

ТОКОВЫЕ СЛОИ В МАГНИТНЫХ КОНФИГУРАЦИЯХ С ОСОБЫМИ ЛИНИЯМИ X-ТИПА

С.Ю.Богданов, Н.П.Кирий, В.С.Марков, А.Г.Франк¹⁾

Институт общей физики РАН

117942 Москва, Россия

Поступила в редакцию 21 декабря 1999 г.

Экспериментально исследованы возможности возникновения токовых слоев в 3D магнитных конфигурациях с особыми линиями X-типа. Обнаружено, что формирование слоя возможно в присутствии направленной вдоль X-линии продольной компоненты магнитного поля, которая может превышать величину поперечного поля в пределах области, занятой плазмой. Установлено, что формирование токового слоя в магнитном поле с X-линией характеризуется усилением продольной компоненты в слое и уменьшением эффективности сжатия плазмы по сравнению с 2D полем с нулевой линией. Обнаружено, что если продольная компонента превышает некоторую критическую величину, формирование слоя становится невозможным: вместо слоя образуются две оболочки, разделенные полостью в виде щели с локальным минимумом концентрации плазмы.

PACS: 52.30.-q

1. Один из ключевых моментов в проблеме магнитного пересоединения состоит в выяснении вопроса, возможно ли формирование токовых слоев в тех или иных магнитных конфигурациях. Действительно, пересоединение магнитных силовых линий может осуществляться лишь в таких областях пространства, где тесно сближаются силовые линии с различающимися (или с противоположными) направлениями. Эти области характеризуются высокой плотностью электрического тока и малыми масштабами, так что влияние диссипативных процессов становится существенным даже при высокой проводимости плазмы, и возможно нарушение вмороженности магнитного поля в вещество. Области с высокой концентрацией электрического тока, которые разделяют магнитные поля различных направлений и аккумулируют избыточную магнитную энергию, обычно принимают форму токовых слоев [1]. В двумерных (2D) магнитных полях с нулевой линией образование токовых слоев было предсказано теоретически (см. [1] и цитированную там литературу) и затем реализовано экспериментально в широком диапазоне условий [2]. В последние годы особый интерес привлекают трехмерные (3D) магнитные конфигурации, в которых возможность образования токовых слоев ассоциировалась до недавнего времени с наличием нулевых точек магнитного поля [3–5]. Как было установлено экспериментально, токовые слои действительно могут развиваться в окрестности магнитных нулевых точек [6], но также при значительном удалении от области нулевого магнитного поля и даже в неоднородных магнитных полях, которые не содержат нулевых точек в пределах области, занятой плазмой [7].

Среди многообразия 3D магнитных конфигураций особое место занимают конфигурации с особыми линиями X-типа. Это обусловлено как их распространенностью в природе (активные области на Солнце, замкнутые магнитные ловушки и др.), так

¹⁾ e-mail: annfrank@fpl.gpi.ru

и их фундаментальным значением для физики плазмы. В окрестности простейшей X -линии магнитное поле может быть представлено в виде

$$\mathbf{B} = \{hx; -hy; B_{\parallel}\}, \quad (1)$$

где ось z совмещена с особой линией, а магнитное поле в плоскости (x, y) – это 2D поле с $\mathbf{B} = 0$ при $(x = 0; y = 0)$ и радиальным градиентом h . В данной работе, в отличие, например, от [6–7], мы ограничились ситуацией, когда все условия однородны вдоль особой линии, в частности,

$$\partial B_{\parallel} / \partial z \rightarrow 0. \quad (2)$$

По сравнению как с нулевой линией, так и с нулевой точкой, особая линия X -типа представляет собой более общий структурный элемент магнитного поля, поскольку нулевая линия – это X -линия с нулевой продольной компонентой, $B_{\parallel} = 0$, а в конфигурациях с нулевыми точками особая линия X -типа присутствует и в области нулевого магнитного поля, и вдали от этой области. Согласно теоретическим представлениям, в окрестности особой X -линии могут реализоваться кумулятивные явления в плазме и процессы магнитного пересоединения [1, 8].

