

Особенности эволюции и структуры
ТОКОВЫХ СЛОЕВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ
формирования слоя

А.Г. Франк

Институт общей физики РАН им. А.М.Прохорова

*КОНФЕРЕНЦИЯ-СОВЕЩАНИЕ
по программе ОФН-15
«Физика плазмы в солнечной системе»
16-20 февраля 2009 г., ИКИ РАН*

Эксперименты по формированию и эволюции токовых слоев – основные этапы

- = С.И. Сыроватский - развитие представлений о токовых слоях как основе вспышечных явлений в космической и лабораторной плазме.
- = Первые эксперименты с плазмой низкой плотности – аномальное сопротивление и нарушение условия вмороженности магнитного поля в плазму.
- = Значительное увеличение проводимости за счет увеличения плотности начальной плазмы – получение нейтрального токового слоя.
- = Апробация скейлинга для токовых слоев – реализация протяженных токовых слоев. Сжатие плазмы в пределы плоского слоя. Устойчивость токового слоя.
- = Получение разрыва токового слоя: импульсная (быстрая) фаза магнитного пересоединения, генерация потоков плазмы, ускорение заряженных частиц - реализация явлений вспышечного типа в лабораторном эксперименте.
- = Почему происходит разрыв слоя?? Триггерные механизмы вспышечного процесса??

- = Возможно ли формирование токовых слоев в 3D магнитных конфигурациях, и в каких именно? Какие топологические особенности 3D магнитных полей необходимы для формирования токовых слоев?
- = Каким образом структура 3D магнитного поля влияет на характеристики токовых слоев?
- = Захват в слой продольной компоненты магнитного поля и уменьшение степени сжатия в слой тока и плазмы.
- = Проявления двухжидкостных свойств плазмы в токовых слоях.
- = Роль нормальной к поверхности токового слоя компоненты магнитного поля в возбуждении токов Холла вдоль поверхности слоя и генерации направленных потоков плазмы.



С.И. Сыроватский обосновал концепцию токовых слоев как физической основы вспышечных явлений в замагниченной плазме. Преобразование магнитной энергии в энергию плазмы, ускоренных частиц и излучений различных диапазонов электромагнитного спектра происходит за счет процессов магнитного пересоединения в токовых слоях.

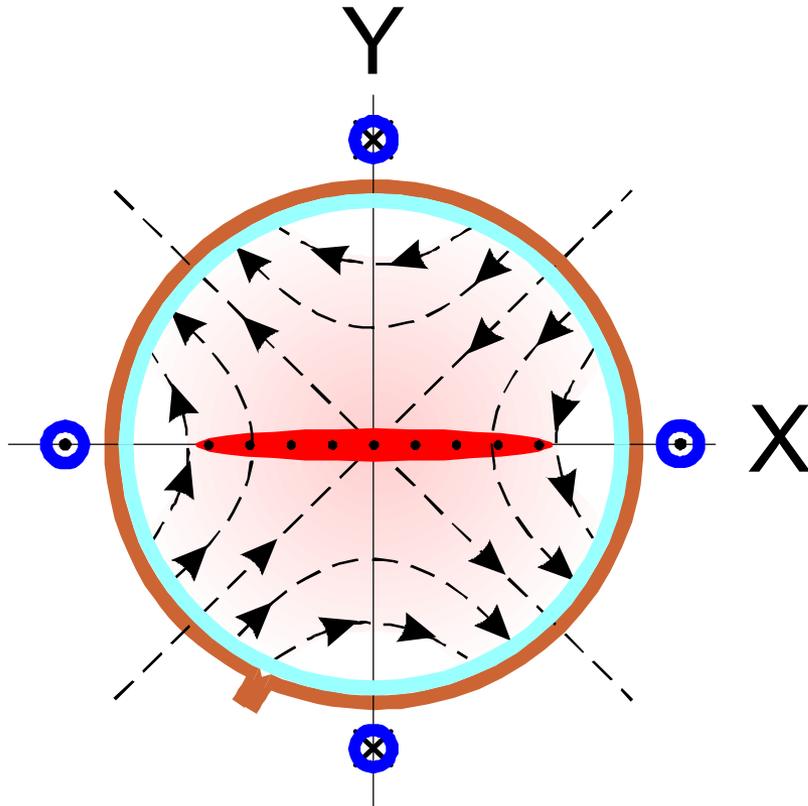
С.И. Сыроватский (1925-1979)

М.С.Рабинович инициировал постановку экспериментов по динамике и эволюции токовых слоев в лаборатории ускорителей ФИАН.



М.С.Рабинович (1919-1982)

Токовый слой – это «плоский Z пинч», который может развиваться в 2D магнитном поле с нулевой линией **X** типа



$$\mathbf{V}_\perp = -h \{y, x, 0\}$$

= Силовые линии 2D магнитного поля лежат в плоскости (x, y) ;

= Нулевая линия совмещена с Oz ;

= При возбуждении в плазме тока J_z возможно формирование токового слоя.

Принципиальный момент:

Существенное увеличение магнитной энергии в окрестности слоя возможно только при выполнении условия **вмороженности магнитного поля** в плазму.

Первые эксперименты с плазмой низкой плотности –
аномальное сопротивление и нарушение условия
вмороженности магнитного поля в плазму

Концентрация плазмы: $N_e^0 \leq 5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

При $T_e \gg 10 \text{ eV}$ проводимость плазмы оказалась очень
низкой: $\sigma \approx 3 \cdot 10^{12} \text{ CGSE}$ – плазма переходила в турбулентное
состояние с аномальным сопротивлением.

Время диссипации энергии в слое: $\tau_\sigma \approx l^2/v_m \approx 4 \cdot 10^{-8} \text{ s} \ll t$.

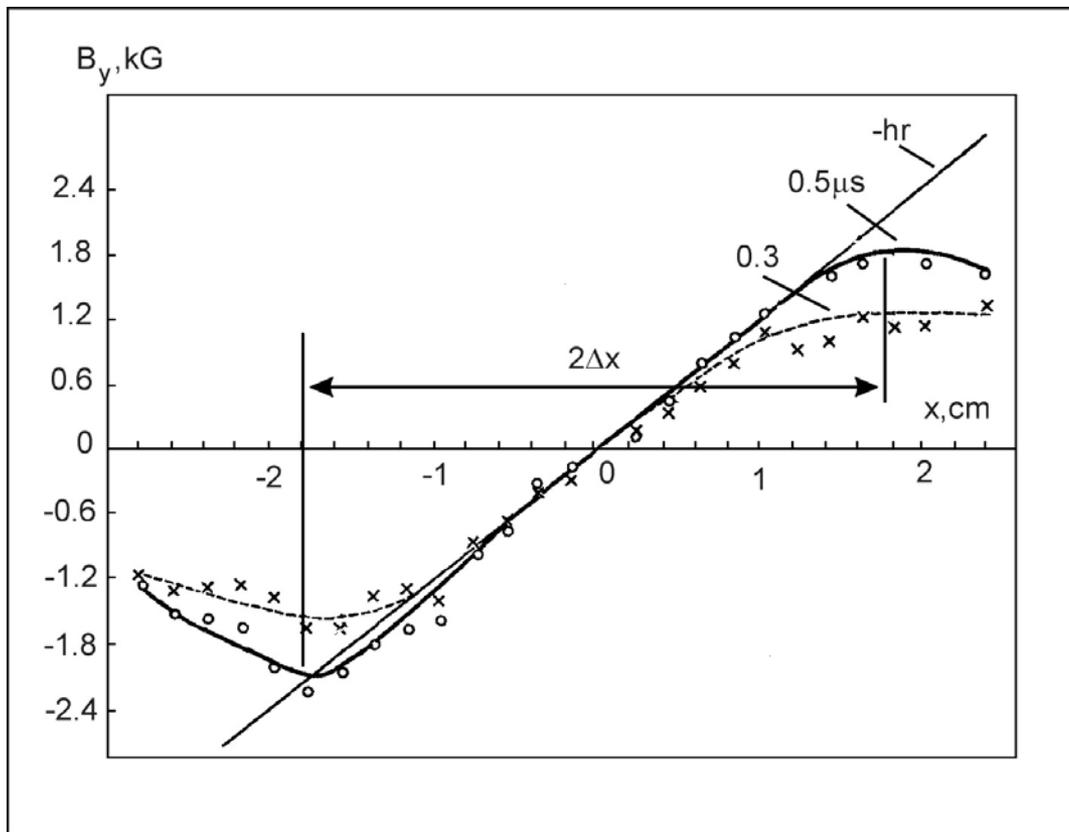
Как создать токовый слой, обладающий значительным
запасом магнитной энергии, в лабораторных условиях???

Турбулентная проводимость плазмы растет с увеличением
концентрации: $\sigma \sim (N_e)^{1/2}$.

Попытка увеличить проводимость плазмы за счет увеличения
ее концентрации.

Получение нейтрального токового слоя

Значительное увеличение концентрации начальной плазмы:
 $N_e^0 \approx 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, позволило поднять проводимость до величины
 $\sigma \approx 2 \cdot 10^{14} \text{ CGSE}$ и получить нейтральный токовый слой, с
 нормальной к слою компонентой магнитного поля $B_y^{\text{sh}} \approx 0$.



$$B_y^{\text{sh}} = B_y^0 + B_y^J = -h \cdot x + B_y^J \approx 0.$$

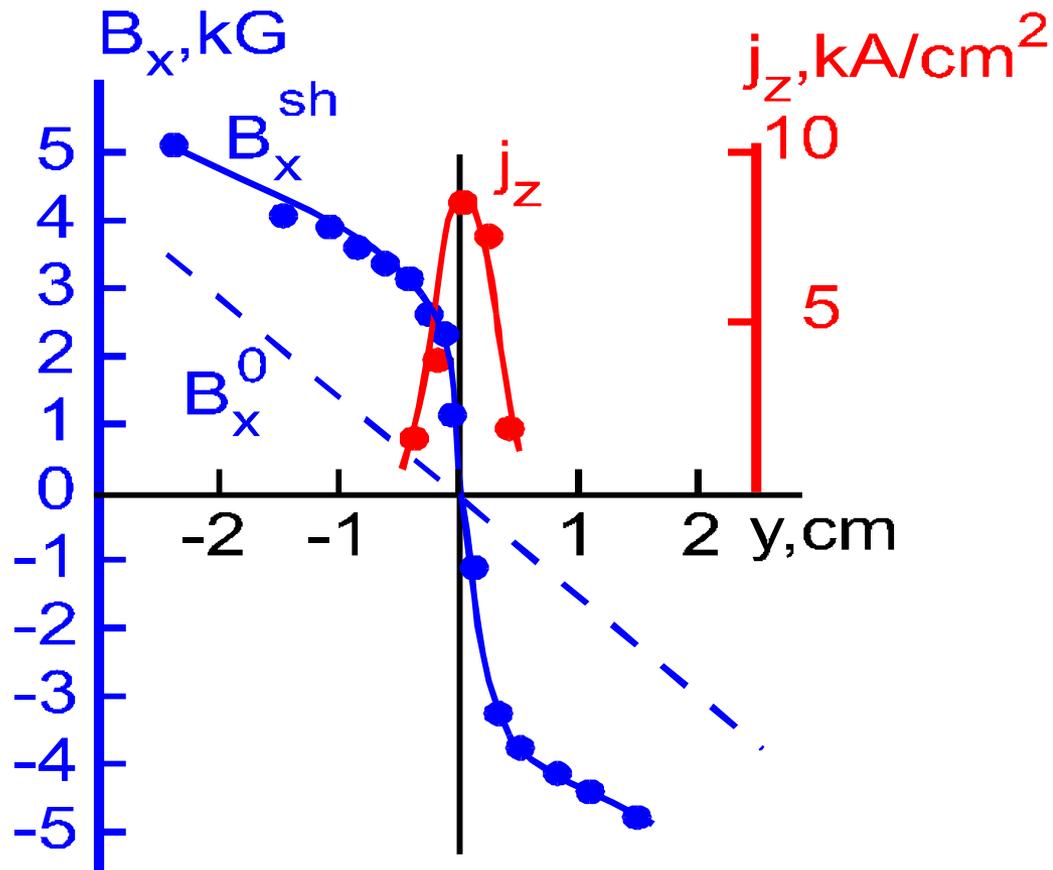
Ток плазмы полностью компенсирует нормальную компоненту вакуумного магнитного поля

$h = 1.2 \text{ kG/cm}$; He;

$J_z^{\text{max}} \cong 14 \text{ kA}$;

$T/2 \cong 1 \mu\text{s}$.

