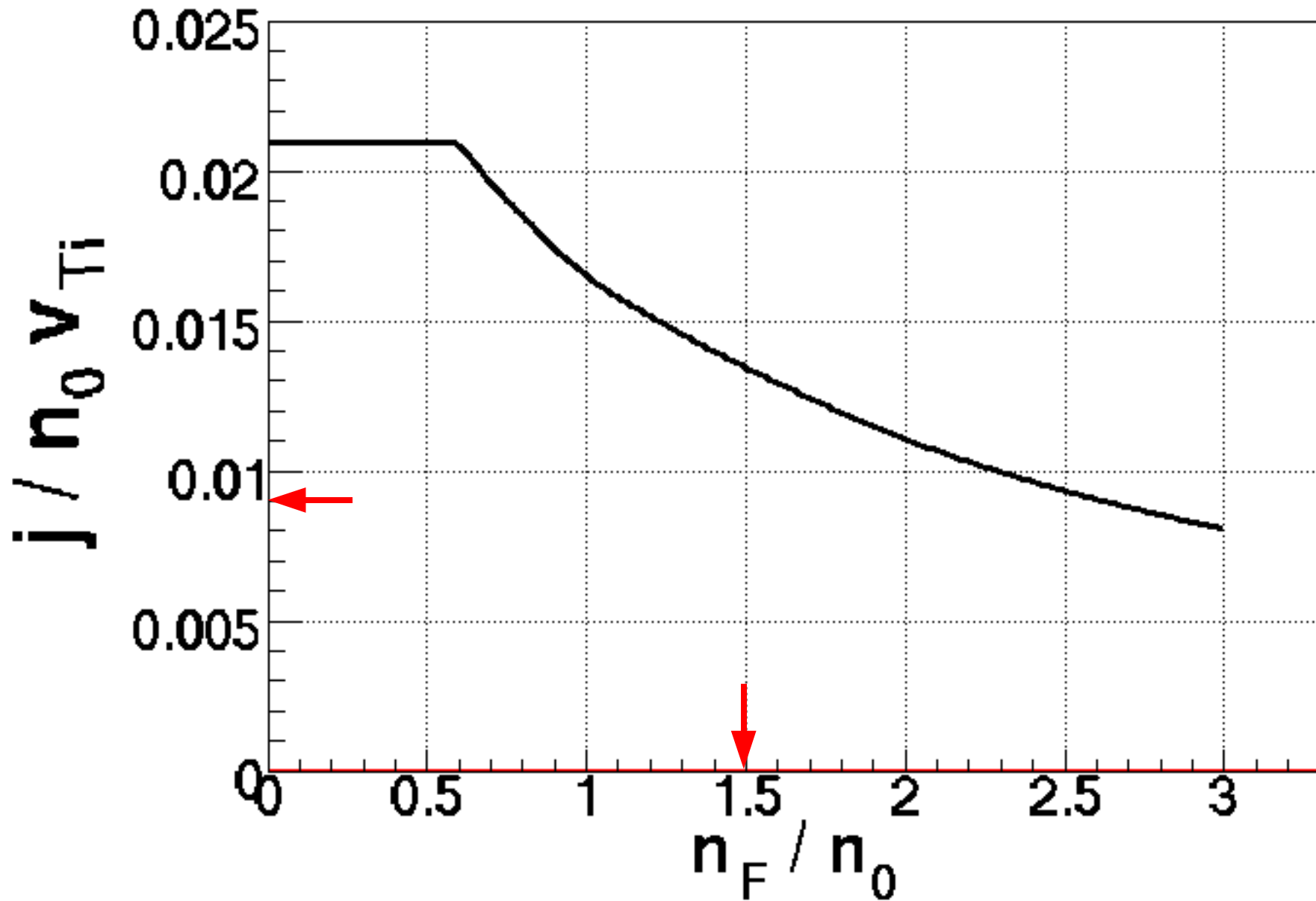
$$0 \leq \sin^2(\theta_L(z, v_0)) \leq 1, \quad \sin^2(\theta_L(z, v_0)) \leq \min_{0 < z' < z} \frac{v_0^2 - U(z')}{v_0^2 b(z')}$$

$$n(z) = \frac{n_0}{\sqrt{\pi}} \int \sqrt{v_0^2(1 - b(z) \sin^2(\theta)) - U(z)} \Big|_{\theta_L(z, v_0)}^0 e^{-v_0^2} dv_0^2 + \\ + \frac{n_0}{\sqrt{\pi}} \int \sqrt{v_0^2(1 - b(z) \sin^2(\theta)) - U(z)} \Big|_{\theta_L(z, v_0)}^{\theta_L(\infty, v_0)} e^{-v_0^2} dv_0^2$$

$$U(z) = \frac{T_e}{T_i} \ln \left( \frac{n(z) + n_{don}(z)}{n_0} \right)$$

$$j(z) = b(z) \frac{n_0 v_{Ti}}{2\sqrt{\pi}} \int \sin^2(\theta_L(\infty, v_0)) e^{-v_0^2} v_0^2 dv_0^2$$

# Кинетика, частые столкновения в центре



Не совпадает по абсолютным значениям.