В данной работе экспериментально исследованы возможности возникновения токовых слоев в магнитных полях (1) с особыми линиями X -типа. Основное внимание было сосредоточено, во-первых, на определении диапазона начальных условий, в частности количественных характеристик исходных магнитных конфигураций, в которых возможно формирование токовых слоев, и во-вторых, на изменениях параметров токовых слоев в зависимости от структуры и особенностей начальной магнитной конфигурации.

2. Схема экспериментальной установки ТС-3D показана на рис.1. Для создания магнитной конфигурации с X -линией (1) используется принцип суперпозиции двух полей: 2D поля \mathbf{B}_{\perp} с нулевой линией и радиальным градиентом $h \leq 600$ Gs/cm, и однородного поля $B_{\parallel} \leq 6$ kGs, направленного вдоль нулевой линии. Магнитные поля возбуждаются с помощью отдельных электротехнических систем, так что параметры каждого из полей можно изменять независимо, формируя конфигурации с различными соотношениями между продольной и поперечной компонентами. Оба магнитных поля являются квазистационарными по отношению к процессам, происходящим в плазме. Вакуумная камера после предварительной откачки заполняется гелием до давления 300 mTorr. Начальная плазма с концентрацией $N_e \leq 10^{16}$ cm⁻³ создается с помощью вспомогательного Θ -разряда с сильной предварительной ионизацией. Последующее возбуждение в плазме электрического тока I_Z , направленного вдоль X -линии, инициирует движение плазмы в магнитном поле, что может приводить, в принципе, к формированию токового слоя. Полупериод изменения тока плазмы $T/2 = 5$ μ s, его максимальное значение варьировалось в пределах $I_Z^{max} = 40 \div 100$ kA.

Качественные представления о структуре плазмы в различные моменты времени и в различных спектральных линиях дают 2D распределения свечения плазмы в плоскости (x, y) , интегральные в z -направлении, см. рис.2, которые регистрировались ЭОП'ом в комбинации с узкополосными ($\Delta\lambda_{1/2} \approx 1.1$ nm) интерференционными фильтрами [9]. Концентрация электронов в различных участках плазмы определялась из анализа профилей спектральных линий HeII 468.6 nm и HeI 587.6 nm. Излучение из центральной области вакуумной камеры (диаметром 1.2–1.5 cm, длиной 60 cm) поступало на монохроматор МДР-3 и регистрировалось многоканальным приемни-