Тангенциальная компонента магнитного поля и плотность тока в слое

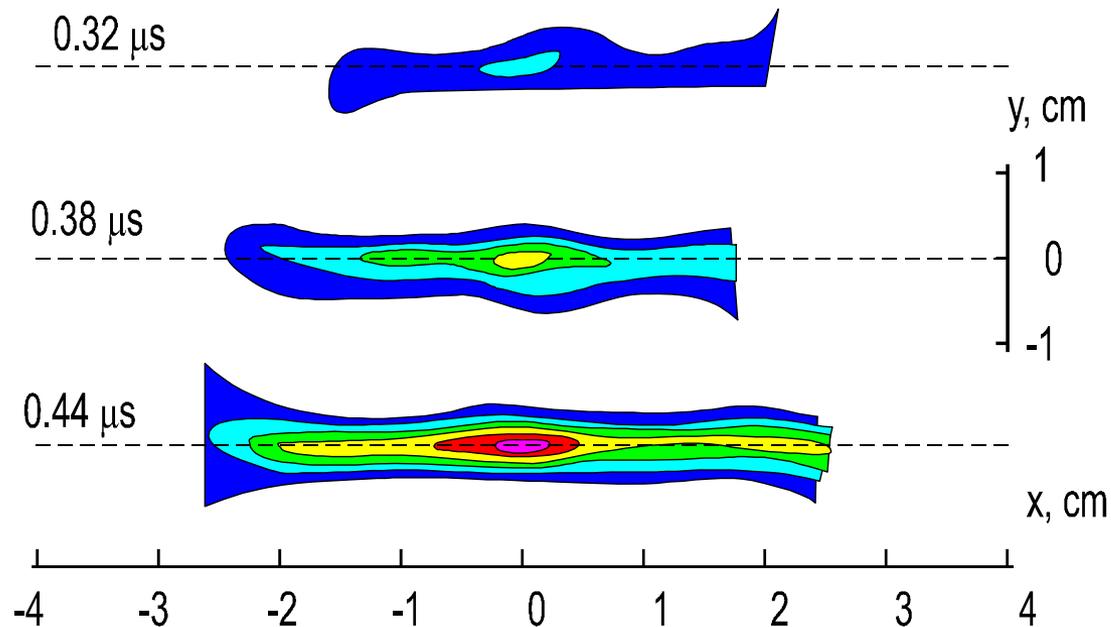


Формирование токового слоя приводит к значительной концентрации магнитной энергии в окрестности слоя

Сжатие плазмы в пределы плоского слоя

$$\delta N_e = 1.25 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_e^{\text{max}} = 7.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$



В слое сосредоточена плотная плазма с
 $T_e = 10 \text{ eV}$; $T_i = 50 \text{ eV}$; $\beta = 8 \cdot \pi \cdot N_e \cdot (T_e + T_i / Z) / (B_x)^2 \approx 1$

= Нейтральный токовый слой имел степень вытянутости $\Delta x / \Delta y \approx 5$.

= Установлено, что для токовых слоев справедливо соотношение (скейлинг): $\Delta x \approx 0.4 \cdot (J_Z / h)^{1/2}$

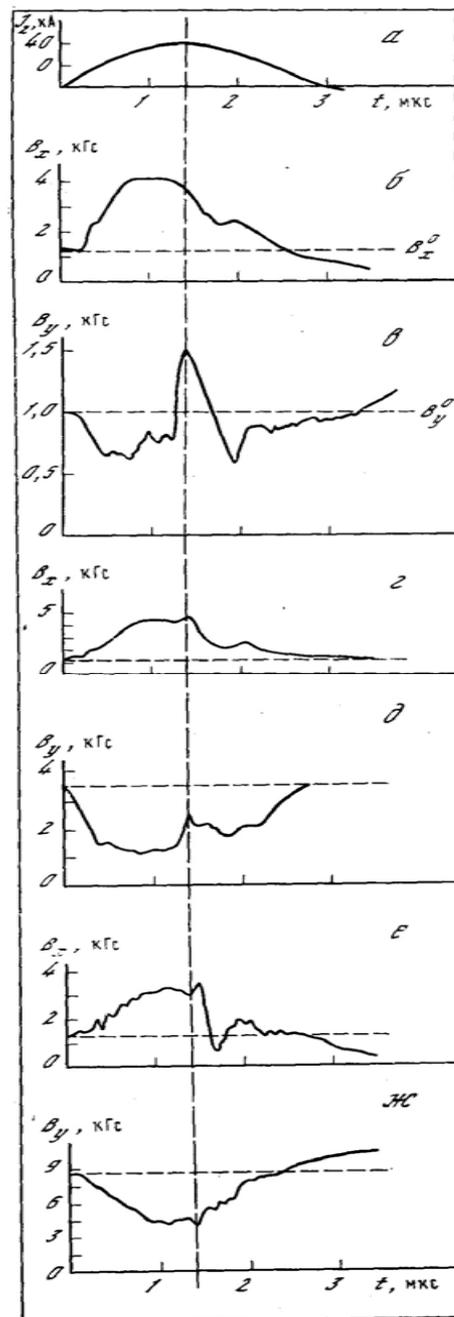
= Протяженные токовые слои со степенью вытянутости $\Delta x / \Delta y \geq 10$ были реализованы путем значительного увеличения тока плазмы, $J_Z^{\max} \cong 80$ кА.

= Обнаружено, что **протяженные токовые слои устойчивы**, в том числе относительно развития тиринг-моды.

= **Каким образом можно получить разрыв токового слоя и превращение магнитной энергии в энергию плазмы и ускоренных частиц???**

= С.И. Сыроватским предложена концепция об определяющей роли редкой **фоновой плазмы** при разрыве слоя.

Изменения во времени тангенциальной B_x и нормальной B_y компонент магнитного поля в различных точках у поверхности токового слоя, свидетельствующие об импульсной фазе магнитного пересоединения (разрыве слоя).



$x = 0$

$x = 0.5 \text{ cm}$

$x = 1 \text{ cm}$

$x = 1.7 \text{ cm}$

$x = 2.3 \text{ cm}$

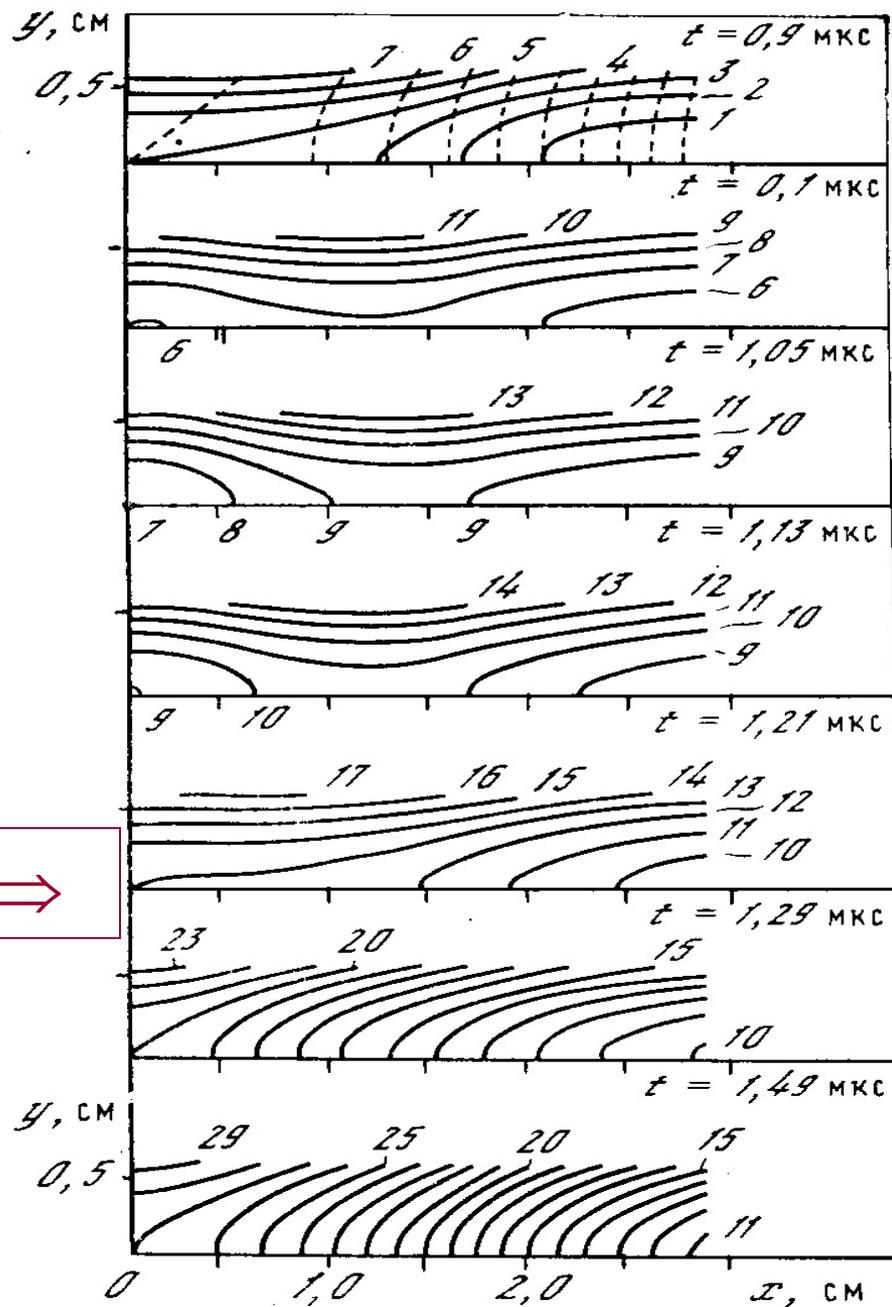
$x = 2.9 \text{ cm}$

Структура магнитного поля
токового слоя в последовательные
моменты времени

(показана $\frac{1}{4}$ сечения слоя).

Нумерация силовых линий –
сквозная для всех моментов
времени.

