ОТЗЫВ

председателя 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 специальности 01.03.03 — Физика Солнца.

.

В димссертационной работе И. В. Зайцева на основе численного кинетического моделированияи исследуются физические механизмы ускорения ионов в процессе магнитного пересоединения.

Актуальность темы диссертации связана с тем, что процесс магнитного пересоединения является основным процессом взрывобразного энерговыделения и ускорения частиц в горячей космической плазме, В частности, в земной магнитосфере он контролирует темп поступления энергии из солнечного ветра в магнитосферу и генерацию взрывных явлений в хвосте магнитосферы, порождающих магнитные бури и суббури и влияющих на функционирование важных спутниковых систем разного назначения. Исследования физики пересоединения резко активизировались в последние годы в связи с запуском международного многоспутникового проекта MMS (Magnetospheric Multiscale Mission), позволившего изучать экспериментально очаг пересоединения на электронном масштабе, который является наименьшим масштабом этого принципиально многомасштабного физического процесса.

В обширном потоке исследований сравнительно мало внимания уделялось ионам, Отчасти это было связано с трудностями спутниковых измерений холодной ионной компоненты в разреженной плазме долей хвоста, которые научились преодолевать в последнее десятилетие. Оказалось, что по параметрам (плотность, температура) и составу ионная компонента весьма разнообразна, так что вопрос о влиянии этих изменений на характеристики пересоединения оказался весьма злободневным. Проблема ускорения поступающих ионов систематическим образом до сих пор не была исследована. Данная диссертация отчасти восполняет этот пробел.

Новизна полученных результатов. В ряду существенных новых результатов отметим: 1). Установление слабого роста скорости пересоединения (в полтора раза) при уменьшении (на два порядка) температуры фоновой ионной популяции.

2). Описание ускорения ионов на сепаратрисах, и генерации их анизотропии в зависимости от начальной энергии, скачка потенциала и размера Холловской области

3). Описание ускорение ионов в токовом слое внутри ускоренного потока в выхлопе, приводящее к широкомасштабной продольной анизотропии нагретых ионных пучков.

Достоверность полученных результатов и выводов несомненна, поскольку:

1). Точность собственных суперкомпьютерных расчетов пересоединения подтверждается использованием хорошо известного PIC кода, а также сходством структуры и основных характеристик пересоединения с результатами расчетов другими авторами при сходных параметрах задачи:

2). Результаты исследования детальных (но громоздких) динамических суперкомпьютерных расчетов пересоединения дополняются подробным анализом траекторных расчетов в простых моделях ЭМ поля с характерными для пересоединения величинами, которые позволяют уточнить особенности ионной кинетики и параметрические зависимости интересующих величин.

3) Результаты диссертация представлялась научной общественности .. особо отметим публикацйию в уважаемом журнале Physics of Plasmas в марте 2021г (https://doi.org/10.1063/5.0008118).

Ценность для науки и практики. Работа ценна в двух аспектах. Во-первых, она содержит важную новую информацию о зависимостях интенсивности процесса пересоединения и свойств ионной компоненты выхлопа от начальных параметров ионов, что важно для построения полной модели этого фундаментального процесса, влияющего среди прочего на космическую погоду. Во-вторых, диссертант освоил современный высокотехнологичный суперкомпьютерный кинетический метод моделирование процессов в горячей плазмы, который принципиально важен для развития исследований но в отечественной науке пока встречается в редких случаях.

