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 специальности 01.03.03 — Физика Солнца.

Процесс пересоединения магнитных силовых линий в плазме сопровождает топологическую эволюцию многих сложных систем, а последствия этого процесса исследователи наблюдают в выбросах гигантских облаков солнечного вещества, пронизанного магнитным полем, в свечении верхних слоев атмосфер на планетах с магнитосферой и других явлениях. Понимание данного процесса, среди прочего, проливает свет на проблему фундаментальной физики о нагреве солнечной короны. Одна из теорий предполагает, что нагрев происходит посредством волн Альвена, распространяющихся из недр звезды в ее атмосферу. Эти волны определенной частоты закручивают заряженные частицы и резко нагревают плазму в узком слое. Другая теория, развитая Юджином Паркером, объясняет нагрев взрывами, а именно нановспышками, в которых, как и в их более крупных аналогах, напряжение, созданное турбулентными течениями, разрушается локальной неустойчивостью, провоцирующей процесс пересоединения. Заметим, что эти два подхода не обязательно исключают друг друга, ведь пересоединение, тоже запускает альвеновские волны, которые затем могут нагревать плазму. Для исследования процессов нагрева и ускорения солнечной плазмы недавно были запущены миссии Parker Solar Probe и Solar Orbiter. Востребованность всестороннего теоретического описания процесса пересоединения гарантирует выполнение требования об **актуальности, значимости и новизны** защищаемой диссертации.

Представленная работа посвящена исследованию тонкой структуры процесса пересоединения, включающего горячую и холодную ионные популяции, а также нагрев ионов вдали от x-линии. Задачи определения критериев эффективного ускорения ионов теплового распределения на сепаратрисах и в области смены знака пересоединяющегося магнитного поля решаются с использованием метода частиц в ячейке (Particles-In-Cell). Такое кинетическое моделирование плазмы получает все более широкое применение для решения сложных задач, где требуются уверенные навыки программирования и обработки данных моделирования.

Вторая глава диссертации посвящена апробации кода для случая горячих ионов. Представлены два способа оценки скорости пересоединения. Численно показано, что транспорт потока вектора Пойнтинга происходит преимущественно на сепаратрисах. Захват и ускорение электронов определены через анизотропию электронного давления, а их модельная функция распределения в окрестности диффузионной области согласуется со спутниковыми наблюдениями. Распределение ионов внутри области ускоренного потока показало наличие встречных ионных пучков, что также подтверждается измерениями в магнитосфере и солнечном ветре. Посредством разного масштаба размагничивания ионов и электронов, воспроизведен эффект Холла, дополнительно разгоняющий ионы в ионной диффузной области и на сепаратрисах.

Отмечу, что было сложно отследить что происходит во внутренней электронной диффузионной области (в частности вывод о том, что электрическое поле пересоединения в этой области балансируется негиротропной частью дивергентции тензора электронного давления, стр. 29), так как ее ширина очень мала $|x-x_0|<0,2$.

Следующая глава посвящена исследованию холодной популяции ионов и ее влиянию на эффективность пересоединения в присутствие эффекта Холла. Показано, что в присутствии холодных ионов (температура ионов токового слоя стократно превышает температуру ионов фона) скорость пересоединения в квазистационарной фазе выше в 1,5 раза, чем в симуляции с горячими ионами (температуры токового слоя и фона равны). Причина в понижении параллельной температуры выхлопа. Также наблюдается уменьшение электронной диффузионной области, что тоже может являться одной из причин увеличения эффективности пересоединения. Здесь (стр. 41) при описании вкладов разных членов уравнения движения многие эффекты зависят от ионной инерционной длины. Предположу, что в расчетах данная величина равна единице (например, рис. 12). Показано, что дрейф ионов в z-направлении в симуляции с холодными ионами выражен сильнее, чем с горячими ионами. Наблюдается ускорение ионов на сепаратрисе, которое определяется разностью потенциалов в этой области, а на удаленных сепаратрисах холодные ионы замагничены. Показано, что характер поведения иона, пересекающего сепаратрису, зависит от теплового гирорадиуса.

Четвертая глава посвящена исследованию механизма генерации продольной анизотропии в выхлопе пересоединения. Рассмотрены случаи бифуркации токового слоя без ведущего поля и в его присутствии. Выполнены симуляции динамики тепловой популяции ионов в области смены знака магнитного поля. Показано, что частицы с большими питч-углами попадают в ловушку.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и списка литературы (83 наименования). Общий объем диссертации составляет 83 страниц на русском языке и 77 страниц – англоязычная копия. Из замечаний по оформлению отмечу, что не все величины в формулах описаны, также иногда нарушен порядок описания графиков, качество растровых изображений иногда заставляло глаза напрягаться, чтобы разобрать обозначения. По материалам диссертационной работы автор представил 2 статьи, индексируемые Web of Science и Scopus. Работа прошла апробацию на международных конференциях.

Считаю, что диссертант представил аккуратно выполненную работу со сложными расчётами, результаты и заключение диссертации являются обоснованными. Отмечу перспективность и научную значимость 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 специальности 01.03.03 — Физика Солнца. Пункт 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Член диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук, доцент Золотова Н.В.

27.03.2021