

О СЛИЯНИИ МАГНИТНЫХ ОСТРОВОВ В ТОКОВОМ СЛОЕ

А.Т.Алтынцев, В.И.Красов, Н.В.Лебедев, В.Л.Паперный

Экспериментально обнаружен параметр, контролирующий процесс перестройки магнитной структуры токового слоя. При значении параметра ниже порогового, магнитные острова, возникающие при развитии в слое тиринг-неустойчивости, разбегаются. В обратном случае острова сливаются, в результате чего протяженный токовый слой трансформируется в токовое волокно.

Токовый слой, разделяющий области плазмы с антипараллельными магнитными полями, представляет собой "резервуар" свободной энергии магнитного поля. Эффективным механизмом выделения этой энергии, обусловленным глобальной перестройкой структуры поля, является слияние магнитных островов, формирующихся в результате развития тиринг-неустойчивости в слое. На возможность осуществления этого механизма в реальном токовом слое указывают результаты работы ¹, где наблюдался процесс слияния магнитных островов. Однако в других экспериментах вместо этого наблюдалось разбегание магнитных островов и выброс их из слоя ². В настоящей работе исследованы условия, при которых в токовом слое реализуется процесс слияния магнитных островов.

Эксперимент проводился на установке "УН-Феникс" типа "тета-пинч". Начальная плазма (водород, $n_0 = 7 \cdot 10^{11} \div 2,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $T_{e0} \approx T_{i0} = 1 \div 5 \text{ эВ}$) создавалась в квазистационарном магнитном поле $B_0 = 310 \div 440 \text{ Гс}$, ориентированном вдоль оси рабочего объема установки. Плазма подвергалась сжатию цилиндрическим магнитным поршнем, создаваемым ударным витком диаметром 18 см и шириной $L = 30 \text{ см}$. Поле ударного витка изменялось во времени по синусоидальному закону с амплитудой $B \sim = 1300 \text{ Гс}$ и полупериодом 1,3 мкс и было направлено антипараллельно начальному полю B_0 . При этом на границе плазменного столба формировался цилиндрический токовый слой, сходящийся к оси установки. Измерения показали, что температура электронов в слое за время $\lesssim 80 \text{ нс}$ от начала его формирования повышается до значения $500 \div 800 \text{ эВ}$ вследствие диссипации тока на аномальном сопротивлении ³.

Магнитная структура слоя изучалась с помощью подвижной системы шести магнитных зондов, разнесенных по радиусу и измеряющих компоненту поля B_z , параллельную оси установки. Пространственное разрешение по оси z определялось шагом перемещения зондов и составляло ≈ 1 см, разрешение по радиусу $\sim 0,5$ см. Измерения показали, что магнитное поле обладает аксиальной симметрией с точностью $\sim 5\%$. В этом случае построенные по сигналам зондов изолинии магнитного потока $\Phi(r, z) = \int_r B_z(\rho, z) \rho d\rho$, с той же точностью совпадают с силовыми линиями поля. Значение поля в каждой точке усреднялось по трем "выстрелам". Временное разрешение методики (~ 10 нс) определялось точностью временной привязки сигналов зондов.

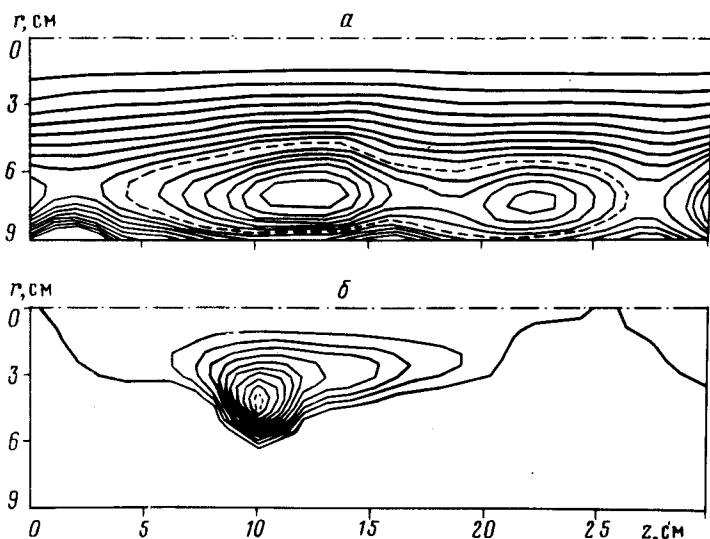


Рис. 1. Карты изолиний магнитного потока в моменты времени 80 нс (а), 540 нс (б). Изолинии нанесены через $500 \text{ Гс} \cdot \text{см}^2$, ограничены сепаратриссой $\Phi = 0$, пунктиром указана изолиния $\Phi = 5 \cdot 10^3 \text{ Гс} \cdot \text{см}^2$; $z = 0,30$ см — границы ударного вихря. ($B_0 = 440 \text{ Гс}$, $n_0 = 2,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$)

По картам силовых линий магнитного поля, построенных в объеме под ударным витком в разные моменты времени, можно проследить эволюцию токового слоя. После возникновения в момент времени $t = 0$ нулевой линии магнитного поля ($B_z = 0$) на границе плазменного столба формируется протяженный токовый слой толщиной $\Delta \approx 2 \div 3$ см, шириной $L \approx 30 \text{ см} > 10 \Delta$. Через $\tau \approx 100 \div 150$ нс процесс спонтанного пересоединения приводит к формированию в слое регулярной структуры в виде замкнутых магнитных конфигураций — островов, отличающихся пространственными размерами и уровнем замкнутого в них магнитного потока (см. рис. 1, а). Характерные временной τ и пространственный λ (λ — расстояние между соседними особыми точками магнитного поля X-типа) масштабы развития островов можно объяснить возбуждением бесстолкновительной тиринг-неустойчивости с инкрементом $\gamma (\tau \gtrsim 5\gamma^{-1}, \gamma^{-1} \approx 20 \text{ нс}$ для типичных параметров плазмы в слое) и волновым числом $k = 2\pi/\lambda$, удовлетворяющим условию $k\Delta/2 > 1^4$.