Работа объемом 160 стр. (на двух языках) состоит из введения, 4 глав и заключения, включает 24 рисунка, список использованных сокращений и обозначений и список литературы из 83 наименований,

Во введении отмечена важная роль процесса пересоединения в космической плазме, Подчеркнута многомасштабность этого процесса, который инициализируется кинетическими процессами на малых электронных масштабах, но в итоге приводит к глобальным последствиям на макромасштабах; которые пока моделировались раздельно (в кинетическом и МГД приближениях, соответственно). Отмечено, что наибольшие затруднения при моделировании пересоединения в настоящее время вызывают сопряжение малого и макромасштабов. Последнее требует проведения суперкомпьютерных расчетов кинетических моделей в системах большого размера, что стало возможным с примененнием суперкомпьютеров. Среди актуальных проблем отмечена недостаточная изученность ускорительных процессов для ионной компоненты, особенно вблизи сепаратрис и в области формирования выхлопа пересоединения, в связи с чем сформуоирована основная цель работы и намечены ее этапы. Здесь же приведены

кратко положения выносимые на защиту; охарактеризованы научная новизна работы, ее научная и практическая значимость, достоверность, личный вклад и апробация работы.

Первая глава имеет общеознакомительный характер Здесь приводятся общие сведения о космической плазме, о МГД и кинетический подходах к ее описанию. Описывается метод макрочастиц (PIC), используемый далее при кинетическом моделировании и важные детали его применения. Введение в проблематику магнитного пересоединения содержится в **главе 2**, В ней сложная структура процесса и наиболее важные соотношения между физическими характеристиками электромагнитного поля и плазмы представлены на материале собственной PIC симуляции пересоединения антипараллельных магнитных полей в случае горячей плазмы. Материал главы 2 представляет методический интерес как пример оригинального введения в кинетическую реализацию пересоединения; особую ценность представляют оригинальные сложные, но хорошо продуманные иллюстрации, облегчающие демонстрацию сложной структуры, роли разных факторов, и особенности изучаемых процессов. Попутно, симуляция для горячей плазмы позволяет не только продемонстрировать апробацию кода на задаче ранее изучавшейся другими авторами, но и служит для сравнительного физического анализа с симуляцией пересоединения в холодной плазме.

Результаты члененного моделирования антипараллельного пересоединения с холодными ионами, изучаются в **главе 3**. Помимо сравнительного анализа PIC симуляций, показавшего существенных различия двух режимов, акцент исследования сделан на ускорении ионов на сепаратрисах, которое является основным поставщиком ионов формирующих выхлоп пересоединения. В случае холодных ионов поступающие частицы приобретают энергии, определяемые скачком потенциала на сепаратрисе, тогда как для горячих ионов пересечение сепаратрисы лишь увеличивает тепловой разброс. Для более детального параметрического исследования используется простая частная модель электромагнитного поля, позволяющая изучить критерий набора энергии ионами рассматривая траектории отдельных тестовых частиц в разных моделях.

С использованием двух кинетических моделей, **в главе 4** рассмотрены ускорение и термализация ионов в экваториальном токовом слое внутри выхлопа пересоединения на больших расстояниях от X-линии. . Во-первых, в качестве аналогии численно исследуется кинетическая версия одномернгой задачи об эволюции произвольного разрыва, ранее подробно рассмотренной в МГД приближении; с ее помощью изучается генерация продольной анизотропии в выхлопе, На мой взгляд, постановка в этой части изложена весьма невнятно. Так, в разделе 4.2 анализ стартует с момента $t = 174\Omega^{-1}$ без какого-либо описания начальной постановки и эволюции предшествовавшей рассматриваемому моменту.

Во второй части главы 4 на основе траекторных расчетов пробных частиц изучается энергизация и формирование анизотропии ионов, пересекающих нейтральную плоскость в выхлопе. Отмечается различие в наборе энергии пролетными и захваченными частицами; показано, что область разворота магнитного поля запирает ионы с большими питч-углами, и эффективно ускоряет продольные частицы, способствуя формированию продольной анизотропии ионов. Демонстрируется роль Холовского электрического поля, способствующего запиранию частиц.