Нет сильного подавления на  $n_f \sim n_0$ .

# Кинетика, редкие столкновения в центре

Электроны:

распределение Больцмана,  
квазинейтральность.

Ионы, пробка, КП и расширитель:

бесстолкновительное движение,  
сохранение инвариантов,  
отражение от эффективного потенциала

Ионы, основная ячейка:

редкие столкновения,  
столкновительный член в форме Крука

$$v \cos(\theta) \frac{\partial f(z, v, \theta)}{\partial z} = \frac{f_0(v) - f(z, v, \theta)}{\tau_{ii}(v)}$$

# Кинетика, редкие столкновения в центре

Граничные условия для  $z=z_L$ :

в области удержания

$$f(z_L, v, \pi - \theta) = f(z_L, v, \theta)$$

в области потерь

$$f(z_L, v, \pi - \theta) = 0$$

Длина пробега относительно ион-ионных столкновений:

$$\lambda_{ii} = \frac{1}{n \sigma_{mp}(E_i)} = \lambda_0 \left( \frac{E_i}{T_i} \right)^2$$

Функция распределения ионов, налетающих на пробку:

в области удержания

$$f(v, \theta) = f_0(v)$$

в области потерь

$$f(v, \theta) = f_0(v) \left( 1 - e^{-\frac{L}{\lambda_0 \cos(\theta)} \left( \frac{v_{Ti}}{v} \right)^4} \right)$$

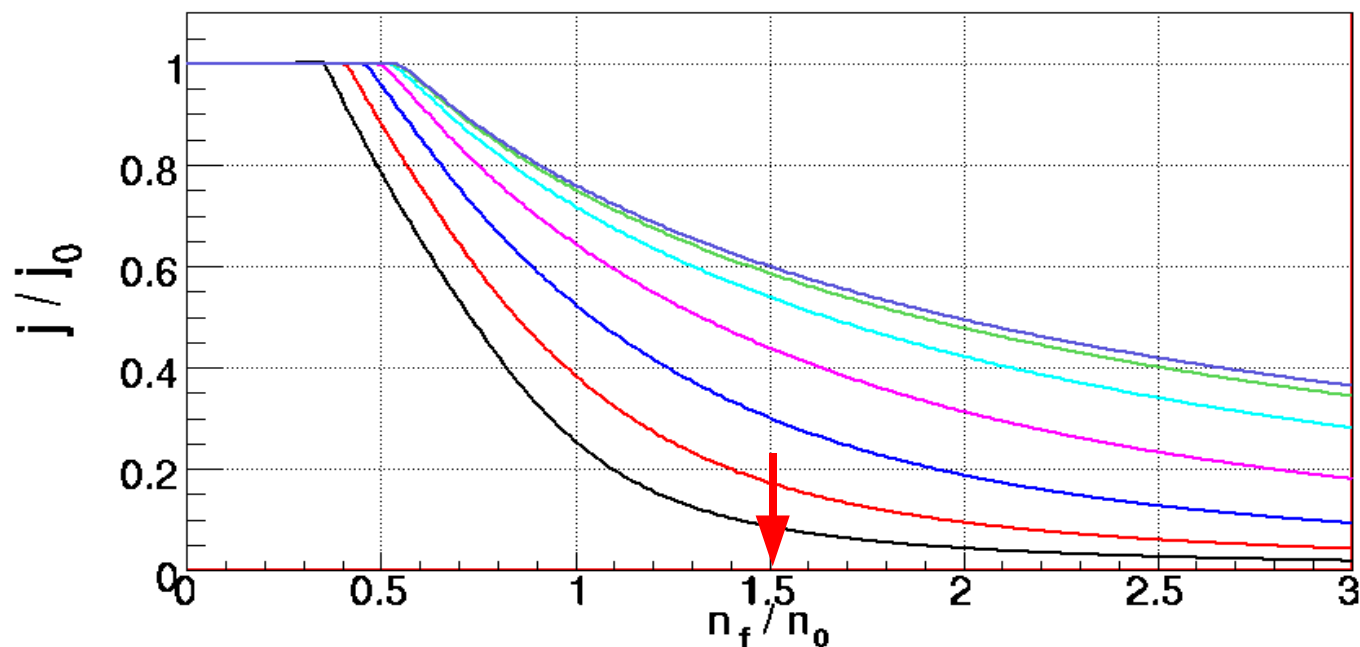
На низких энергиях конус потерь заполнен:

$$E_i \ll T \sqrt{\frac{\lambda_0}{L}} \Rightarrow f(v, \theta) \approx f_0(v)$$

На высоких энергиях конус потерь пуст:

$$E_i \gg T \sqrt{\frac{\lambda_0}{L}} \Rightarrow f(v, \theta) \approx f_0(v) \frac{L}{\lambda_{ii}}$$