В интервале $t \cong 1.2 \div 1.3 \mu\text{s}$
происходит импульсная фаза
магнитного пересоединения



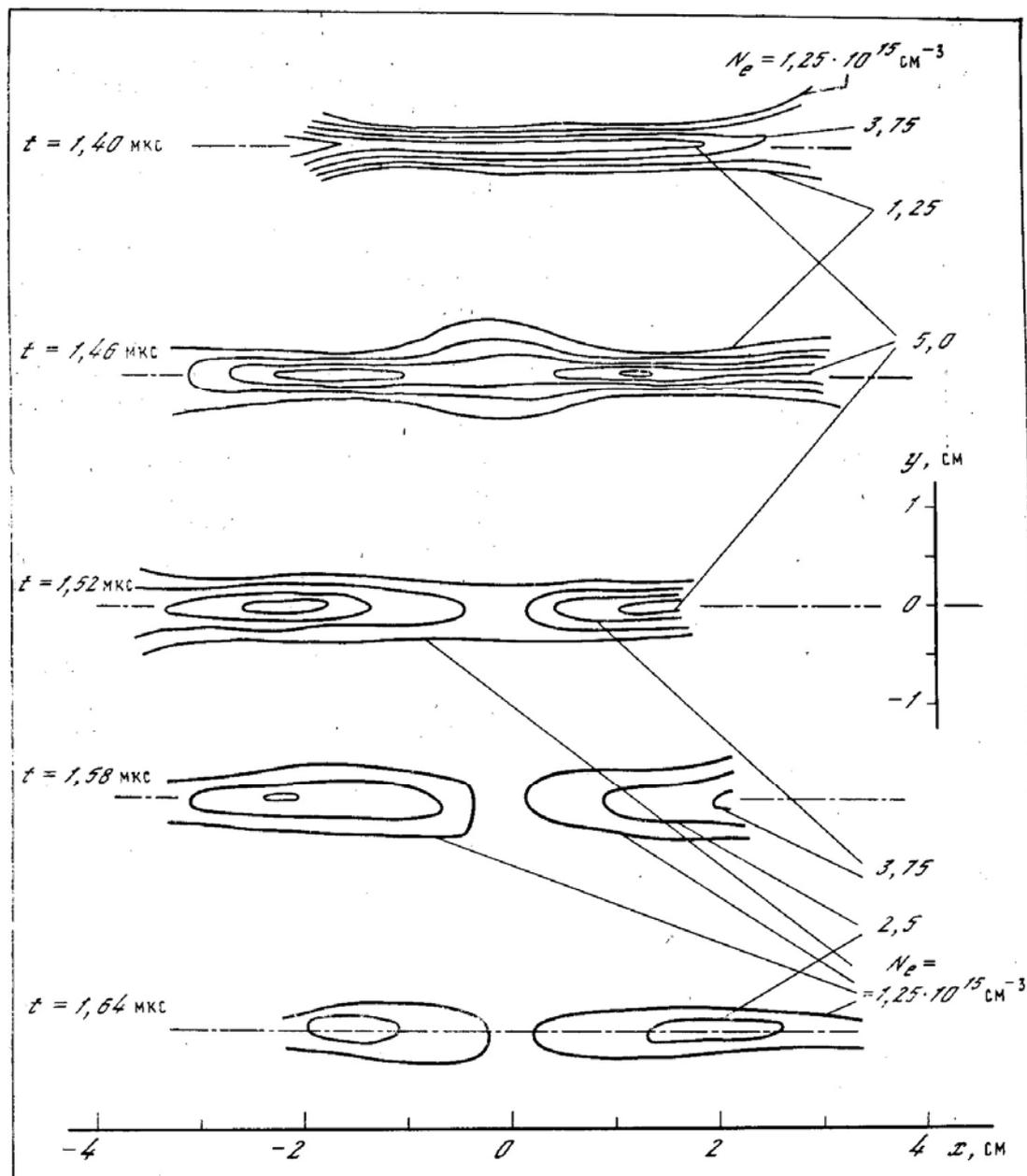
Impulsive phase of magnetic reconnection

= Impulsive phase of magnetic reconnection terminates the metastable stage of the current sheet evolution, resulting in the sheet disruption, magnetic energy transformation into the energy of plasma and accelerated particles.

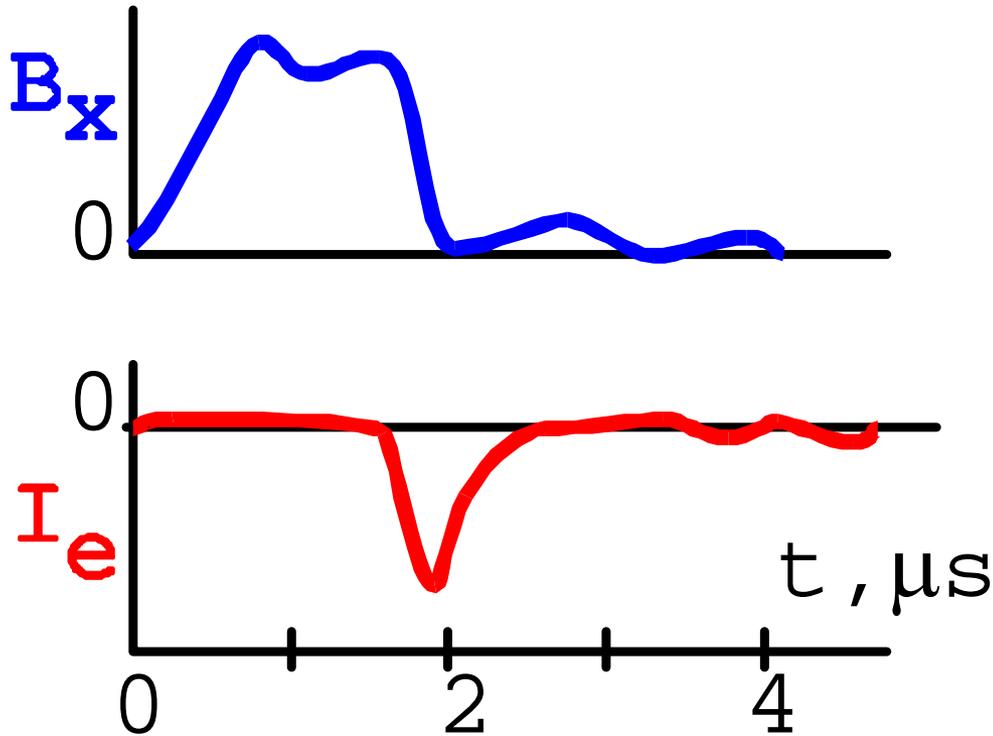
= The typical features are rapid changes in the magnetic field topology, current density redistribution, excitation of nonlinear super-Alfvénian waves, plasma ejections from the sheet.

Разрушение
плазменного слоя
во время
импульсной фазы
магнитного
пересоединения.

$N_e(x, y)$ показаны
в виде линий
равной плотности



Acceleration of charged particles



= Generation of accelerated particles is time correlated with the rapid change of the magnetic field structure of the current sheet.

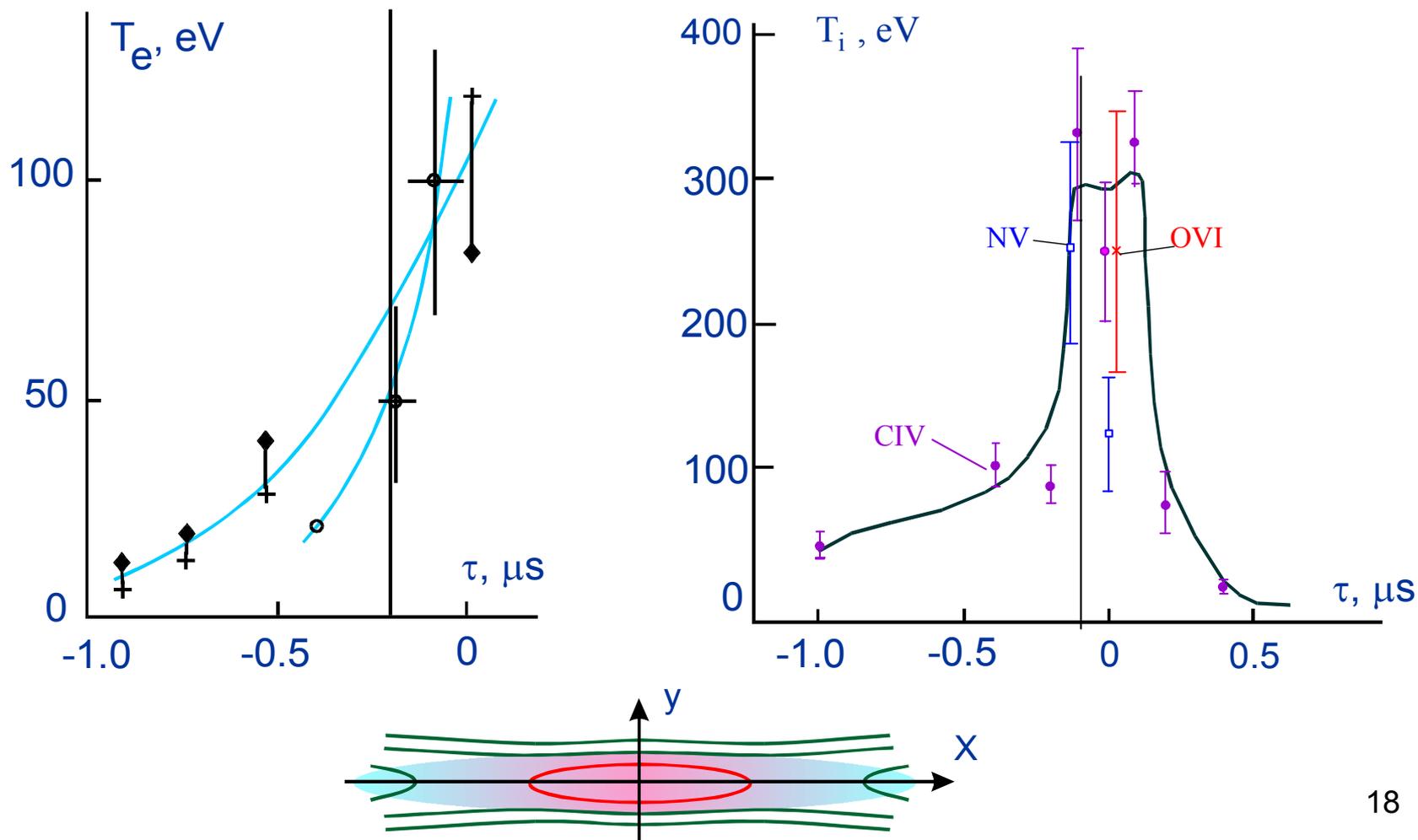
= The impulsive phase of magnetic reconnection displays a satisfactory agreement with principal features of the flare-type events.

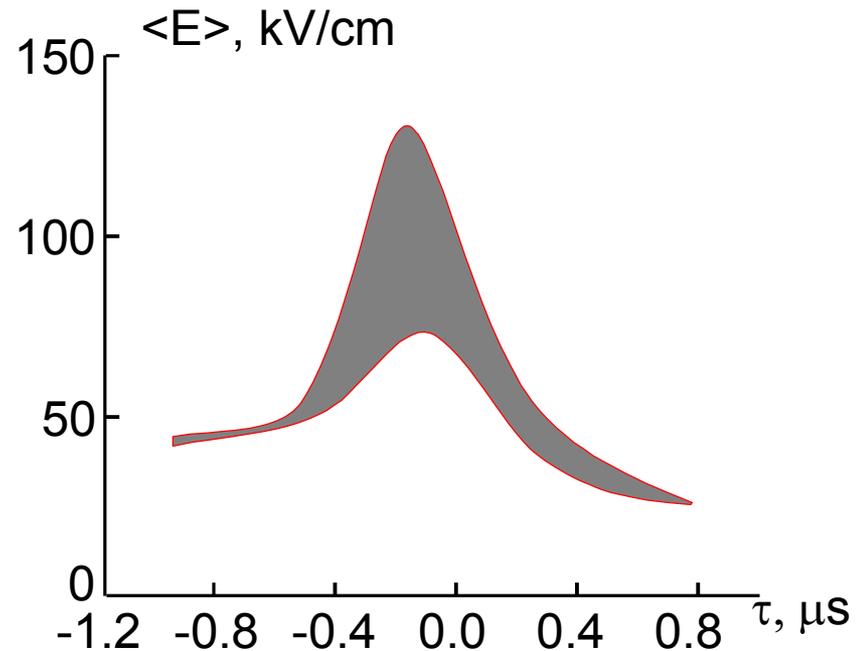
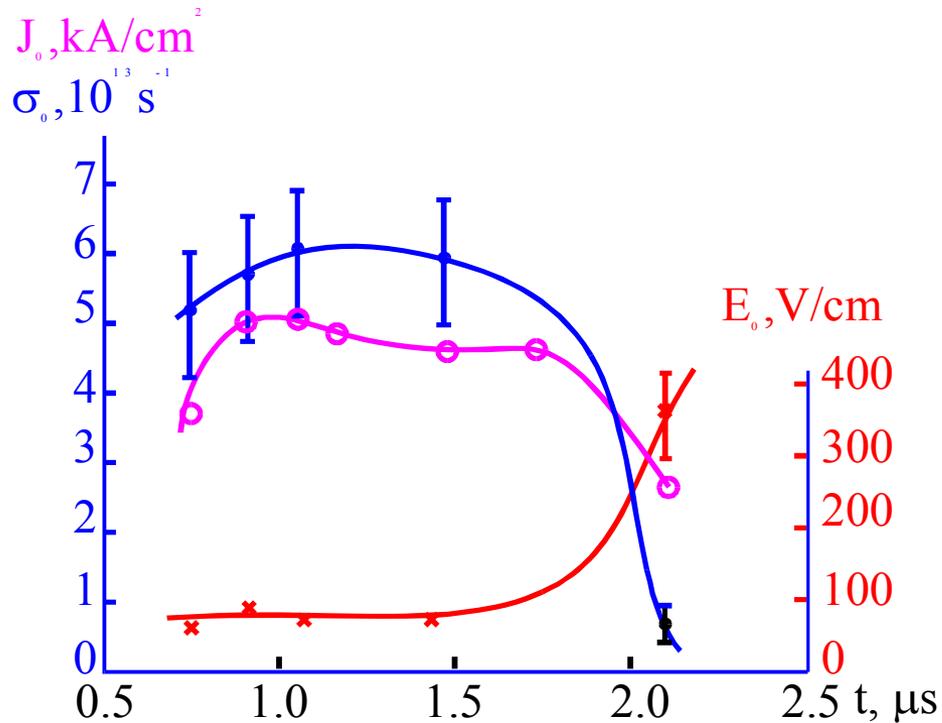
$\partial B / \partial t \rightarrow \mathbf{E}^{\text{ind}} \rightarrow$ **particle acceleration**

