

ОБНАРУЖЕНИЕ ПОТОКОВ УСКОРЕННЫХ ЧАСТИЦ, ВЫХОДЯЩИХ ИЗ ТОКОВОГО СЛОЯ ПОПЕРЕК СИЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

С.Ю. Богданов, В.С. Марков, А.Г. Франк

Впервые зарегистрировано распространение быстрых электронов, возникающих на импульсной фазе магнитного пересоединения, вдоль поверхности плоского токового слоя, перпендикулярно к направлению электрического тока. Установлено, что возможность выхода электронов из слоя определяется общей структурой магнитного поля.

Преобразование магнитной энергии в другие виды, в том числе в потоки ускоренных частиц, была обоснована в ¹ на основе концепции токового слоя (ТС). В настоящей работе экспериментально исследована возможность распространения быстрых частиц на значительные расстояния от области прямого ускорения и установлена связь этого процесса со структурой магнитного поля ТС.

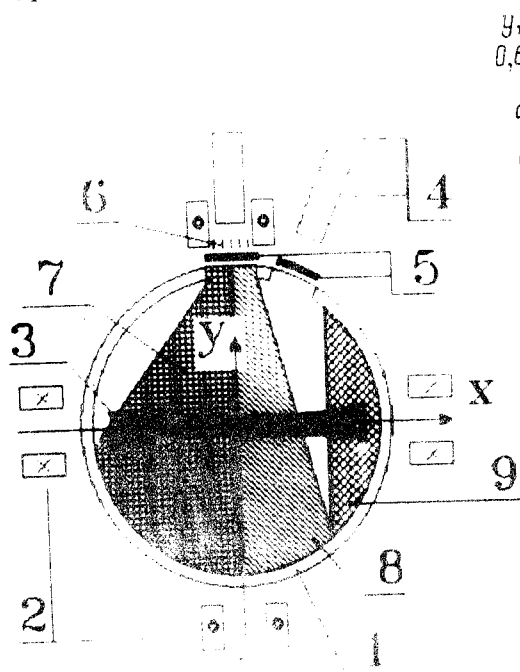


Рис.1

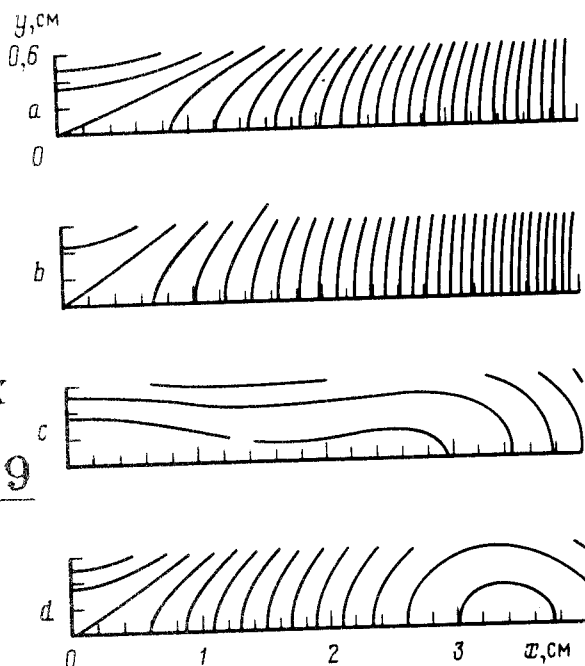


Рис.2

Рис. 1. Схема установки. 1 – вакуумная камера; 2 – проводники квадрупольного магнитного поля; 3 – токовый слой; 4 – сцинтилляционные детекторы; 5 – дополнительные фильтры; 6 – коллиматор; 7, 8 – половины областей, из которых регистрировалось РИ при двух ориентациях коллиматора; 9 – половина области в которой возникает рентгеновское излучение