# Кинетика, редкие столкновения в центре



$L/\lambda_0 = 0.111$

$L/\lambda_0 = 0.333$

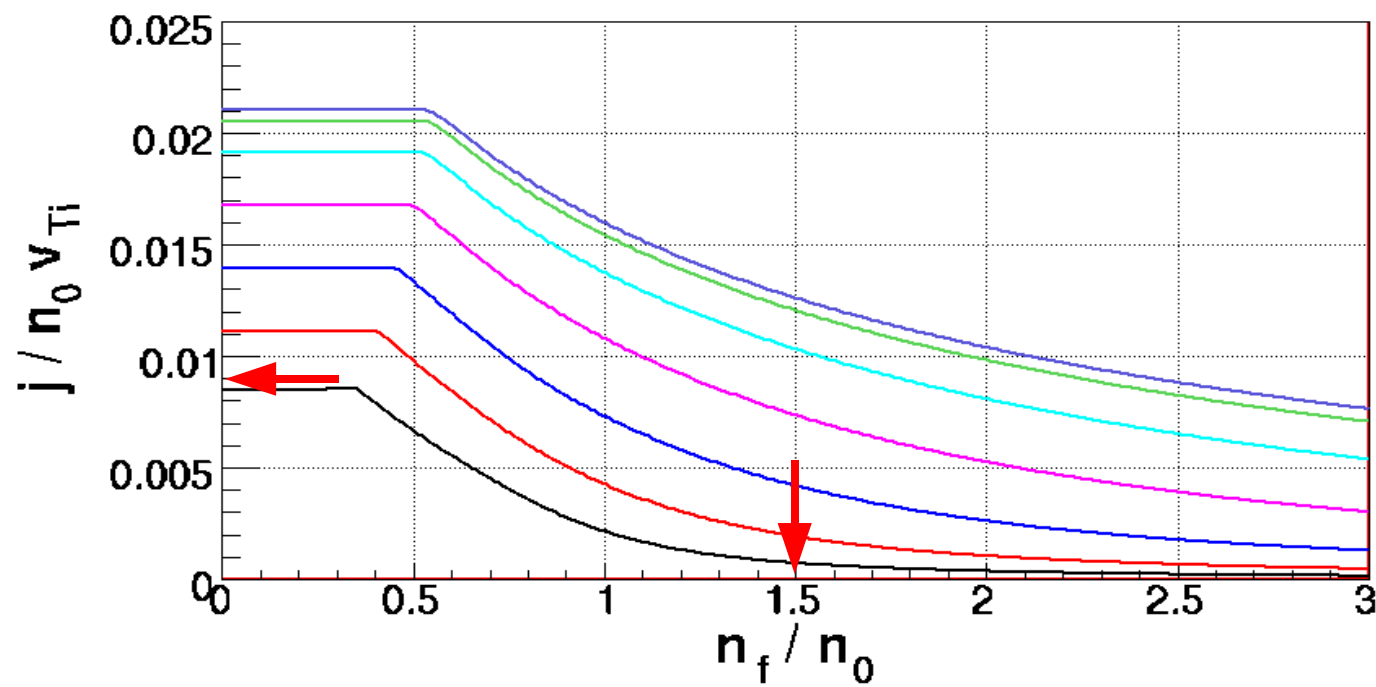
$L/\lambda_0 = 1.000$

$L/\lambda_0 = 3.000$

$L/\lambda_0 = 9.000$

$L/\lambda_0 = 27.000$

$L/\lambda_0 = 81.000$



$L/\lambda_0 = 0.111$

$L/\lambda_0 = 0.333$

$L/\lambda_0 = 1.000$

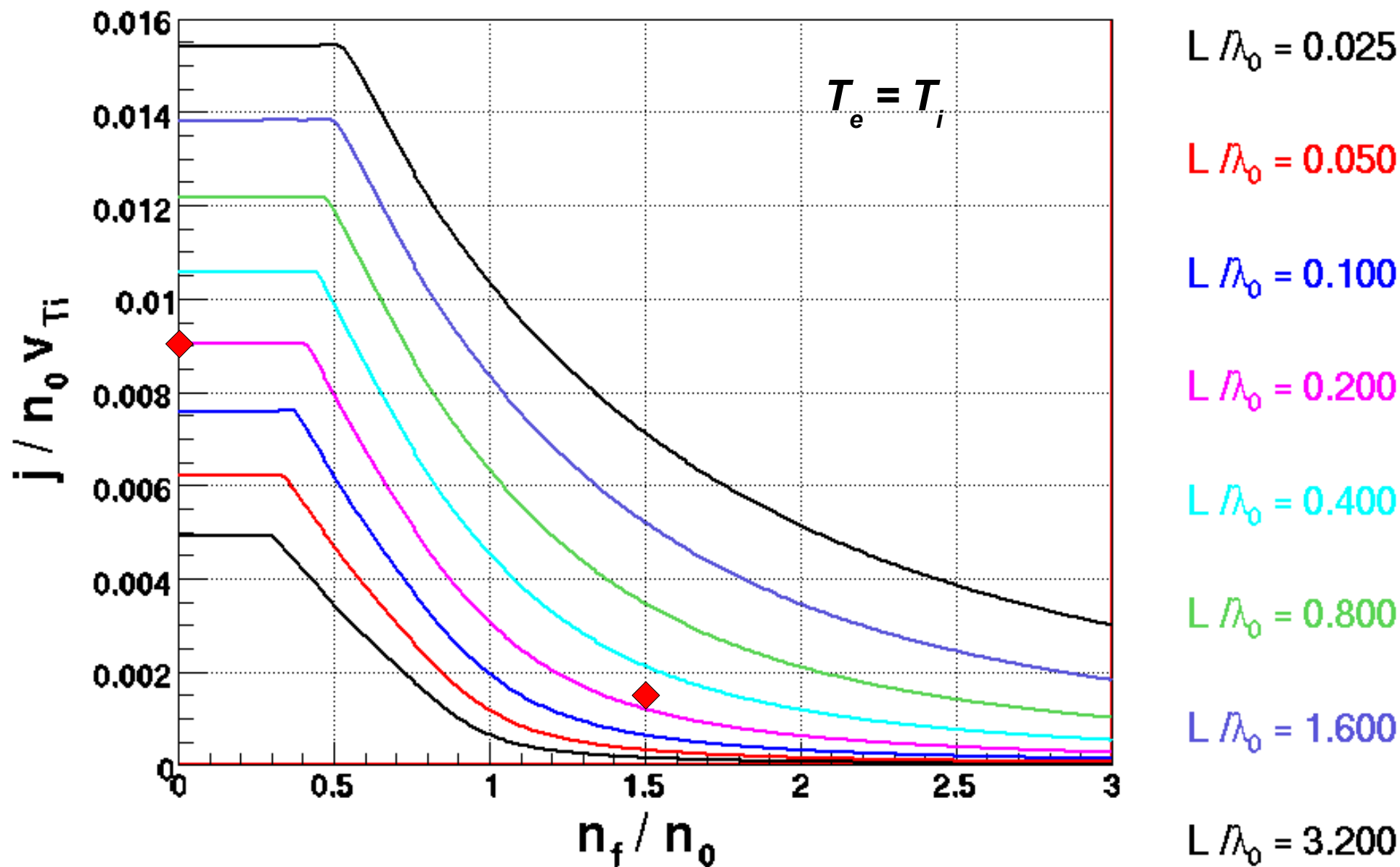
$L/\lambda_0 = 3.000$

$L/\lambda_0 = 9.000$

$L/\lambda_0 = 27.000$

$L/\lambda_0 = 81.000$

# Кинетика, редкие столкновения в центре



Лучшая аппроксимация при  $L/\lambda_0 \approx 0.2$ , по параметрам плазмы  $L/\lambda_0 \approx 3$ .

# Пустой конус потерь

Формула Пастухова для  $e\phi \gg T$ :

$$j = \frac{1}{2} \dot{n} L = \frac{n_0 v_{Ti}}{\sqrt{\pi}} \frac{L}{\lambda_{ii}} \frac{2R}{2R+1} \frac{e^{-\frac{e\phi}{T}}}{\ln(4R+2)} \frac{T}{e\phi} \left( 1 + \frac{T}{2e\phi} + \dots \right)$$