Почему происходит разрыв слоя???

Триггерные механизмы вспышечного процесса???

Исследование эволюции температур электронов и ионов показывает, что сверхбыстрый нагрев плазмы в пределах магнитного острова внутри токового слоя – это наиболее вероятная причина нарушения поперечного равновесия слоя и его разрушения.



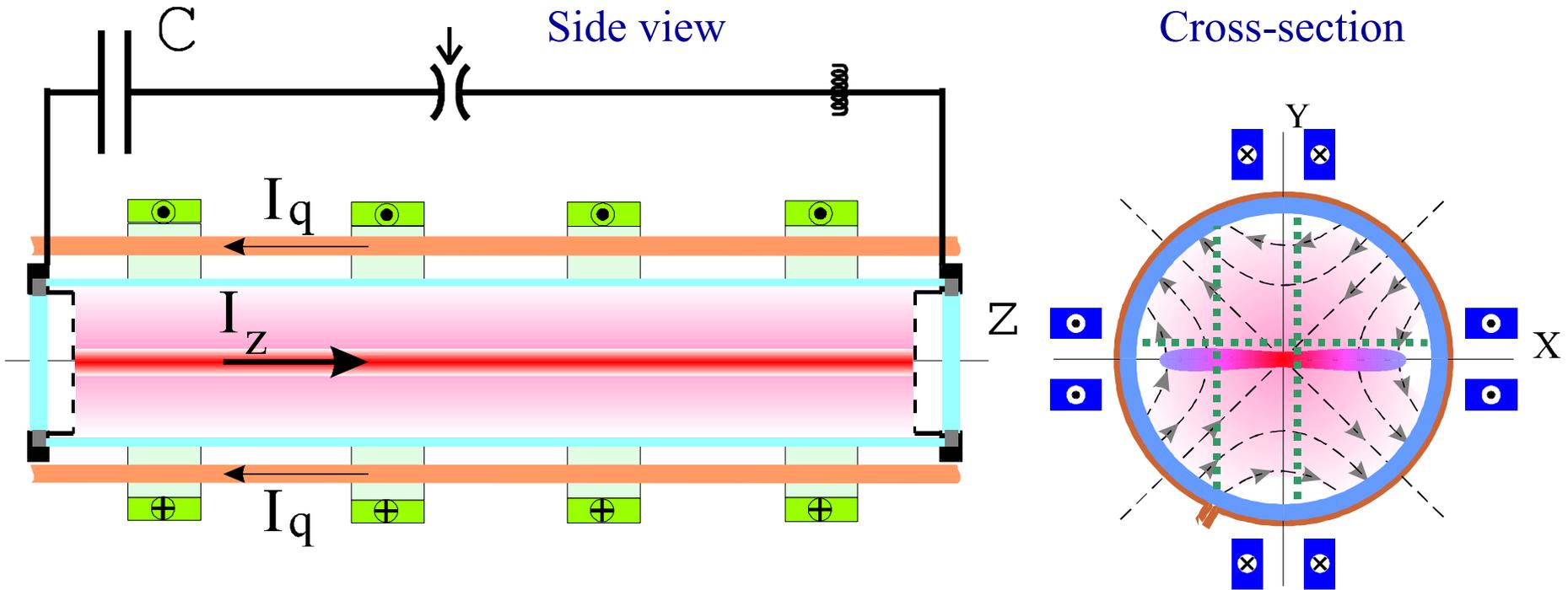


Уменьшение проводимости плазмы на стадии распада слоя и увеличение напряженности аномальных электрических полей указывают на усиление роли турбулентных процессов в плазме токового слоя. Однако турбулентность плазмы является, по-видимому, вторичным эффектом.

Токовые слои в 3D магнитных конфигурациях

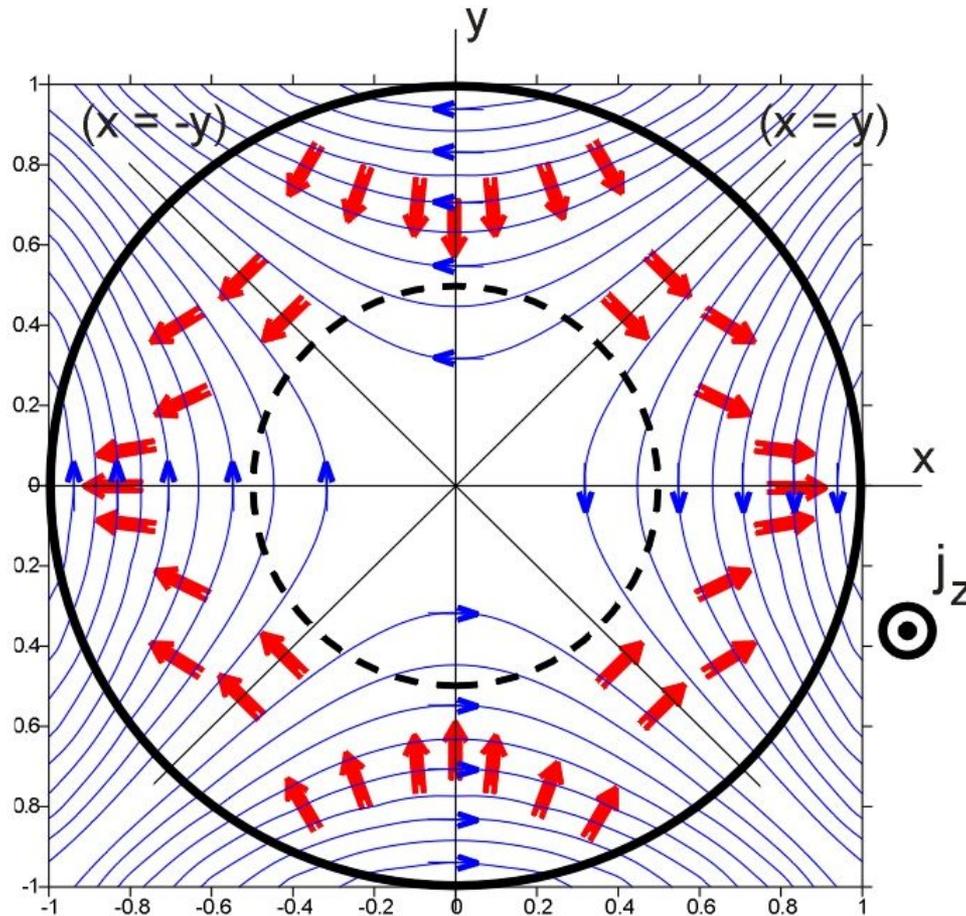
- = Возможно ли формирование токовых слоев в 3D магнитных конфигурациях, и в каких именно?
- = Какие топологические особенности 3D магнитных полей необходимы для формирования токовых слоев?
- = Каким образом структура 3D магнитного поля влияет на характеристики токовых слоев?
- = Захват в слой продольной компоненты магнитного поля и уменьшение степени сжатия в слой тока и плазмы.

Experimental device CS-3D



- = 2D magnetic field $B_{\perp} = \{-h y; -h x; 0\}$ with the null-line at the z-axis, $h \leq 1 \text{ kG/cm}$;
- = Guide field B_z aligned with the null line $B_z \leq 8 \text{ kG}$: formation of 3D field with the X line;
- = Vacuum chamber: quartz, $\varnothing 18 \text{ cm}$, $L = 100 \text{ cm}$, filled with **He, Ar, Kr** or **Xe** at a pressure $p = 20 \div 300 \text{ mTorr}$; initial plasma, $N_e^0 = 10^{14} \div 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, is produced by Θ -discharge;
- = Both magnetic fields and the initial plasma are uniform in the z-direction: $\partial/\partial z = 0$;
- = Current along the X line: $J_z \leq 100 \text{ kA}$, $T/2 = 6 \mu\text{s}$, results in **current sheet formation**;
- = Diagnostics: **magnetic measurements**, interference-holography; spectroscopy.

Структура сил Ампера при распространении магнитозвуковой волны в магнитном поле с X линией



$$\mathbf{B} = \{-h \cdot y; -h \cdot x; B_z\}$$

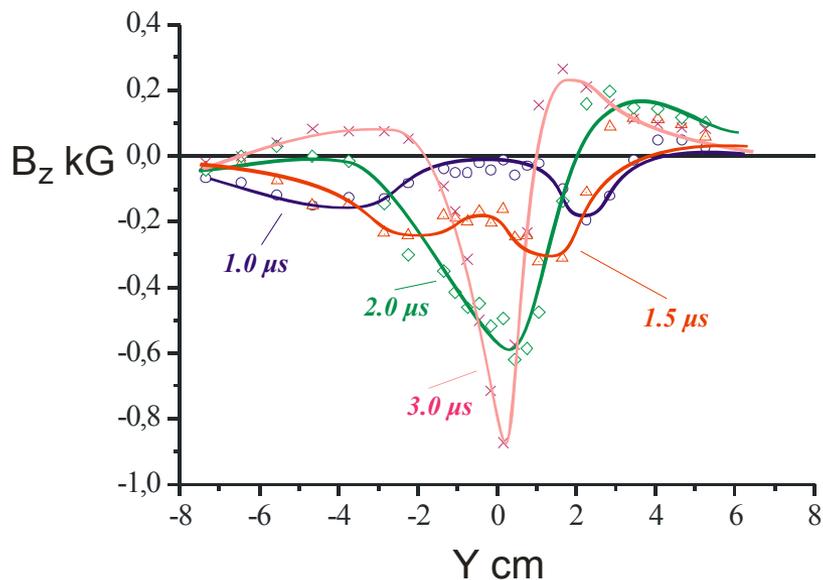
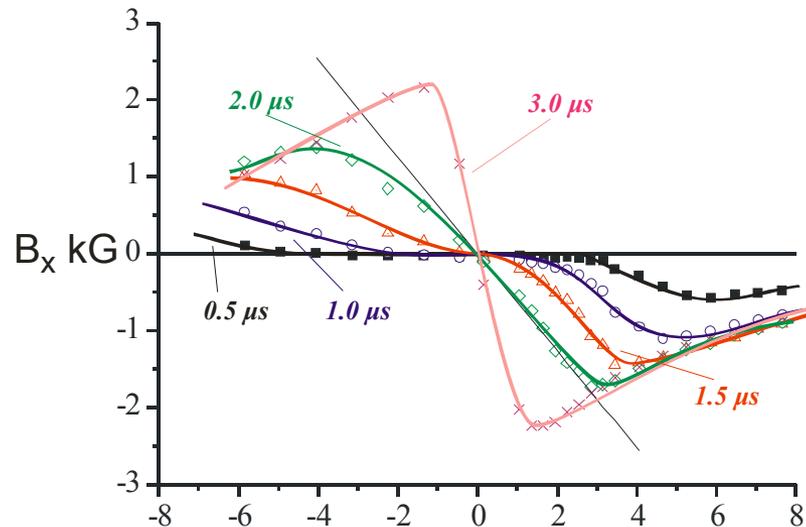
Время распространения МЗВ от границ плазмы к X линии:

$$t_A = (4\pi N_i M_i)^{1/2} / h$$

Динамика плазмы в магнитном поле определяется силами:

$$\mathbf{f} = 1/c [\mathbf{j} \times \mathbf{B}]$$

Распространение возмущений магнитного поля от границ плазмы к X линии ($y = 0$)



$$\mathbf{j} = c / (4\pi) \text{rot } \mathbf{B}; \quad \mathbf{f} = 1/c [\mathbf{j} \times \mathbf{B}]$$