Рис. 2. Структура силовых линий магнитного поля токового слоя. Показана 1/4 часть плоскости X–Y. Метастабильная (a, c) и импульсная (b, d) фазы магнитного пересоединения. a, b – открытая магнитная конфигурация Al, $h_0 = 2,3$ кГс/см, $E_Z = 250$ В/см, $P = 6 \times 10^{-3}$ торр. c, d – замкнутая магнитная конфигурация He, $h_0 = 0,6$ кГс/см, $E_Z = 250$ В/см, $P = 2,5 \times 10^{-2}$ торр

Формирование плоского ТС осуществлялось при сильноточном прямом разряде в магнитном поле с нулевой линией ². Определялась магнитная структура ТС ², ускоренные электроны регистрировались по их тормозному рентгеновскому излучению (РИ) тремя сцинтил-

ляционными детекторами. Два из них были расположены вне вакуумной камеры, в середине разрядного промежутка, в плоскости перпендикулярной к нулевой линии под углами 90° и 60° к поверхности слоя и регистрировали РИ, выходящее через слюдяные окна. рис. 1. Третий детектор был введен в камеру с торца и расположен за сетчатым электродом вне разрядного промежутка.

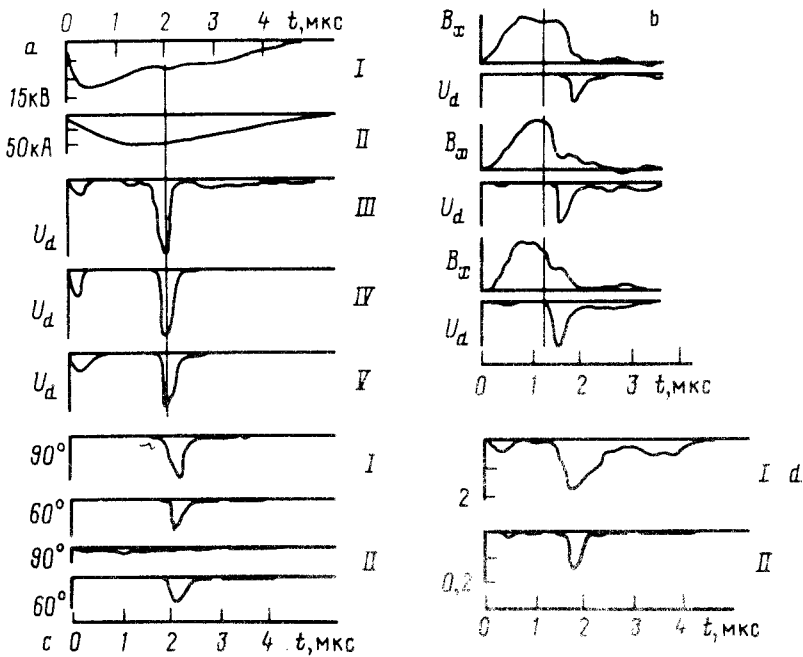


Рис. 3. *a* — Осциллограммы напряжения на разрядном промежутке (I), Тока плазмы (II), сигнала торцевого (III) и боковых (IV, V) детекторов. *b* — Осциллограммы сигналов магнитного зонда, регистрировавшего B_x — компоненту магнитного поля вблизи нулевой линии, и РИ с детектора, расположенного под углом 90° к поверхности слоя; показаны 3 различных случая. *c* — Осциллограммы сигналов боковых рентгеновского детектора при увеличении плотности поглощающего фильтра. I — без дополнительного фильтра. II — дополнительный фильтр $50 \text{ мг/см}^2 \text{ Al}$. Ar , $P = 10^{-2}$ торр, $h_0 = 2,3 \text{ кГс/см}$ (*a, c*) и $2,6 \text{ кГс/см}$ (*b, d*), $E_z = 250 \text{ В/см}$ (*a*), $190 \pm 250 \text{ В/см}$ (*b*), 190 В/см (*c, d*)

В зависимости от условий формирования, магнитная структура ТС на метастабильной фазе его эволюции может быть двух типов: либо она подобна структуре исходного поля с нулевой линией X-типа в середине слоя и несколько прижатыми к оси X сепаратрисами, рис. 2*a* (открытая конфигурация), либо в результате перекомпенсации нормальной к поверхности B_y — компоненты магнитного поля у краев ТС образуется замкнутая конфигурация с силовыми линиями, охватывающими весь слой, рис. 2*c*. Импульсная фаза магнитного пересоединения в обоих случаях проявляется в быстром уменьшении B_x и увеличении B_y компонент поля, возбуждении индукционного электрического поля E_z и ускорении электронов ^{2,3,4}, рис. 2*b, d*; 3*a, b*.