Формула Будкера для  $e|\phi| \ll T$ :

$$j = \frac{1}{2} \dot{n} L = \frac{n_0 v_{Ti}}{4\sqrt{\pi}} \frac{L}{\lambda_{ii}} \frac{3 \ln(1+\sqrt{2}) - \sqrt{2}}{\ln(4R) - 2}$$

Асимптотики для  $n_f \gg n_0 \Rightarrow e\phi/T \approx \ln(n_f/n_0)$  и  $R \gg 1$ :

$$j_{\text{Пастухов}} \approx \frac{n_0 v_{Ti}}{\sqrt{\pi}} \frac{L}{\lambda_{ii}} \frac{n_0}{n_f} \frac{1}{\ln(4R+2) \ln\left(\frac{n_f}{n_0}\right)}$$

$$j_{PC} \approx \frac{n_0 v_{Ti}}{2\sqrt{\pi}} \frac{L}{\lambda_{ii}} \frac{n_0}{n_f} \frac{1}{R}$$

$$\frac{j_{\text{Пастухов}}}{j_{PC}} \approx \frac{2R}{\ln(4R+2) \ln\left(\frac{n_f}{n_0}\right)}$$

# «ФОНОВЫЙ» ТОК

КП и расширитель: ионизация газа вытекающей плазмой.  
(Дополнительный ток пропорционален вытекающему.)