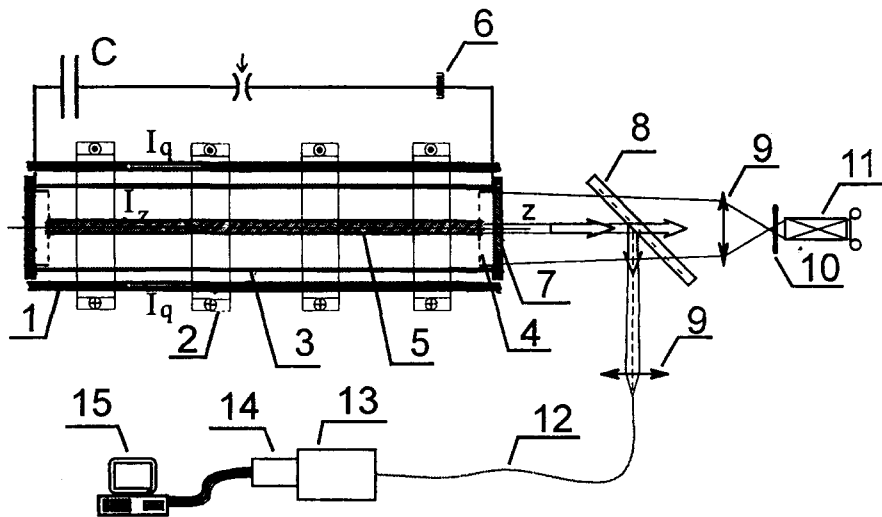


Рис.1. Экспериментальная установка ТС-3D и аппаратура для диагностики плазмы: 1 – прямые проводники с током для создания 2D магнитного поля с нулевой линией на оси z ; 2 – катушки для создания однородного аксиально-симметричного магнитного поля B_z ; 3 – кварцевая цилиндрическая вакуумная камера диаметром 18 см, длиной 100 см; 4 – сетчатые электроды; 5 – токовый слой; 6 – пояс Роговского; 7 – кварцевые окна; 8 – 50%-ное зеркало; 9 – линзы; 10 – интерференционный фильтр; 11 – электронно-оптический преобразователь (ЭОП) для регистрации изображений плазмы; 12 – кварцевый световод диаметром 400 мкм, длиной 10 м; 13 – монохроматор МДР-3; 14 – многоканальный оптический регистратор спектра МОРС-3; 15 – персональный компьютер РС-486

ком МОРС-3, который состоит из ЭОП'а на основе МКП и ПЗС-линейки [10]. Спектры излучения плазмы записывались и усреднялись в течение $\cong 0.6 - 0.7 \mu\text{s}$. Экспериментальные профили спектральных линий аппроксимировались расчетными профилями в виде свертки дисперсионного и гауссова профилей. Было установлено, что доплеровское уширение мало по сравнению с аппаратной функцией, а основным механизмом уширения линий HeII и HeI является электронное ударное уширение, что позволило определить концентрацию электронов в различных условиях, см. рис.3. Конфигурация электрического тока в плазме была получена из измерений магнитными зондами, расположенными снаружи вакуумной камеры [11].

3. Возбуждение в плазме электрического тока I_z приводит к существенной деформации исходного пространственного распределения плазмы, созданной в магнитном поле, в результате возникает новая токово-плазменная структура. 2D изображения излучающей плазмы демонстрируют особенности этих структур в зависимости от параметров магнитных конфигураций, см. рис.2. Эти изображения можно условно разделить на две группы: одна из них соответствует образованию плоского слоя (A1,2; B5,6), другая – образованию слоеобразной структуры, рассеченной на две части наклонной щелью, в которой отсутствует излучение в линиях HeII, и HeI (A3,4; B7,8). Изображения, относящиеся к первой группе, – это сравнительно тонкие полосы, вытянутые вдоль оси x , шириной $2\Delta x \geq 16 \text{ см}$ и толщиной $2\Delta y \leq 1 \text{ см}$, которые идентичны наблюдавшимся при формировании слоя в 2D магнитном поле с нулевой линией, рис.2 (B5), см. [9]. Форма изображений практически одинакова в спектральных линиях HeII и HeI (рис.2(A1,2)), за исключением характерного провала интенсивности в линии HeI в средней плоскости слоя, где интенсивность HeII