В целом в рецензируемой диссертациии рассматрены малоизученные аспекты актуальной проблемы магнитного пересоединения, касающиеся поведения и ускорения ионной компоненты плазмы Вынесенные на защиту три положения являются новыми результатами, они важны для понимания формирования плазменных струй (выхлопов пересоединения), которые являются основным наблюдаемым крупномасштабным последствием магнитного пересоединения, и которые непосредственно влияют на космическую погоду (например, корональный выбросы на Солнце или струйные течения (BBFs) в магнитосфере). Результаты также будут востребованы для интерпрентации измерений по проекту MMS в хвосте магнитосферы, для которого характерен режим антипараллельного пересоединения. Работа качественная, статьи отражающие основные ее результаты опубликованы в ведущих международных журналах. (Особо отметим публикацию в журнале Physics of. Plasmas в марте 2021г объемистой статьи суммирующей материалы главы 3, в которой диссертант является первым автором).

Несмотря на несомненные достоинства работы, по тексту диссертации можно сделать ряд замечаний: Судя по дате подачи документов (декабрь 2020), диссертант стремился завершить работу в год окончания аспирантуры, Подобное стремление похвально, однако работа носит явные следы спешки с разнообразными ее проявлениями (см.ниже).

1). В русском тексте имеется ряд опечаток, и неудачных выражений, например: «популяции с различной тепловой температурой» (стр.54). Или на стр.42: « Ez и [VxB]z уравнения (15) взаимно компенсируются в широкой области пространства и совпадают на фронтах.» (совпадают по величине?).

=Отмечен ряд неясностей в формулах: В первом уравнении системы (16) на-стр 49 видим m dVx/dt =const; здесь вероятно ускорение равна 0 (или оно должно быть определено); . На стр 16 в формуле для плотности токового слоя стоит n_0 , но ему же равна плотность фона – это описка?

= Присутствуют неточности и пропуски, затрудняющих чтение работы: Так, в соответствующем разделе следовало бы упомянуть метод и детали расчета траекторий пробных ионов, Также, как уже отмечалось, постановка задачи Римана на стр.58 изложена весьма невнятно, без описания начального состояния и пр. На рис 15аб – нет палетки.. В ссылке [82] на работу Власова не указаны выходные данные публикации.

2). Автор не приводит обоснования выбора численных значений модельных полей в приведенных примерах расчетов. Иногда выбор этот можно погнять (By=0.1, Ez=0.1),но не всегда, Для обоснования выбора Bz=0.4 и Ey=1, L=6 (стр.68) следовало бы привести ссылки на экспериментальные работы: читателю важно понимать насколько общи и представительны приводимые численные результаты, или они являются частными случаями с ограниченной применимостью.

3). Жаргон в среде исследователей изобилует сокращениями, которые в публичной работе нужно сводить к минимуму, либо заранее оговаривать (определять) . Хочется обратить внимание автора на эту проблему приведя ряд примеров выражений которые не определены и физически бессмыслены, например: «антипараллельное пересоединение» (с.4 и далее); Альвеновский выхлоп (2.5); «ларморовское электрическое поле» (с.35); «конвективное электрическое поле −[V i ×B]» (рис 13,с 43)

4) Работа выиграла бы, если бы автор заключил ее кратким обсуждением приложений полученных результатов и указал бы специфические предсказания теоретической модели, которые могли бы быть проверены в магнитосферном спутниковом эксперименте.

Сделанные замечания не умаляют значения и не снижают общей хорошей оценки работы. В целом, матертал диссертации позволяет охарактеризовать диссертанта/\как хорошо подготовленного и перспективного исследователя. За недолгое время аспирантуры И. В. Зайцев освоил сложную проблематику кинетических моделей пересоединения и изучил современный высокотехнологичный метод исследования, суперкомпьютерное кинетическое моделирование процессов в токовых слоях горячей плазмы,

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 специальности 01.03.03 — Физика Солнца. Пункт 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Председатель диссертационного совета

Доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры физики Земли Физического факультета СПбГУ

Сергеев Виктор Андреевич

02.04.2021