КП: рассеяние горячих ионов в конус потерь:  $\tau_{CX} \propto \tau_{ie}^E$

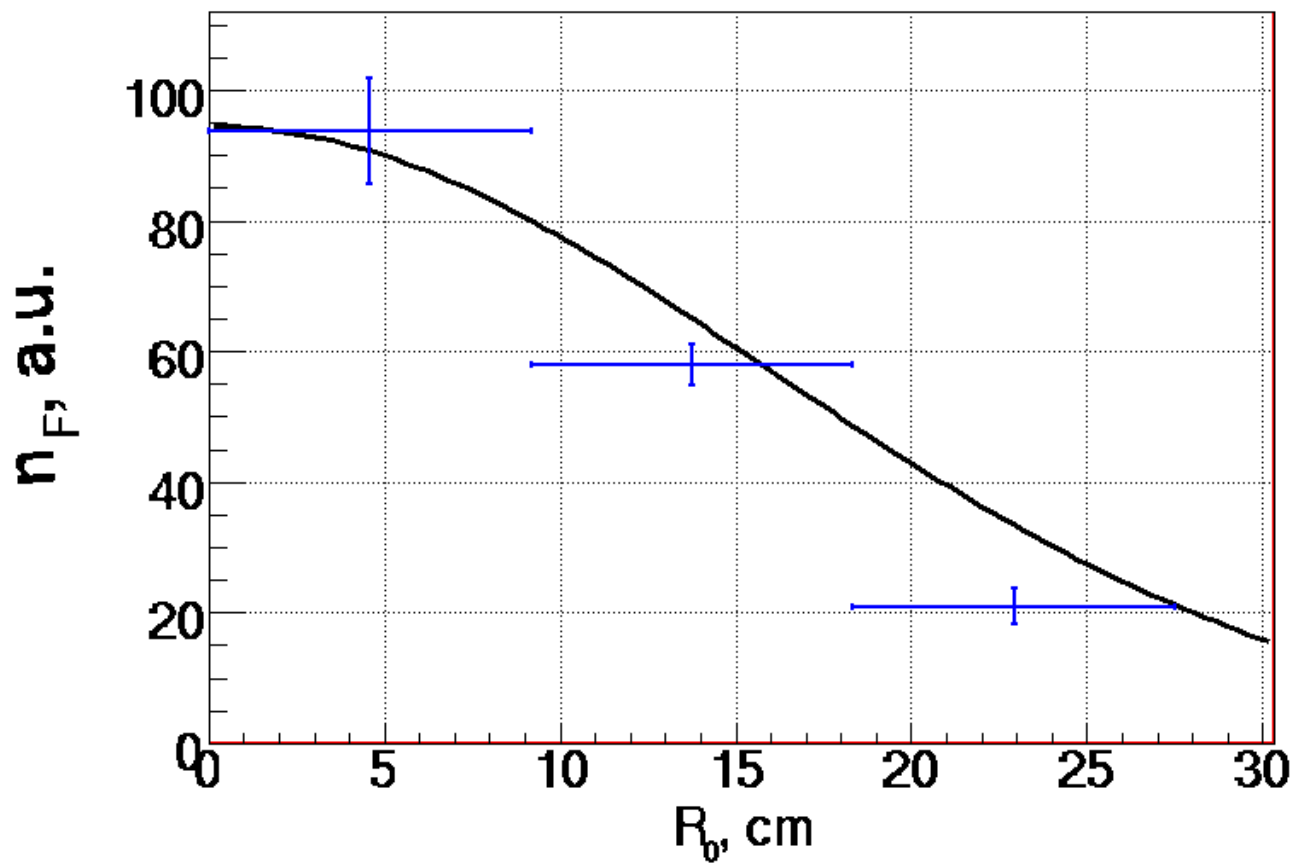
Центральная ячейка: рассеяние инжектированных частиц в конус потерь.

$$\tau_{ii}^E \approx \tau_{ii}^\theta \propto E^{-3/2}, \quad \tau_{ie}^E \approx const$$
$$E = 900 \text{ эВ} \Rightarrow \tau_{ii}^E \approx \tau_{ii}^\theta \approx \tau_{ie}^E$$

Приток ионов за счёт захвата:  $\frac{\dot{N}}{\pi r_0^2} \approx 0.6 \frac{\text{эквив. А}}{\text{см}^2}$

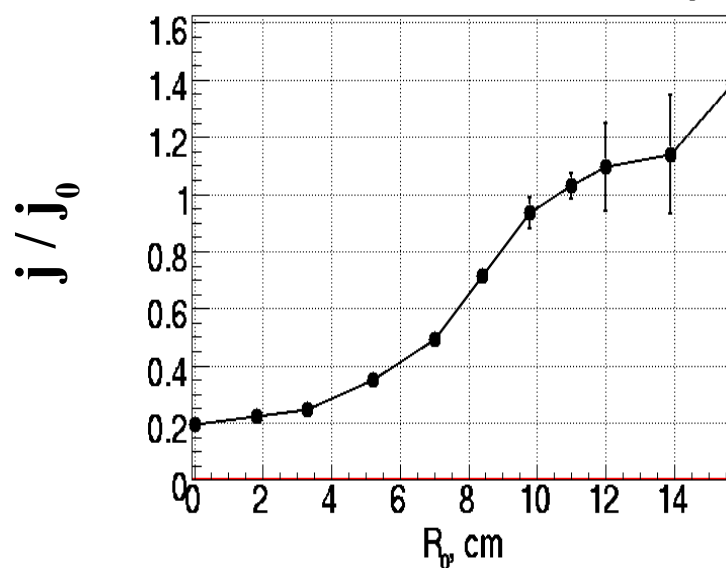
«ФОНОВЫЙ» ТОК:  $j_{\text{фон}} \approx 0.2 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$