1) 2D и 3D магнитные поля:

$$j_z = -c / (4\pi) \partial B_x / \partial y; \quad B_y = 0;$$

$$f_y = 1/c (j_z \cdot B_x) - \text{сжатие}$$

2) 3D магнитное поле с B_z компонентой:

$$j_x = c / (4\pi) \partial B_z / \partial y; \quad \partial / \partial z = 0$$

$$f_y = -1/c (j_x \cdot B_z) - \text{препятствует сжатию}$$

$$\text{При } t \approx 1 \text{ мкс} \quad f_{(2)} \approx -1/2 f_{(1)}$$

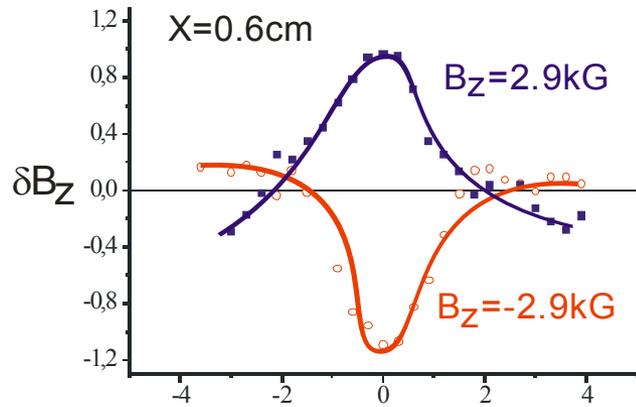
$$Kr, p = 36 \text{ mTorr};$$

$$h = 0.57 \text{ kG/cm};$$

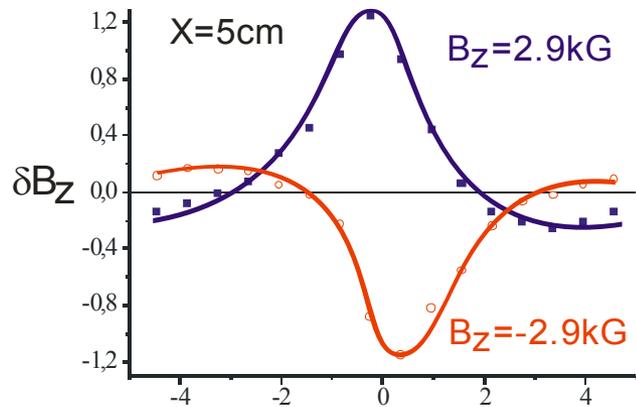
$$B_z^0 = -2.9 \text{ kG};$$

$$J_z = 70 \text{ kA}$$

Distributions of the excessive guide field δB_z over the sheet thickness for different directions of the initial guide field

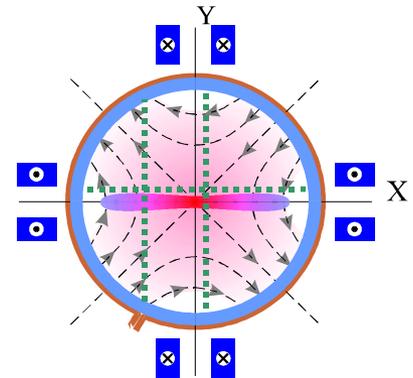


Along the whole sheet width the excessive guide field is of the same direction as the initial guide field



Y cm

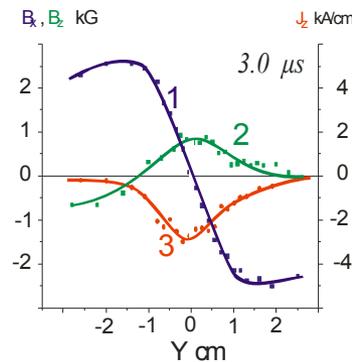
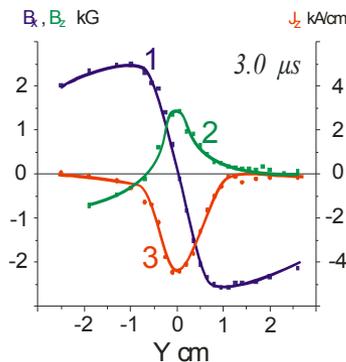
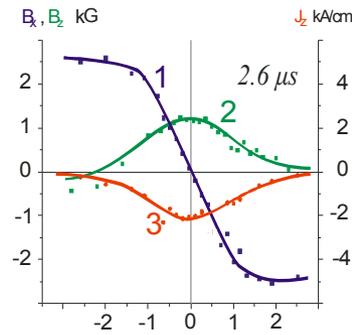
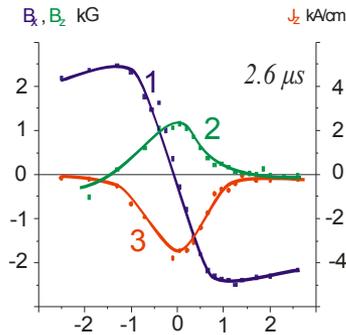
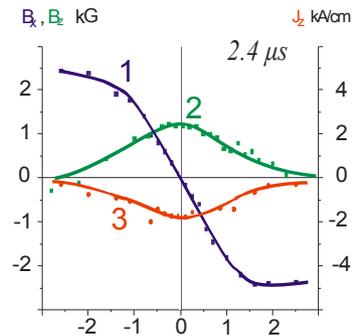
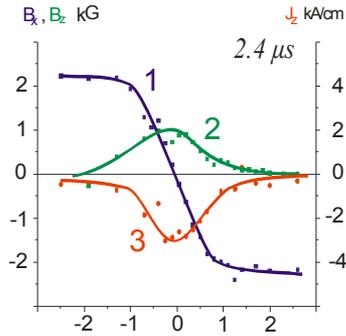
$Kr,$
 $p=36\text{ mTorr};$
 $h=0.57\text{ kG/cm};$
 $J_z=70\text{ kA};$
 $t \cong 3.0\ \mu\text{s}$



Тангенциальная компонента магнитного поля $B_x(y)$, ток плазмы $j_z(y)$ и захваченное в слой продольное поле $\delta B_z(y)$

$$B_z^0 = 1.45 \text{ kG}$$

$$B_z^0 = 4.3 \text{ kG}$$



Пространственные области, в которых имеются возмущения $\delta B_z(y)$, совпадают с областями, в которых протекает основной ток в слое j_z .

$$j_x \cong 0.6 \text{ kA/cm}^2$$

$$I_x \cong 0.9 \text{ kA/cm, при } y > 0$$

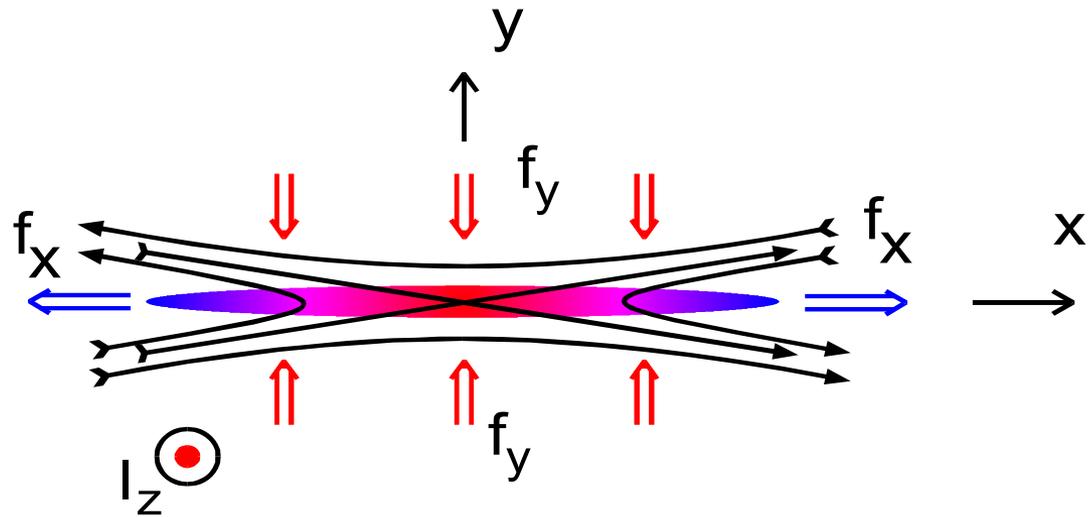
$$J_x \cong 54 \text{ kA.}$$

$$J_z \cong 70 \text{ kA}$$

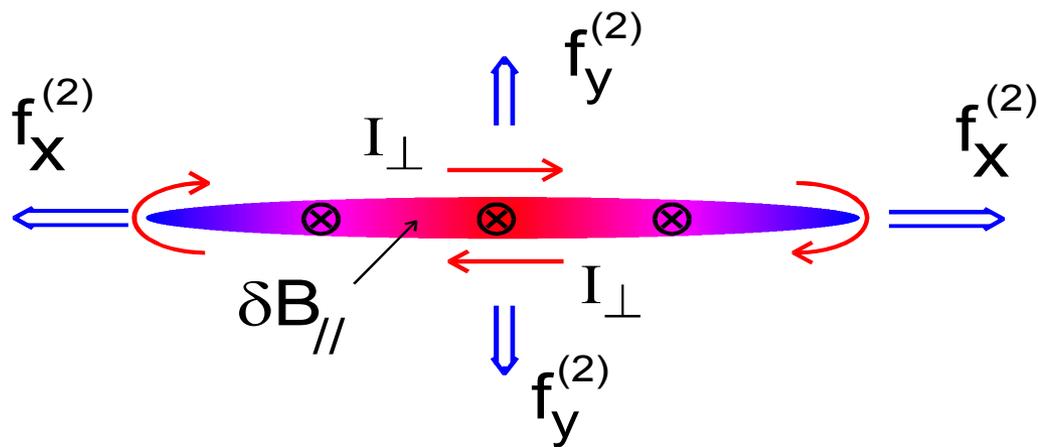
$$\text{Ar, 28 mTorr}$$

$$h = 0.57 \text{ kG/cm}$$

Силы Ампера, определяющие динамику плазмы в токовом слое, сформированном в 3D магнитной конфигурации, в присутствии продольной компоненты