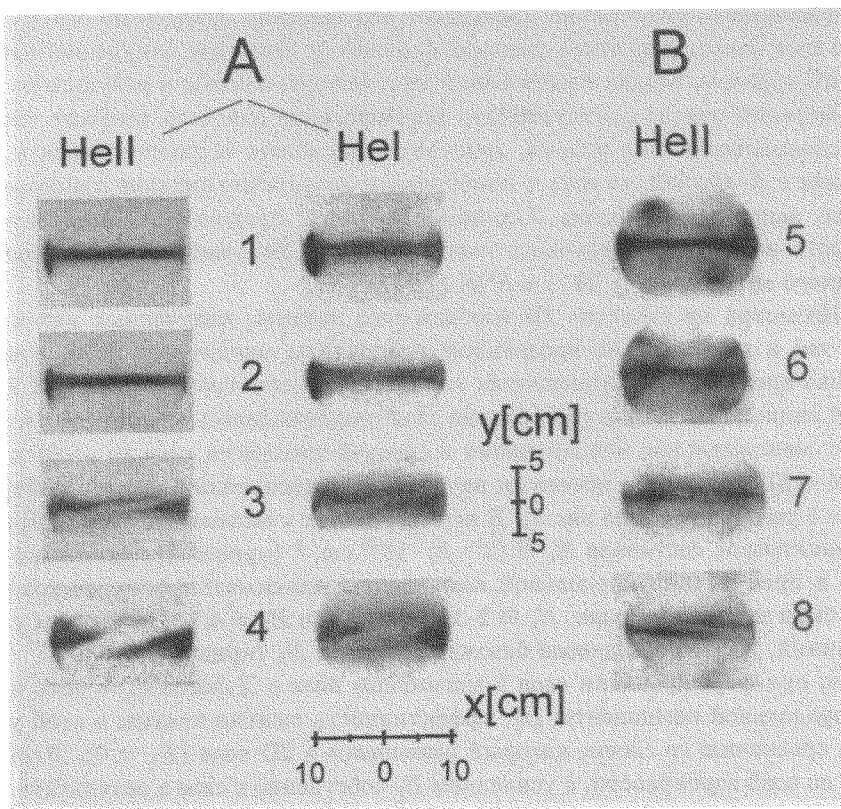


Рис.2. Изображения плазмы, зарегистрированные в спектральных линиях HeII 468.6 nm и HeI 587.6 nm в различных условиях. A - $B_z = 4.3$ kGs; $I_z^{max} \cong 100$ kA; $t \cong 2.5$ μ s. Представлена зависимость от градиента 2D магнитного поля h : 1 - $h = 570$ Gs/cm; 2 - 420 Gs/cm; 3 - 280 Gs/cm; 4 - 200 Gs/cm. B - $h = 200$ Gs/cm; $I_z^{max} \cong 40$ kA; $t \sim 2$ μ s. Представлена зависимость от напряженности продольного поля B_z : 5 - $B_z = 0$; 6 - $B_z = 1.4$ kGs; 7 - 2.9 kGs; 8 - 5.7 kGs

максимальна. Такая особенность типична для токовых слоев, созданных в 2D полях с нулевой линией, и соответствует максимальным значениям температуры электронов T_e и (или) концентрации плазмы N_e в средней плоскости слоя, что приводит к быстрой ионизации атомов гелия и, соответственно, к "выгоранию" спектральных линий HeI.

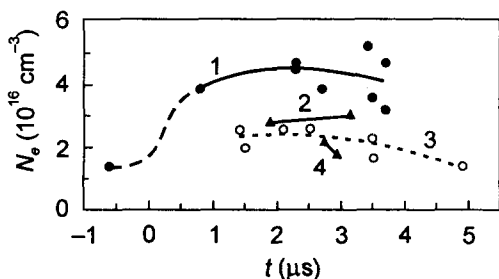


Рис.3. Концентрации электронов в токовом слое в зависимости от времени, полученные из уширений спектральных линий HeII 468.6 nm (кривые 1,3) и HeI 587.6 nm (кривые 2,4); $h = 570$ Gs/cm; $I_z^{max} \cong 100$ kA; 1,2 - $B_z = 0$; 3,4 - $B_z = 4.3$ kGs

Вывод о формировании плоского слоя, в котором сконцентрирован электрический ток плазмы, следует из магнитных измерений: ширина токового слоя (размер

в x -направлении) существенно превышает его толщину (размер по оси y), причем ширина слоя может достигать размера, близкого к диаметру вакуумной камеры.

Таким образом, анализ изображений излучающей плазмы и результаты магнитных измерений свидетельствуют, что формирование плоского токового слоя, в котором сконцентрирована плазма, действительно может осуществляться в магнитных полях с X -линией, то есть в присутствии достаточно сильной продольной компоненты, направленной вдоль X -линии. При этом продольная компонента может превышать величину поперечного поля в пределах большей части или даже всего вакуумного объема: $B_{\parallel} \geq |\mathbf{B}_{\perp}| = h^*|\mathbf{r}|$ при $|\mathbf{r}| \leq R_k$.

4. Несмотря на сходство 2D изображений плазмы, полученных как в присутствии, так и в отсутствие продольной компоненты магнитного поля, влияние B_{\parallel} отчетливо проявлялось в изменениях концентрации электронов (рис.3). В 2D поле с нулевой линией ($B_{\parallel} = 0$) формирование слоя сопровождалось эффективным сжатием плазмы: максимальная концентрация в средней плоскости слоя ($y \rightarrow 0$) достигала $N_e \cong (4 \div 5) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, превысив начальную концентрацию атомов нейтрального газа в ~ 5 раз (кривая 1 на рис.3). В периферийных участках слоя ($|y| > 0$) концентрация электронов составила $N_e \cong (2 - 3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (кривая 2), см. также [2, 9, 10]. Однако в присутствии продольной компоненты максимальная концентрация электронов была заметно меньше: $N_e \cong 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при $B_{\parallel} = 4.3 \text{ kGs}$, причем уширения обеих линий, HeI и HeII, давали близкие значения N_e (кривые 3,4).