# Радиальный профиль подавления потока



Объяснение:

- ♦ сильная зависимость от отношения  $n_f/n_0$ ;
- ♦ постоянная  $n_0$ ;
- ♦ убывающая  $n_f$ .



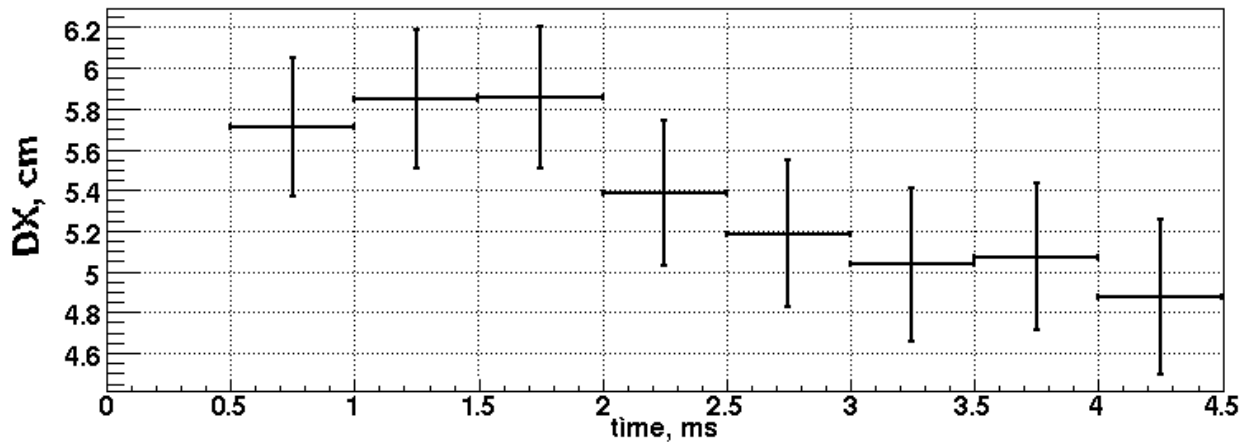
# Результаты

- ◆ Зафиксировано существенное подавление потока тёплых ионов. Плотность потока ионов на оси уменьшалась в **5 раз** когда плотность быстрых ионов в КП достигала  $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .
- ◆ Предложено простое (качественное) описание переходного процесса от случая заполненного к пустому конусу потерь.
- ◆ Выяснен механизм подавления продольных потерь из ГДЛ при низком по сравнению с температурой амбиполярном потенциале в КП.