В открытой конфигурации РИ регистрировалось одновременно тремя детекторами и имело вид коротких всплесков, которые коррелировали с особенностью на $U_z(t)$ т. е. с им-

пульсной фазой пересоединения, рис. 3а. Наиболее наглядно эта корреляция видна на рис. 3. Локализация источников РИ, регистрировавшегося боковыми детекторами, была определена с помощью многощелевого коллиматора. В зависимости от ориентации коллиматора изменялось поле зрения детектора, рис. 1. При исключении пристеночных областей сигнал уменьшался более, чем в 10 раз, рис. 3с, т. е. РИ возникало вдали от нулевой линии, по-видимому на стенках вакуумной камеры. Следовательно, электроны, ускоренные на импульсной фазе магнитного пересоединения, покидали область неадиабатичности — малую окрестность нулевой линии размером $\delta < 0,1 \text{ см}$ ⁵, распространялись поперек магнитного поля на расстояния порядка 5 см и выходили из Т.С.

Характерная энергия РИ определялась методом фильтров. Отношения амплитуд сигналов, зарегистрированных с различными фильтрами, сравнивались с соответствующими отношениями, рассчитанными для трех различных спектров: $I \sim \exp(-E/T_0)$, $I \sim E^{-\gamma}$ и $I \sim \delta(E - E_0)$. Экспериментально определенным отношениям удовлетворяют, в пределах точности эксперимента, все три спектра при $T_0 \approx 1 \text{ кэВ}$, $\gamma \approx 6$, $E_0 \approx 7 \text{ кэВ}$. Наиболее жесткое излучение регистрировалось в начале импульсной фазы, рис. 3д. Значению $E_0 \sim 7 \text{ кэВ}$ соответствует максимальная энергия электронов $E_{max} \sim 10 \text{ кэВ}$. Предположив, что электроны ускоряются индукционным полем E_Z , получим $E_Z \sim 500 \text{ В/см}$, что не противоречит величине $E_Z \geq 360 \text{ В/см}$ из³, т. е. индукционное электрическое поле, возникающее на импульсной фазе магнитного пересоединения, может обеспечить наблюдаемые энергии электронов. Однако нельзя исключить и возможность ускорения электронов в турбулентных электрических полях^{2, 3}.

В режимах с образованием замкнутой магнитной конфигурации, импульсная фаза пересоединения ярко выражена (ср. рис. 2с и 2д), сопровождается возбуждением индукционного поля E_Z ² и торцевой детектор регистрировал РИ; однако боковые детекторы не регистрируют РИ даже при увеличении их чувствительности в 100 раз. Следовательно, в этих условиях ускоренные электроны выходили из Т.С. только вдоль нулевой линии, и не могли выходить вдоль поверхности Т.С. на его боковые края.

Таким образом впервые зарегистрированы потоки быстрых электронов, направленные вдоль поверхности Т.С. перпендикулярно к направлению тока. Установлено, что возможность такого выхода электронов из Т.С. определяется общей структурой магнитного поля. Есть основания предположить, что различием структуры магнитного поля Т.С. можно объяснить различную эффективность ускорения и нагрева частиц в процессах вспышечного типа.

Литература

1. Syrovatskii S.I. Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1981, 19, 163.
2. Богданов С.Ю. и др. Письма в ЖЭТФ, 1982, 35, 232.
3. Bogdanov S. Yu. et al. Proc. ICPiG XVII, Budapest, 1985, 1, 67.
4. Алтынцев А.Т. и др. Физика плазмы, 1978 4, 18.
5. Березинский В.С. и др. Астрофизика космических лучей. М.: Наука, 1984, 360 с.

Институт общей физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
26 апреля 1990 г.