Итак, при формировании слоя в магнитном поле с X -линией, то есть в присутствии продольной компоненты B_{\parallel} , эффективность сжатия плазмы в слой уменьшалась по сравнению со слоем, который развивался в 2D поле ($B_{\parallel} = 0$). Этот эффект связан, по всей вероятности, с усилением B_{\parallel} собственно в слое в результате переноса этой компоненты при движении плазмы на стадии формирования слоя.

Как известно [1], продольная компонента может создавать дополнительное давление, аналогичное газокинетическому, увеличивая суммарное давление в пределах слоя. Запишем условие поперечного равновесия токового слоя в магнитном поле:

$$8\pi N_e(T_e + T_i/\bar{Z}_i) + (\delta B_{\parallel})^2 = B_x^2, \quad (3)$$

где T_e и T_i – температуры электронов и ионов в слое, Z_i – эффективный заряд иона, δB_{\parallel} – превышение продольной компоненты в слое по сравнению с ее значением вне слоя, B_x – тангенциальная к поверхности слоя компонента поперечного поля. В середине слоя, при $x \rightarrow 0$, обычно справедливо соотношение

$$B_x \cong \sqrt{0.4I_z h}, \quad (4)$$

см. [1, 2, 9]. Тогда при $N_e \cong 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $h = 570 \text{ Gs/cm}$, $I_z = 100 \text{ kA}$ и $B_{\parallel} = 0$ имеем: $B_x = 4.8 \text{ kGs}$; $T_e + T_i/\bar{Z}_i \cong 11 \text{ eV}$. Характерное время выравнивания электронной и ионной температур в этих условиях не превышает $0.1 \mu\text{s}$, а $\bar{Z}_i \cong 1$, то есть для представляющих интерес интервалов времени естественно считать $T_e \cong T_i \cong 5 \div 6 \text{ eV}$. Температура плазмы в токовом слое, сформированном в присутствии продольной компоненты, $B_{\parallel} = 4.3 \text{ kGs}$, имеет, по-видимому, близкое значение. Действительно, выгорание спектральной линии HeI при высокой интенсивности излучения в линии HeII, рис.2(A1,2), указывает, что $5 \text{ eV} \leq T_e \ll 15 \text{ eV}$, а $\bar{Z}_i \cong 1$. Время выравнивания T_e и T_i при $N_e \cong 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ не превышает $0.2 \mu\text{s}$, так что $T_e \cong T_i$. Тогда из условия (3) можно оценить усиление продольной компоненты магнитного поля в слое:

$\delta B_{\parallel} \simeq 3.7 \text{ kGs}$, что составляет $\simeq 80 - 90\%$ от исходного значения B_{\parallel} . В результате суммарное продольное поле в пределах слоя достигало величины $B_{\parallel}^{sh} \simeq 8 \text{ kGs}$.

Таким образом, формирование токового слоя в 3D магнитных полях с X -линией характеризуется усилением продольной компоненты магнитного поля в пределах слоя и уменьшением эффективности сжатия плазмы по сравнению с 2D полем с нулевой линией.

5. Проанализируем параметры исходных магнитных конфигураций (1), в которых возможно формирование плоского токового слоя. При постоянной продольной компоненте, $B_{\parallel} = 4.3 \text{ kGs}$, уменьшение поперечного градиента до значения $h \leq 280 \text{ Gs/cm}$ приводит к тому, что слой не образуется, рис.2 (серия А), при этом $B_{\parallel}/h \geq 15.3 \text{ cm}$. При неизменном градиенте $h = 200 \text{ Gs/cm}$ (серия В) слой не формируется при меньшем значении продольной компоненты: $B_{\parallel} \geq 2.9 \text{ kGs}$ ($B_{\parallel}/h \geq 14.5 \text{ cm}$). Отсюда можно сделать вывод, что для формирования токового слоя в магнитной конфигурации с X -линией отношение B_{\parallel}/h не должно превышать некоторую критическую величину. В частности, для данного эксперимента $B_{\parallel}/h \sim 15 \text{ cm}$, что, по всей вероятности, обусловлено геометрическими свойствами системы: длиной X -линии, диаметром электродов и т.п.