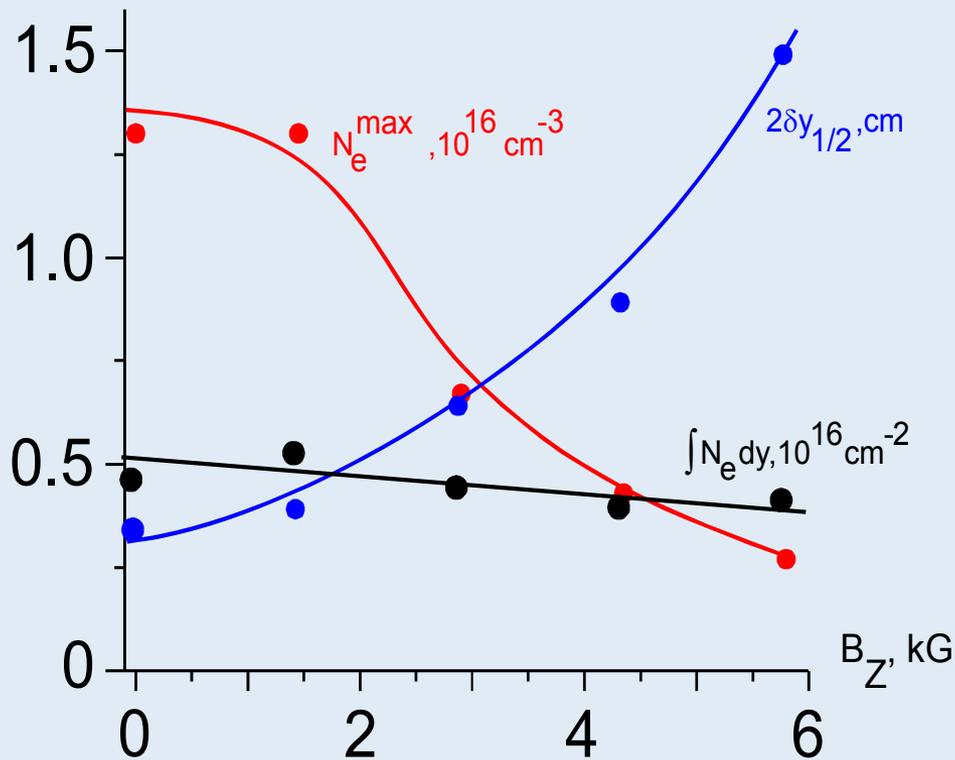


Сжатие тока и плазмы в слой



Ослабление сил, сжимающих плазму, при захвате в слой продольного поля

Плотность плазмы и толщина слоя в зависимости от напряженности продольной компоненты B_z



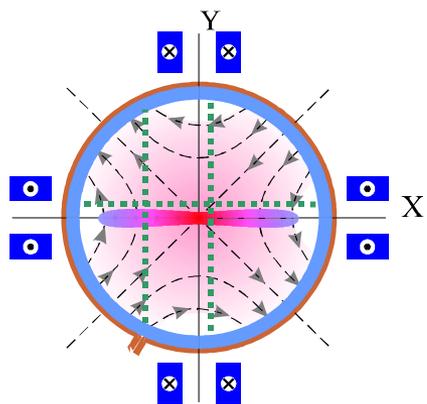
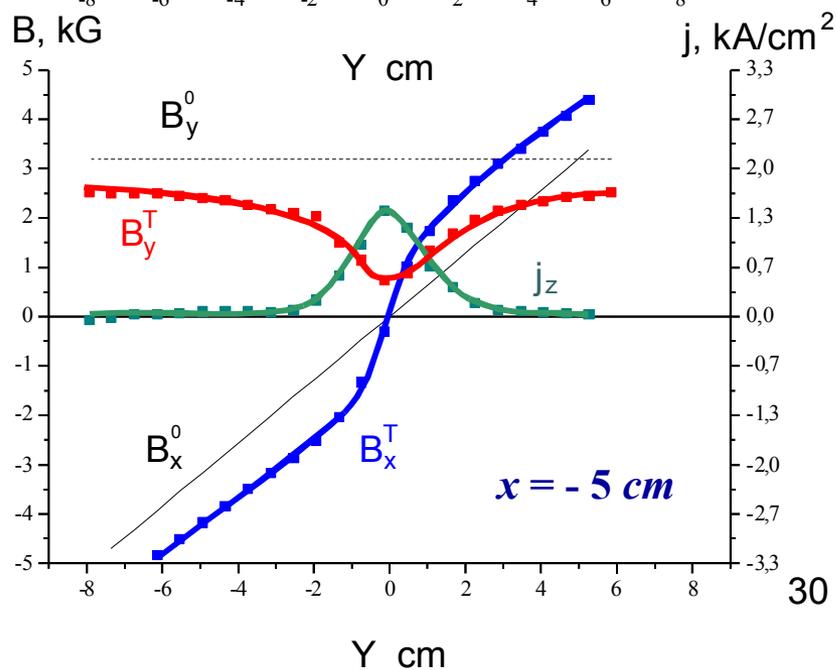
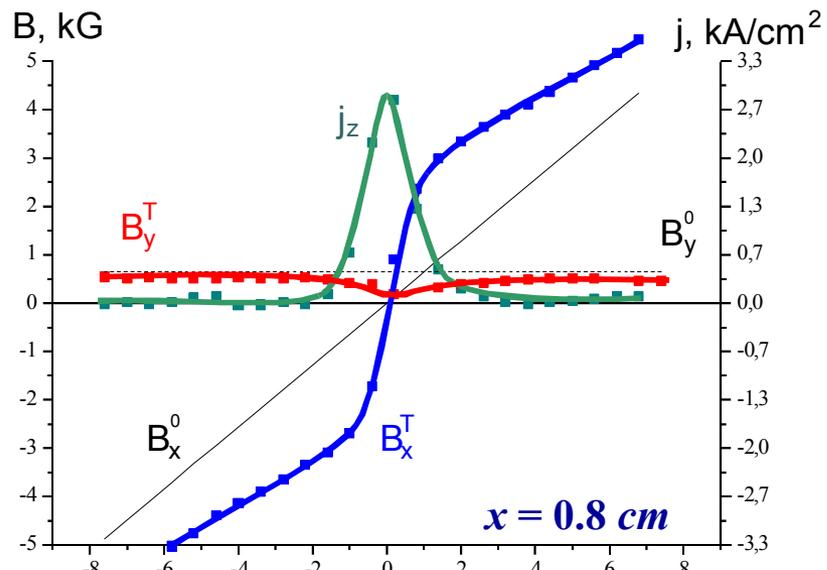
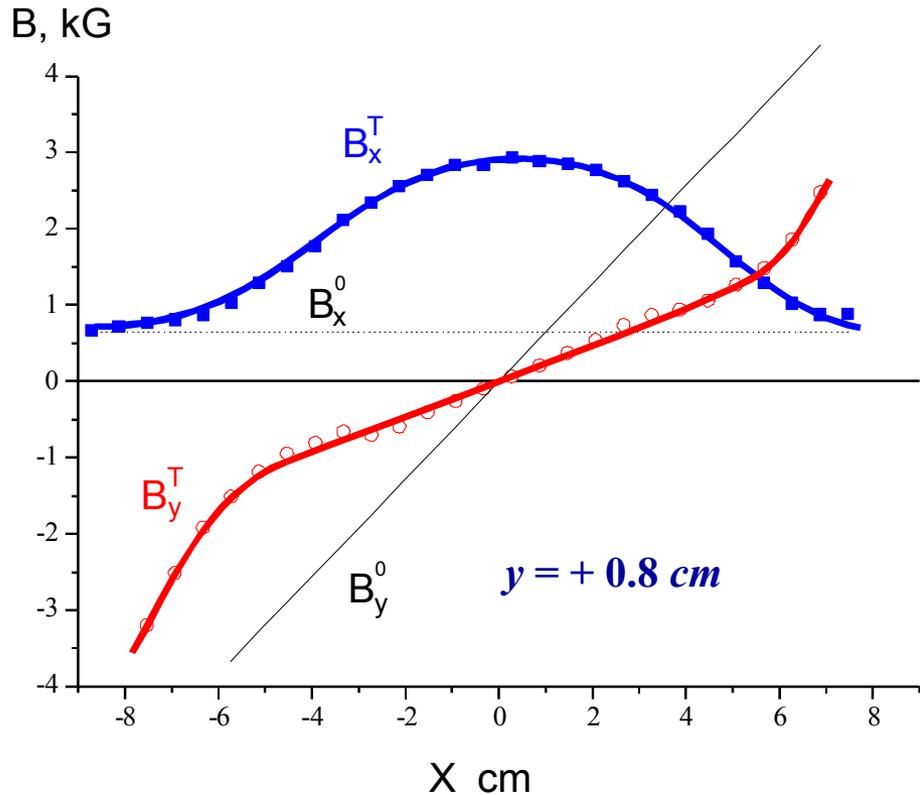
= Наблюдаемый эффект: в присутствии продольной компоненты степень сжатия в слой тока и плазмы уменьшается. Это обусловлено усилением в слое продольного поля δB_z , которое создает дополнительное давление, аналогичное газокинетическому.

Ar, 28 mTorr; $h = 0.43 \text{ kG/cm}$; $J = 50 \text{ kA}$

- В 3D магнитных полях с X линией, в присутствии продольной компоненты B_z вдоль X линии, возможно формирование протяженных токовых слоев и сжатие плазмы в пределы слоя.
- Увеличение начального значения B_z компоненты приводит к уменьшению степени сжатия в слой как плазмы, так и тока.
- Этот эффект обусловлен значительным усилением в слое B_z компоненты магнитного поля по сравнению с ее начальным значением, что сопровождается появлением дополнительных сил Ампера, препятствующих сжатию.

Особенности структуры магнитного
поля в окрестности сформированного
ТОКОВОГО СЛОЯ

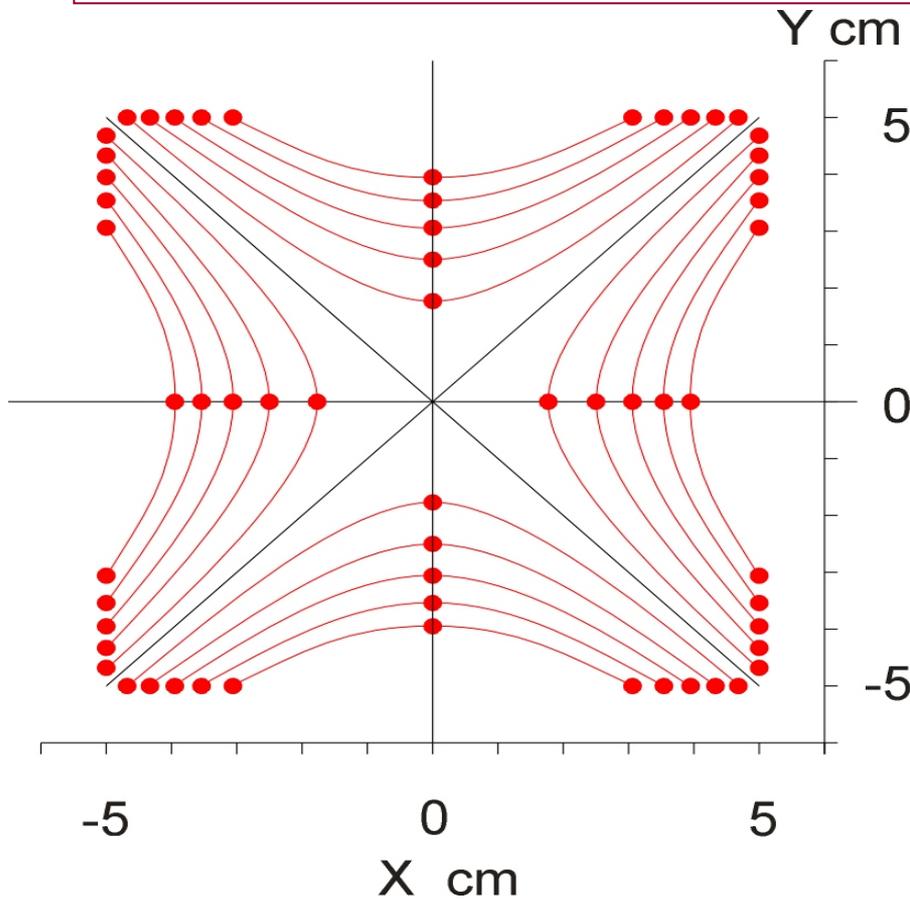
Distributions of two in-plane magnetic field components along the width (x-axis) and thickness (y-axis) of the current sheet