При $t > 150$ нс, когда поперечная составляющая магнитного поля B достигает значения $0,3 \div 0,6 B_{\text{гр}}$ ($B_{\text{гр}}$ — величина магнитного поля на границе токового слоя), рост магнитного потока в островах прекращается (см. рис. 2). Характер эволюции образовавшихся островов определяется для каждой пары величиной параметра $A(t) = \Delta\Phi_1(t)\Delta\Phi_2(t)/\lambda_{12}$, где λ_{12} — расстояние между соответствующими O-точками; $\Delta\Phi_{1,2}$ — магнитные потоки, замкнутые в островах: $\Delta\Phi_{1,2} = \Phi_{1,2}^0 - \Phi^x$, $\Phi_{1,2}^0$ — потоки в O-точках, Φ^x — поток в X-точке, лежащей вне рассматриваемой пары островов. Если величина A остается меньше порогового

значения $A_0 \approx 5 \cdot 10^5$ эрг (см. рис. 3), то острова разбегаются, в случае же $A > A_0$ наблюдается процесс их взаимодействия. При этом соседние острова сближаются, затем поток, замкнутый в острове с меньшей величиной $\Delta\Phi$ быстро исчезает, а поток в большем острове остается практически без изменения (см. кривые 2, 3 на рис. 2). Таким образом два острова сливаются в один, причем в момент слияния наблюдается резкий всплеск электрического поля в X -точке между сливающимися островами, знак которого противоположен знаку поля, возникающего здесь в результате пересоединения.

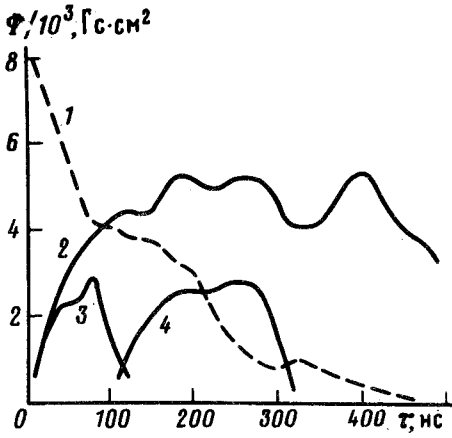


Рис. 2

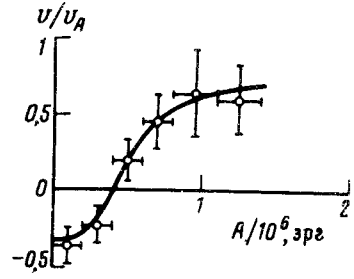


Рис. 3

Рис. 2. 1 – непересоединенная часть магнитного потока $\Phi^x(t)$, 2 ÷ 4 – захваченный в островах поток $\Delta\Phi$

Рис. 3. Зависимость скорости сближения ($v > 0$) и разбегания ($v < 0$) островов от величины параметра A ($v_a = B_0 / (4\pi n_0 m_i)^{1/2}$)

В результате слияния островов магнитная структура слоя упрощается, однако продолжающийся при наличии непересоединенного потока процесс пересоединения приводит к формированию нового магнитного острова и процесс слияния повторяется (кривая 4 на рис. 2). В конечном счете весь магнитный поток оказывается замкнут в одном острове, где медленно диссипирует (см. рис. 1, б).

На основании изложенных экспериментальных результатов можно предложить следующий сценарий эволюции протяженного токового слоя. Процесс спонтанного пересоединения, обусловленный развитием тиринг-неустойчивости, приводит к образованию в первоначально однородном слое магнитных островов и росту замкнутых в них магнитных потоков. Пока уровень этих потоков ниже значений, определяющих пороговую величину A_0 , острова разбегаются под действием магнитного давления $B_{гр}^2 / 8\pi$. Временной масштаб этого процесса $\sim L/v_a$. Если, однако, рост захваченного в островах магнитного потока происходит достаточно быстро, так, что $\tau \ll L/v_a$, то преобладающим становится эффект притяжения соседних островов друг к другу, приводящий к их слиянию. Подчеркнем, что исчезновение при этом потока малого острова, отсчитываемого от внешней по отношению к взаимодействующим островам X -точки, означает, что процесс слияния сопровождается быстрой диссипацией. Совместное действие тиринг-неустойчивости и процесса слияния островов приводит к полному пересоединению силовых линий с образованием одного острова, что соответствует трансформации протяженного токового слоя в токовое волокно (в цилиндрической геометрии описываемых экспериментов – плазменную конфигурацию типа "компактный тор"). При такой перестройке структуры слоя происходит существенное уменьшение энергии магнитного поля. Подобный механизм, реализуемый в токовом слое активной области Солнца может приводить к вспышечному энерговыделению за время порядка L/v_a .

Литература

1. *Irby J.H., Drake J.F., Griem H.R.* Phys. Rev. Lett., 1979, 42, 228.
2. *Ohyabu N., Kawashima N.* J. Phys. Soc. Jap., 1972, 33, 496.
3. *Алтынцев А.Т., Бардаков В.М., Красов В.И.* ЖЭТФ, 1981, 81, 901.
4. *Галеев А.А.* Основы физики плазмы, М., 1984, 331.

Сибирский институт земного магнетизма
ионосферы и распространение радиоволн
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
9 сентября 1985 г.