6. Плазменные структуры, которые развиваются при $B_{\parallel}/h \geq 15 \text{ cm}$, несколько похожи на слой, но только вдали от X -линии, то есть в тех областях, где поперечная компонента магнитного поля $|\mathbf{B}_{\perp}| = h \cdot |r|$ достаточно велика (заметим, однако, что $|\mathbf{B}_{\perp}| \leq B_{\parallel}$ всюду в пределах плазменного объема). В центральной же области отчетливо видна наклонная щель, в которой отсутствует излучение плазмы как в спектральных линиях HeI, так и HeII, и которая разделяет плазменную структуру на две части (рис.2 (А3, 4)). Естественно предположить, что в этой области имеется локальный минимум концентрации плазмы или плазменная полость, в виде резко очерченной наклонной щели.

7. Итак, в настоящей работе впервые экспериментально установлена возможность формирования токовых слоев в магнитных конфигурациях, содержащих X -линии, а также определены количественные характеристики исходных конфигураций, в которых происходит образование слоя. Обнаружено, что формирование слоя возможно в присутствии достаточно сильного однородного магнитного поля B_{\parallel} , направленного вдоль X -линии, в частности, при $B_{\parallel} > |\mathbf{B}_{\perp}|$ всюду в пределах области, занятой плазмой.

Установлено, что эффективность сжатия плазмы в слой уменьшается с увеличением продольной компоненты магнитного поля с X -линией, так что в присутствии B_{\parallel} концентрация электронов в слое оказывается заметно ниже, чем при формировании слоя в 2D магнитном поле с нулевой линией ($B_{\parallel} = 0$). Уменьшение концентрации электронов связано с существенным возрастанием B_{\parallel} собственно в пределах слоя.

Обнаружено, что если B_{\parallel} -компонента превышает некоторую критическую величину, формирование плоского токового слоя становится невозможным: вместо слоя образуются две оболочки, разделенные полостью в виде щели с локальным минимумом концентрации плазмы. Существенный параметр, определяющий возможность формирования токового слоя в магнитном поле с X -линией – это соотношение между градиентом 2D поля h и величиной B_{\parallel} -компоненты.

Авторы благодарны Г.М.Батанову за полезные обсуждения и В.Б.Бурилиной за помощь в эксперименте.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 99-02-18351, и INTAS.

1. S.I.Syrovatskii, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **19**, 163 (1981).
2. С.Ю.Богданов, Н.П.Кирий, А.Г.Франк, *Труды ИОФАН* **51**, 5 (1996).
3. P.Rosenau, *Phys. Fluids* **22**, 849 (1979).
4. С.В.Буланов, М.А.Ольшанецкий, *Физика плазмы* **11**, 727 (1985).
5. J.Green, *Phys. Fluids* **B5**, 2355 (1993).
6. С.Ю.Богданов, В.Б.Бурилина, В.С.Марков, А.Г.Франк, *Письма в ЖЭТФ* **59**, 510 (1994).
7. A.G.Frank, *Plasma Phys. & Contr. Fusion* **41**, Supl. 3A, A687 (1999).
8. Б.Б.Кадо́мцев, *УФН* **151**, 3 (1987).
9. С.Ю.Богданов, В.Б.Бурилина, А.Г.Франк, *ЖЭТФ* **114**, 1202 (1998).
10. Шт.Бюшер, Н.П.Кирий, Х.-Й.Кунце, А.Г.Франк, *Физика плазмы* **25**, 185 (1999).
11. В.Б.Бурилина, В.С.Марков, А.Г.Франк, *Физика плазмы* **21**, 36 (1995).