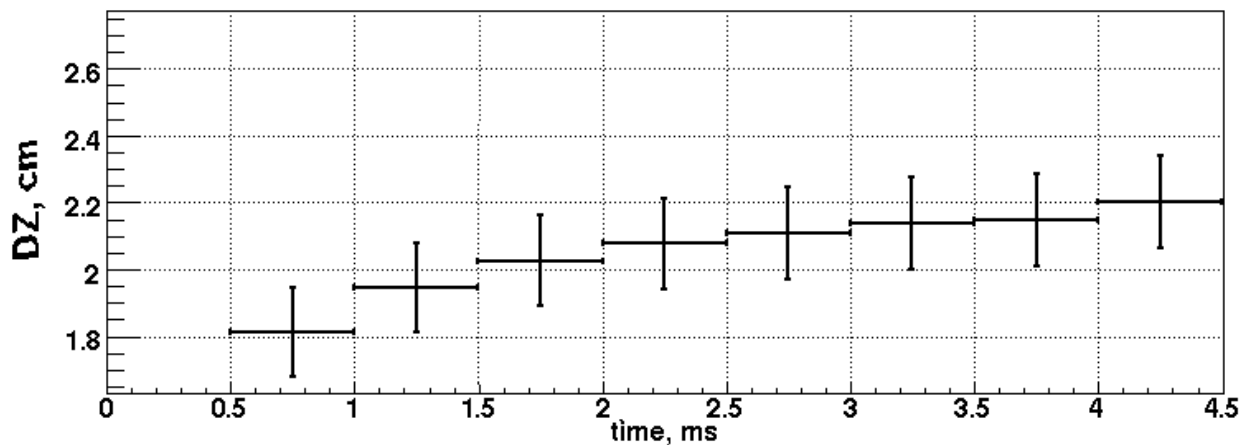
# КП: быстрые ионы

Анализатор  
атомов  
перезарядки

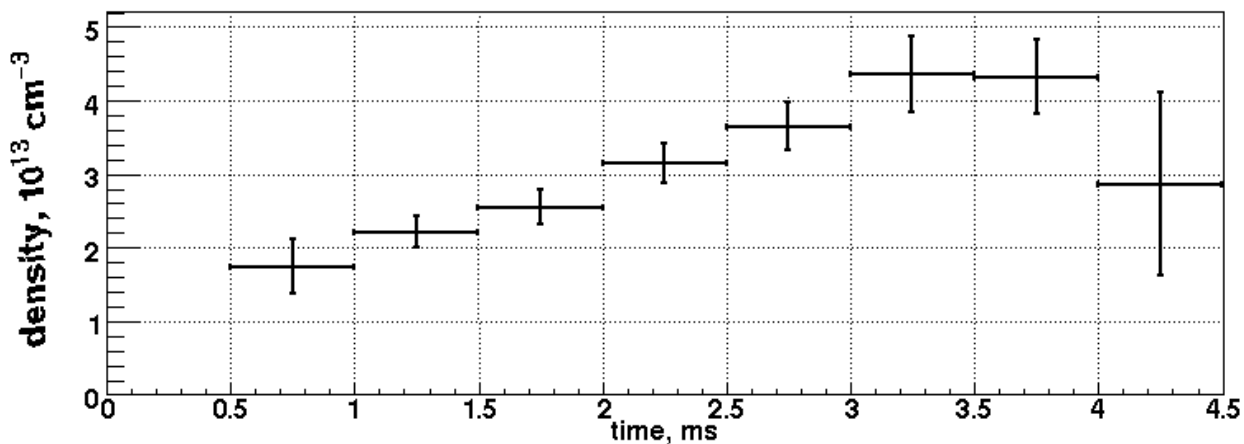
Радиальный  
размер



Продольный  
размер

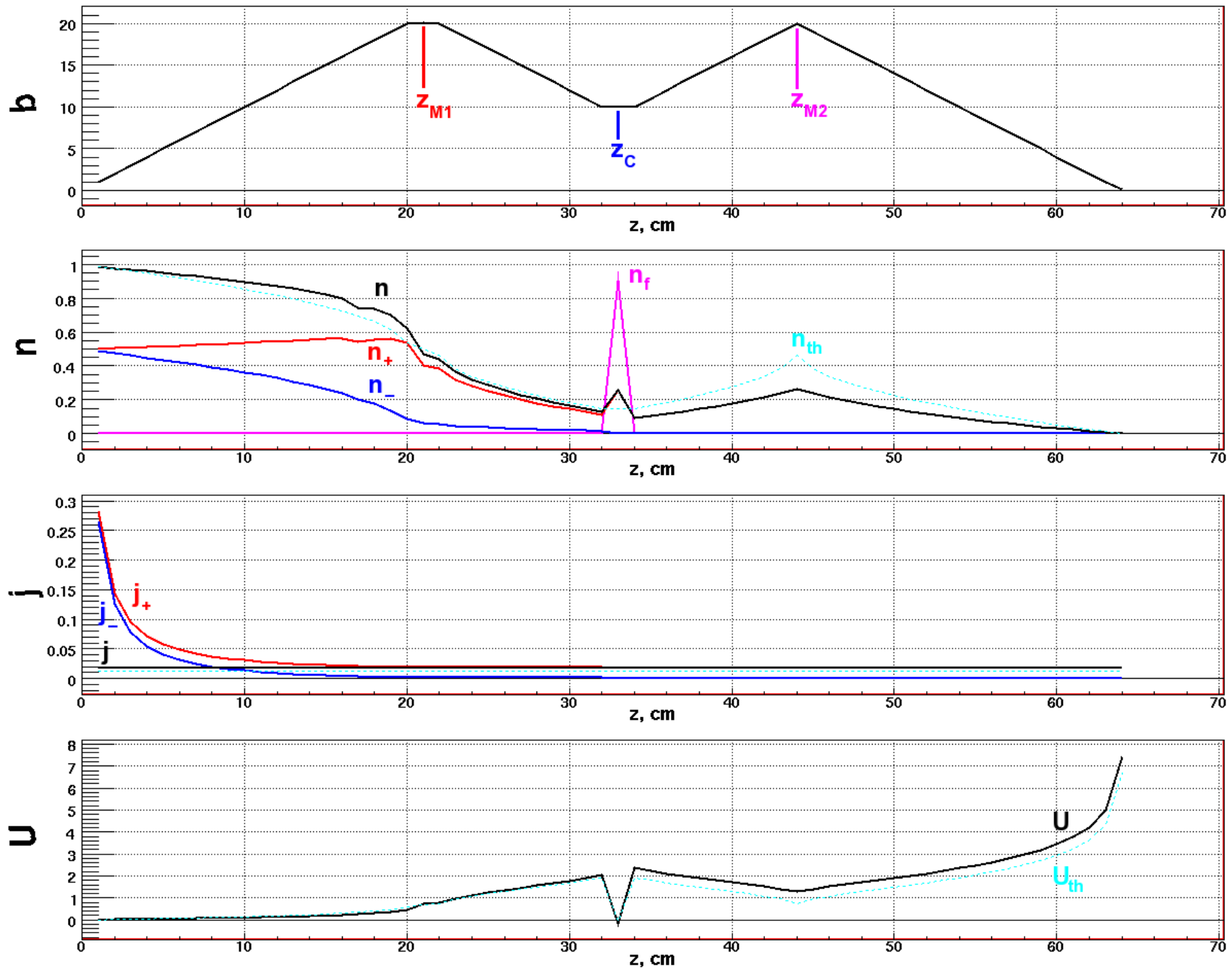


Плотность



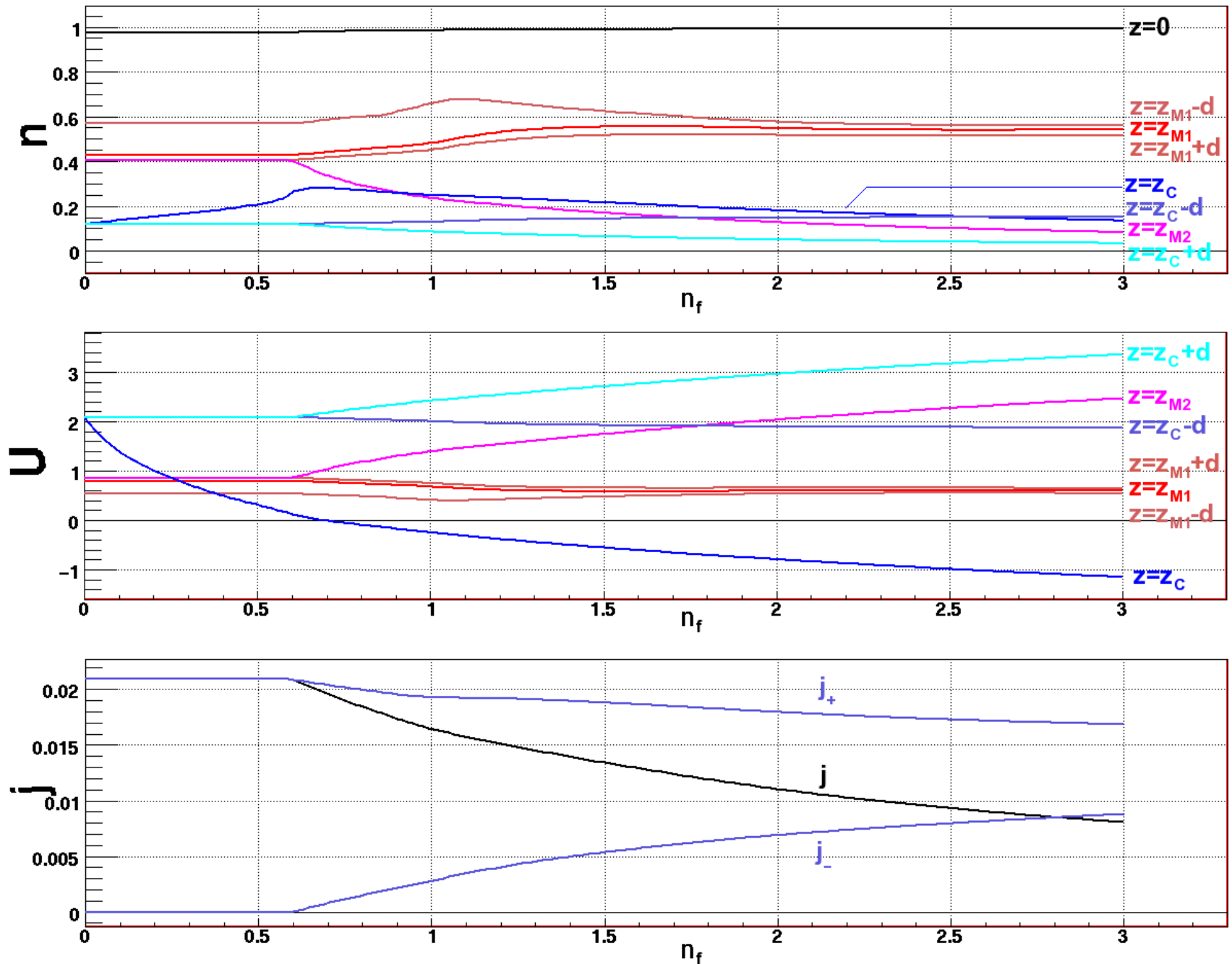
Нормировка по  
дисперсионному  
интерферометру

# Кинетика, частые столкновения в центре



Зависимость параметров от продольной координаты при фиксированной плотности быстрых ионов в КП

# Кинетика, частые столкновения в центре



Зависимость параметров в характерных точках от плотности быстрых ионов в КП

# Кинетика, редкие столкновения в центре