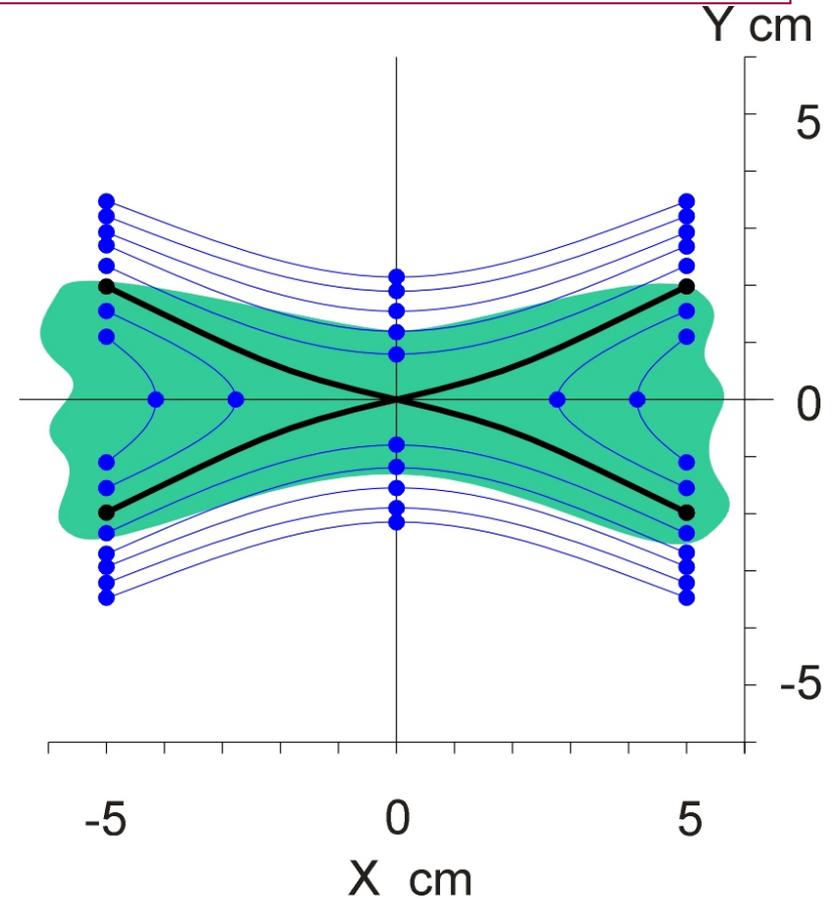
Ar, 20 mTorr
 $h = 0.64$ kG / cm
 $J_z = 65$ kA
 $t = 1.9$ μ s

Structure of the magnetic force lines in the (x, y) plane:

$$A_z = \text{const}, \delta A_z = 10^3 \text{ G/cm}$$



2D vacuum magnetic field



In-plane magnetic field of the current sheet

Ar 20 mTorr; $h = 0.64 \text{ kG/cm}$; $J_z = 65 \text{ kA}$; $t = 1.9 \mu\text{s}$

= Нормальная к поверхности токового слоя компонента B_y примерно на порядок величины меньше, чем тангенциальная компонента B_x .

= При этом, однако, она играет важную роль в динамических процессах, таких как возбуждение токов Холла и генерация направленных потоков плазмы вдоль поверхности слоя.

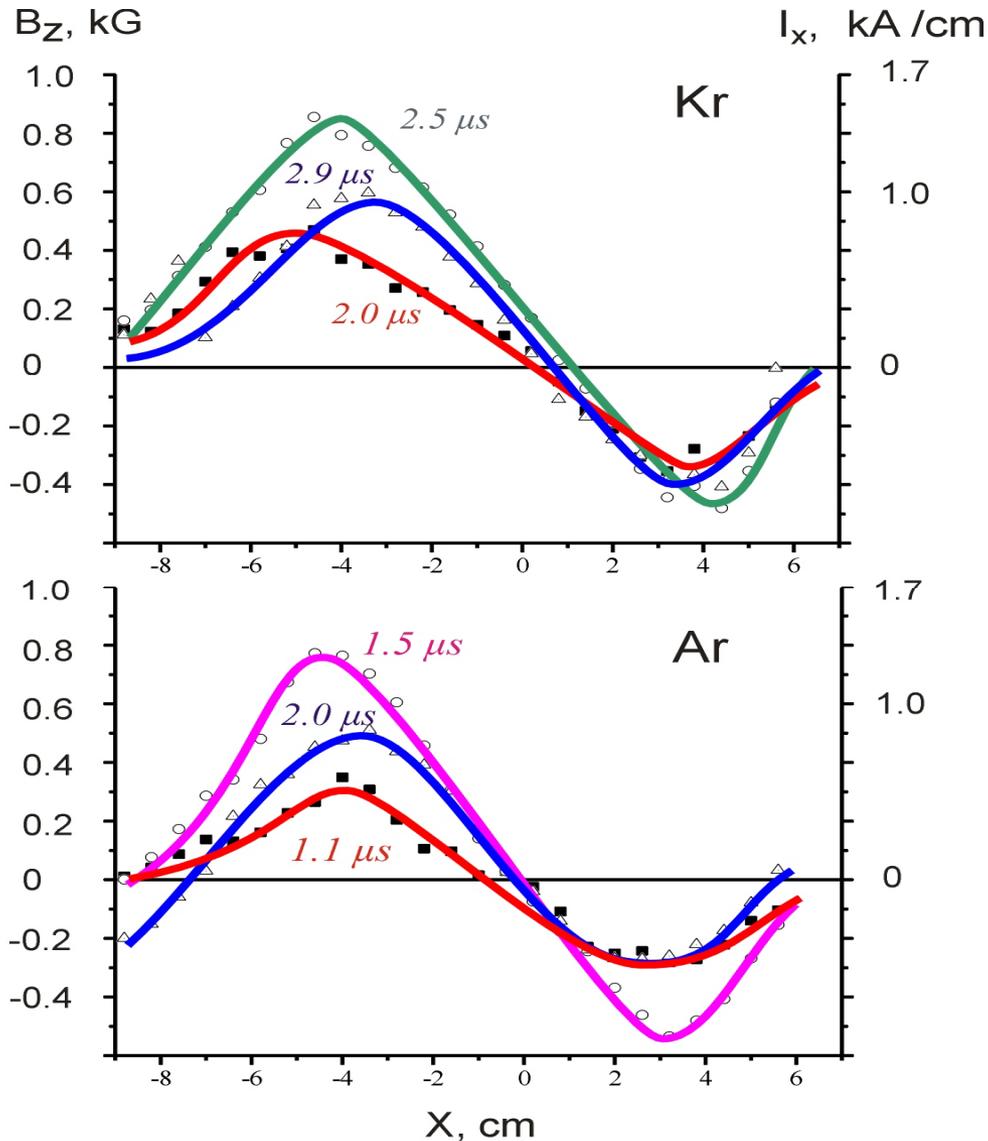
= Обобщенный закон Ома:

$$\vec{j} = \sigma \left(\vec{E} + \frac{1}{c} [\vec{v}_i \times \vec{B}] + \frac{\nabla p_e}{N_e \cdot e} - \frac{1}{N_e \cdot e \cdot c} [\vec{j} \times \vec{B}] \right)$$

= Возбуждение в плазме тока j_z может приводить к генерации в плоскости (x, y) токов Холла $j^{(H)}$:

$$j^{(H)} = - (\sigma / ceN_e) [j_z \times B_{\perp}]$$

Out-of plane (third) magnetic field B_Z in current sheets formed in the 2D configuration, without the initial guide field ($B_Z^0 = 0$)



The out-of-plane magnetic field B_Z is of the opposite signs is of the opposite signs at both sides of the current sheet symmetry planes: $x=0$; $y=0$. Hence B_Z exhibits the typical quadrupole structure

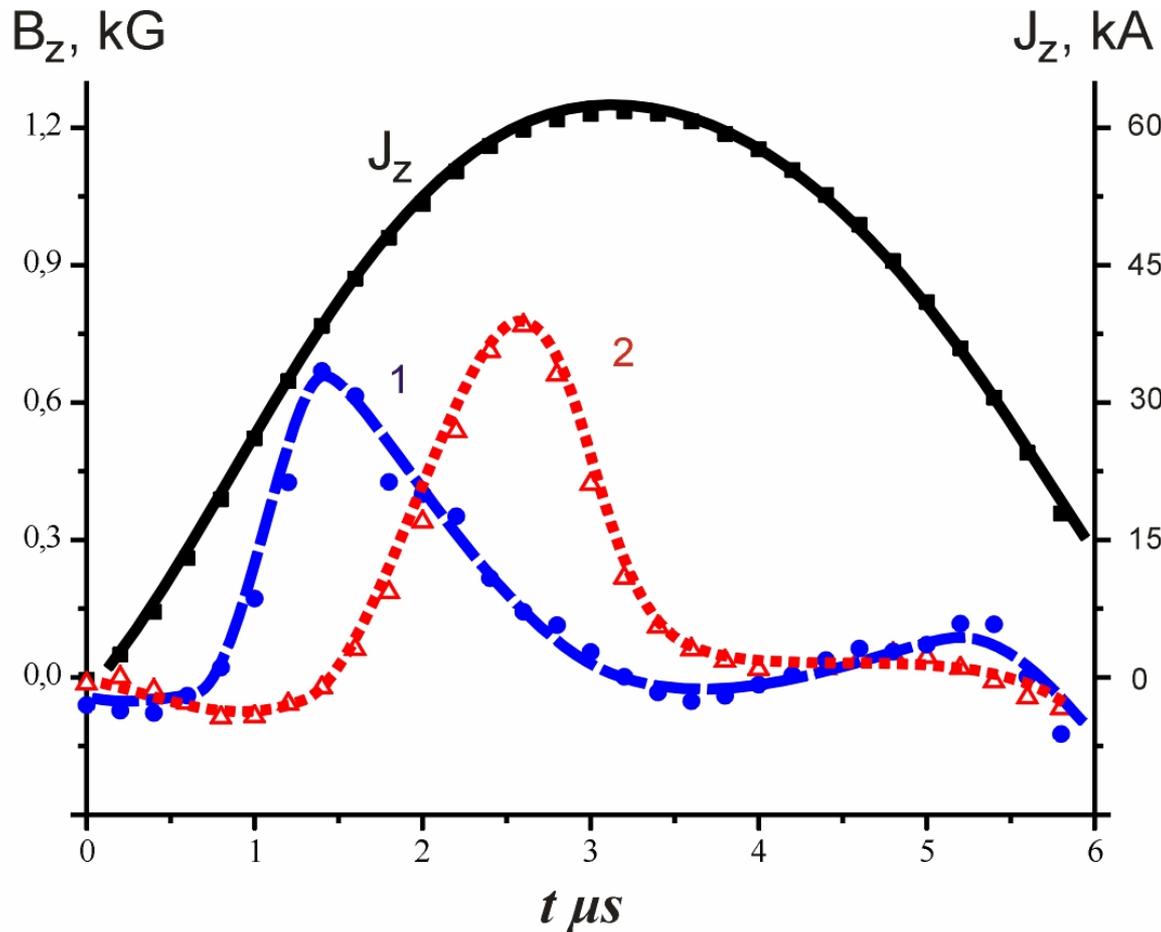
B_Z component disappears rapidly, and the time when B_Z exists increase with the ion mass.

It follows that along with the basic current J_Z , additional currents are generated in the (x, y) plane.

