ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Зайцева Ивана Владимировича на тему: «Механизмы ускорения тепловых ионов в процессе магнитного пересоединения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 01.03.03 – Физика Солнца.

Диссертация Зайцева Ивана Владимировича посвящена актуальной проблеме исследования процесса пересоединения в рамках численного моделирования в кинетическом приближении. Целью данной работы является определение критериев эффективного ускорения ионов теплового распределения плазмы в конфигурациях электромагнитных полей, свойственных для сепаратрис пересоединения, а также в области смены знака пересоединяющейся компоненты магнитного поля. Для решения данных задач диссертантом выполнено численное моделирование процесса антипараллельного пересоединения с помощью кода iPIC3D с различными начальными температурами ионов. Также выполнено численное моделирование для распада токового слоя в постановке Римана и моделирование с тестовыми частицами в заданных стационарных электромагнитных полях. В результате этих численных экспериментов диссертантом показано, что холодные ионы испытывают эффективное ускорение при пересечении потенциального барьера на сепаратрисах пересоединения, формируя пучок, направленный перпендикулярно магнитному полю, в то время как горячие ионы более подвержены рассеянию по энергиям. При этом, крупномасштабное кинетическое моделирование пересоединения с низкоэнергичной ионной популяцией было проведено впервые. В результате диссертантом установлено, что величина изменения энергии ионов, пересекающих сепаратрису, зависит как от их начальной тепловой скорости, так и от ширины ускоряющего потенциального барьера на сепаратрисе. Кинетической анализ траекторий частиц, ускоряемых в области разворота поля позволил объяснить механизм формирования поперечной анизотропии плазмы в центре выхлопа, и продольной анизотропии вне его.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения и одного приложения, содержит 24 рисунка и 83 библиографические ссылки. Общий объем диссертации составляет 83 страницы.

Во **Введении** представлено обоснование актуальности диссертационной работы, изложены цели исследования, научная и практическая значимость работы и сформулированы её основные результаты.

В **первой главе** обсуждаются основные методы описания плазмы.

Во **второй главе** обсуждаются результаты численного 2D моделирования процесса антипараллельного пересоединения с горячими ионами с помощью кода iPIC3D. Используются типичные для хвоста магнитосферы параметры плазмы с отношением ионной и электронной температур ~ 5. Диссертант отмечает, что результаты, полученные в данной главе, не являются новыми, а представленные численные эксперименты используются для апробации кода, и для сравнения с оригинальными результатами, полученными в последующих главах при моделировании с холодными ионами.

Третья глава посвящена обсуждению результатов моделирования с холодными ионами, используя код, опробованный в предыдущей главе. Диссертант отмечает актуальность и новизну учета наличия холодной ионной популяции в магнитосферной плазмы и ее влияния на процесс пересоединения.

В **четвертой главе** обсуждается кинетический механизм термализации ионной популяции внутри ускоренного альвеновского потока вдали от X-линии. Для этого были проведены исследования численного решения задачи Римана о бифуркации токового слоя. Выполнен анализ траекторий тестовых частиц, пересекающих область разворота магнитного поля, и, на основании результатов анализа, сделаны выводы о механизме формирования продольной температурной анизотропии внутри ускоренного потока, движущегося из области пересоединения.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Диссертационная работа Зайцева И.В. является законченной научно - квалификационной работой, в которой выполнен ряд численных экспериментов, позволивших получить новые результаты для процесса пересоединения с холодными ионами. Данные результаты могут быть использованы для интерпретации спутниковых наблюдений в хвосте магнитосферы Земли. Результаты численных экспериментов с бифурцированными токовыми слоями могут быть использованы при анализе наблюдений токовых слоев в солнечном ветре.

Следует отметить некоторые недостатки и неточности диссертационной работы:

1. В разделах 2.1 и 3.1 автор указывает, что моделируется процесс антипараллельного пересоединения типичного для токового слоя магнитосферного хвоста. Однако, в других местах, в частности, в заключении к главе 3 (стр.54) автор пишет, что «…рассмотрена кинетическая модель антисимметричного пересоединения…». При антисимметричном пересоединении параметры плазмы и магнитного поля различны

на противоположных сторонах относительно плоскости токового слоя. Если автор использовал конфигурацию, типичную для хвоста, то пересоединение там симметричное.

2. Численное моделирование не самосогласованное. Как учет самосогласованности повлиял бы на ваши результаты?

3. В разделе 2.4 автор, описывая функцию распределения ионов, полученную в точке B (рис.6е) отождествляет встречные пучки, движущиеся в направлении перпендикулярно к плоскости токового слоя (вдоль оси Y) со встречными пучками «нередко наблюдаемыми на границе плазменного слоя (в PSBL)», ссылаясь на работу Hoshino et al., 1998. Однако, в той работе было показано, было показано, что в PSBL наблюдаются ускоренные пучки, движущиеся в одном направлении вдоль магнитного поля (вдоль X). Встречные пучки в функции распределения наблюдались внутри плазменного слоя, но никак не на его границе. Что касается встречных пучков в PSBL, то их появление объяснялось отражением пучков, движущихся из хвоста, в сильном магнитном поле вблизи Земли (см. например, Takahashi and Hones, 1988).

4. В диссертации отсутствует ряд важных ссылок. Так, обсуждая особенности кинетической динамики ионов в области слабых магнитных полей в токовом слое, автор не ссылается на многочисленные работы российских теоретиков В.П. Шабанского, Л.М. Зеленого и их со-авторов, в которых были исследованы кинетические особенности динамики ионов при их взаимодействии с тонким токовом слоем. В частности, в работах:

Buchner J. and Zelenyi L, Deterministic chaos in the dynamics of charged particles near a magnetic field reversal, Phys. Lett., A, 118, 395, 1986

M. Ashour-Abdalla, L.M. Zelenyi et al., “Consequences of magnetotail ion dynamics”, J. Geophys. Res., 99, A8, p.14,891-14,916, 1994;

было показано, что разделение орбит на захваченные и пролетные определяется характеристиками траектории частицы при пересечении сепаратрисы на влете в токовый слой. Эти работы в диссертации не упоминаются. В этой связи, встает вопрос о том, какие новые эффекты по сравнению с предыдущими исследованиями неадиабатической динамики ионов в тонких токовых слоях, обсуждаются в главах 3 и 4.

Также, в 4-ой главе на стр.65 автор пишет, что «Механизм ускорения частиц в токовом слое с наложенным однородным электрическим полем был впервые предложен в работе С. Каули (1982)…» Однако, такое ускорение было рассмотрено существенно раньше в 1971г в работе В.П. Шабанского и получен точно такой же закон для набора энергии частицей (см. Shabanskii V.P., Some process in magnetosphere, Space Sci. Rev., 12, 299, 1971.

В диссертации содержится ряд опечаток и стилистических ошибок. Некоторые термины, видимо, из-за их перевода с английского языка выглядят, на мой взгляд, странно.

Тем не менее, указанные недостатки не влияют на общую положительную оценку данной работы. Диссертация Зайцева Ивана Владимировича на тему: «Механизмы ускорения тепловых ионов в процессе магнитного пересоединения» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Зайцев Иван Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 01.03.03 – Физика Солнца. Пункт 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Член диссертационного совета
д.ф.-м.н. Григоренко Елена Евгеньевна
внс ИКИ РАН

30.03.2021г.