Currents in the (x, y) plane may be identified as the Hall currents

$$\begin{aligned}
 y &= +0.8 \text{ cm} \\
 p &= 20 \text{ mTorr}, \\
 h &= 0.64 \text{ kG/cm}, \\
 J_Z &= 65 \text{ kA}
 \end{aligned}$$

Temporal evolution of the out-of-plane magnetic field B_z in current sheets formed in 2D magnetic configuration, in the Ar (1) and Kr (2) plasmas



Hall currents exist in current sheets for a short temporal interval.

The electrons slow down by the electrostatic fields.

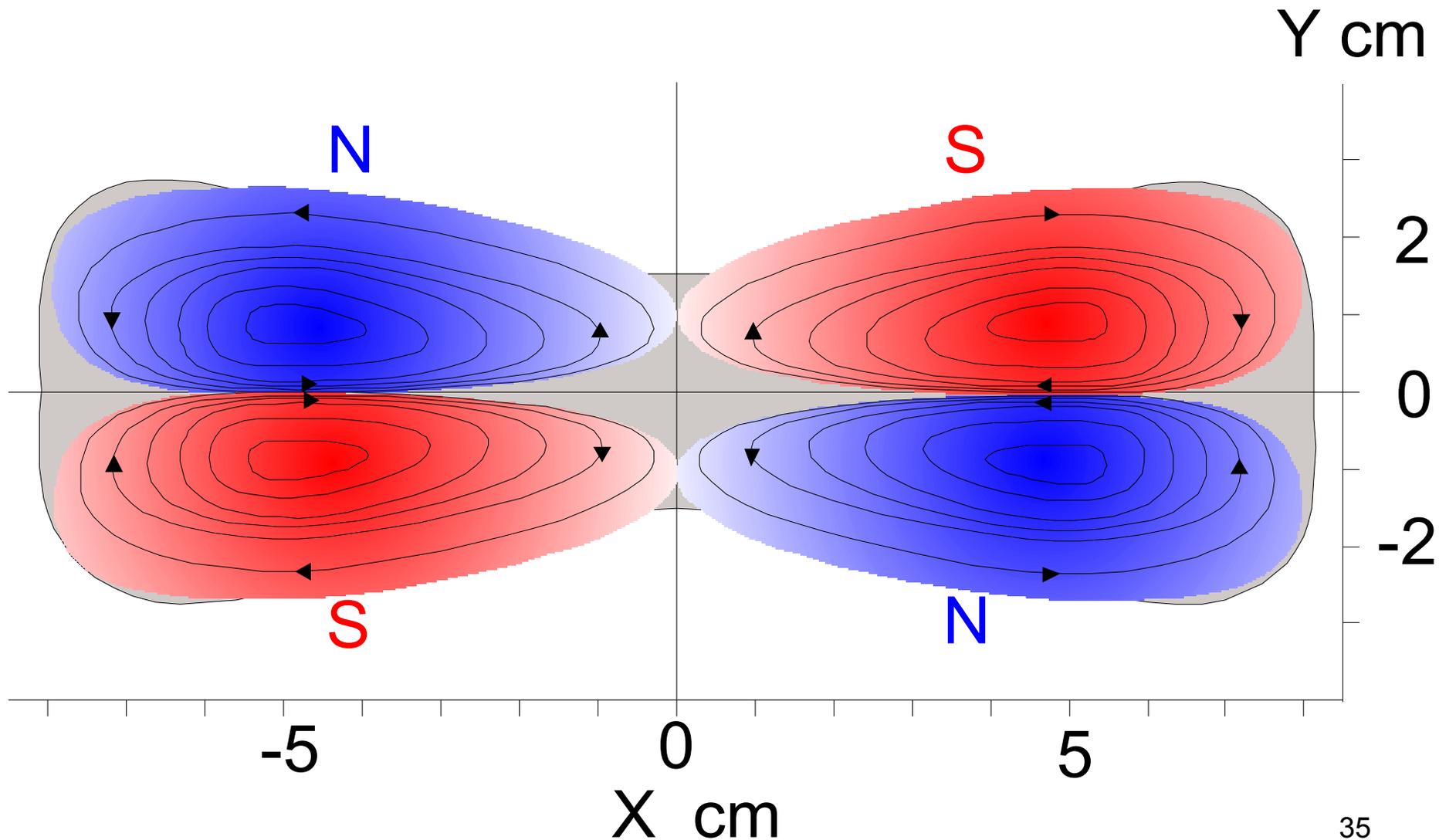
The ions accelerate in the wake of the electron drift motion.

After the ions attain the velocity of electrons, the Hall current should significantly decrease and even disappear.

The ions accelerate up to the velocity $v_e^{(H)}$ for a time

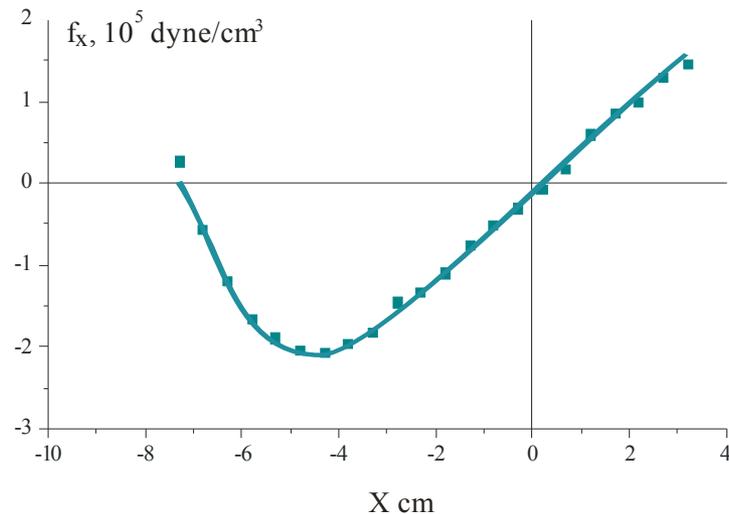
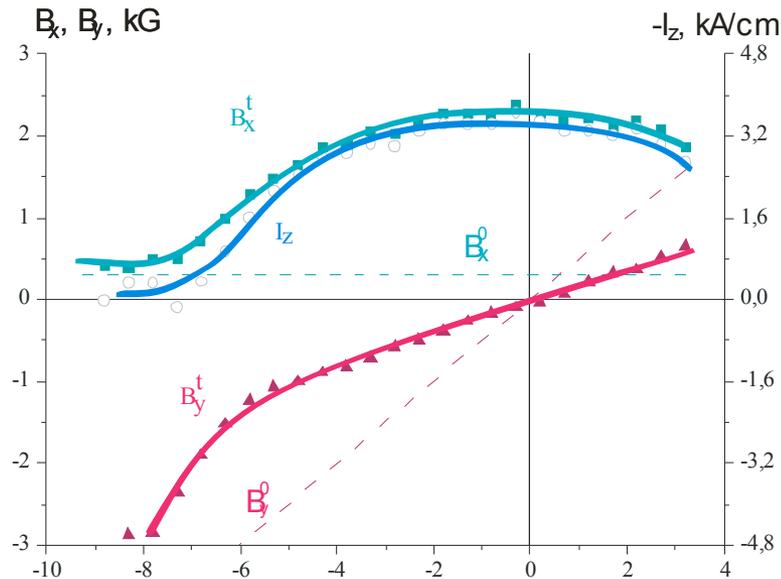
$$\tau \approx M_i \cdot v_e^{(H)} / Z \cdot e \cdot E_x \geq M_i \cdot c \cdot j^{(H)} / Z \cdot e \cdot j_z \cdot B_y$$

Структура токов Холла в сечении токового слоя.
Формирование квадрупольного магнитного поля.



Ускорение плазмы вдоль
поверхности токового слоя

Силы Ампера, вызывающие ускорение ионов плазмы вдоль поверхности токового слоя



Силы $f_x(x)$ рассчитанные на основе магнитных измерений:

$$\bar{f}_x(x) = -1/c \cdot \bar{j}_z(x) \cdot B_y(x)$$

$$\int \bar{f}_x(x) \cdot dx = N_i \cdot W_x \approx 0.93 \cdot 10^6 \text{ dyne} \cdot \text{cm}^{-2}$$

При $\bar{N}_i \approx 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3} \Rightarrow$

$$\Rightarrow \bar{W}_x^{\max} \approx 115 \text{ eV}$$

$$\tau^{\min} \approx 3.5 \mu\text{s}$$

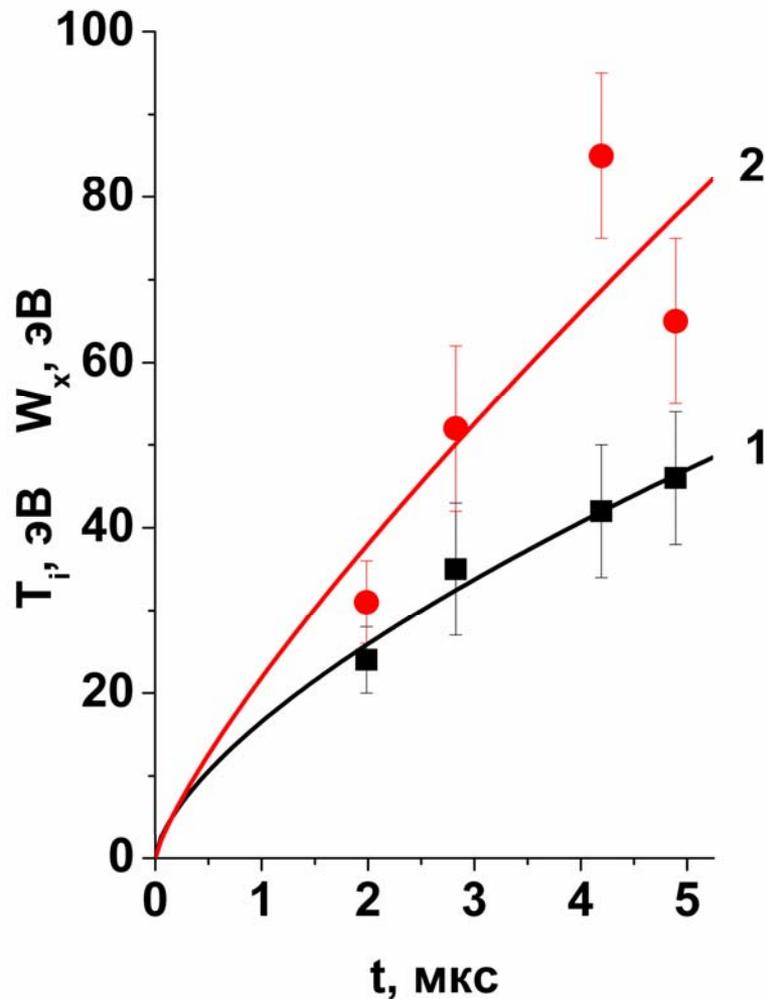
$$J_z \cong 75 \text{ kA}$$

$$\text{Ar, } 28 \text{ mTorr}$$

$$h = 0.5 \text{ kG/cm}$$

$$t \cong 3.0 \mu\text{s}$$

Температура ионов (1) и энергия направленного движения плазмы (2) в зависимость от времени



$W_x \approx 85 \text{ eV}$
при $\tau \approx 4 \mu\text{s}$

$J_z \approx 75 \text{ kA}$
Ar, 28 mTorr
 $h = 0.5 \text{ kG/cm}$

- = На основании магнитных измерений рассчитывались силы Ампера в зависимости от времени и от координаты x вдоль ширины токового слоя.
- = Под действием этих сил в течение квазистационарной стадии эволюции слоя должно происходить постепенное увеличение кинетической энергии направленного движения ионов вдоль поверхности токового слоя.
- = В результате энергия ионов у боковых концов слоя может достигать 100 эВ, что согласуется с непосредственно измеренными энергиями направленного движения ионов Ar.



Спасибо за внимание!