

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Шустова Павла Игоревича «Магнитные дыры в хвосте магнитосферы Земли», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – физика космоса, астрономия.

Диссертационная работа П.И. Шустова посвящена исследованию субионных магнитных дыр, которые появляются в области ближнего хвоста магнитосферы Земли после прохождения там фронта диполизации. Такие фронты образуются во время динамических процессов в хвосте магнитосферы, в частности, во время взрывной фазы магнитосферной суббури. Возможность детального исследования субионных магнитных дыр появилась относительно недавно благодаря запуску спутниковых миссий THEMIS и MMS, аппараты которых несут соответствующие приборы с достаточно высокой частотой опроса. Субионные магнитные дыры представляют собой относительно долго живущие уединенные мелкомасштабные неоднородные магнитоплазменные структуры, которые могут влиять на прохождение электромагнитных и магнитоплазменных волн, а также влиять на потоки высыпающихся частиц и структуру полярных сияний, поэтому исследованиям магнитных дыр посвящено значительное число научных работ. Таким образом, актуальность темы диссертации не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения четырех глав, заключения, приложения и списка литературы. Во **введении** изложена история обнаружения магнитных дыр в различных областях космической плазмы, обсуждаются классификация магнитных дыр по пространственному масштабу и токнесущей компоненте, а также описываются известные данные и физические представления для различных типов дыр. Кроме того, обоснована актуальность темы, изложены цели работы, обсуждена её научная новизна, а также практическая значимость полученных результатов.

В **главе I** проводится анализ данных спутниковых измерений миссии THEMIS, в которых обнаруживались субионные магнитные дыры. Получен и систематизирован наиболее полный набор данных по обнаруженным субионным магнитным дырам, а также анализируются характерные параметры плазмы с обеих сторон фронта диполизации и характерные параметры субионных магнитных дыр. Выявлено, что в субионных магнитных дырах дополнительно к фоновой популяции электронов имеется более разреженная популяция в разы или на порядок более горячих электронов с анизотропной температурой, причем их ортогональная магнитному полю температура превышает продольную. Также обнаружен дрейф магнитных дыр относительно фоновой плазмы и проводятся оценки возможных механизмов образования магнитных дыр.

Кроме того, рассматриваются результаты проведенного зарубежными учеными пространственно 3-мерного численного моделирования прохождения фронта диполизации с помощью программного кода, основанного на численном решении системы Власова-Максвелла методом крупных частиц для модельной плазмы с более тяжелыми модельными электронами. В результатах расчетов обнаружено развитие

перестановочной неустойчивости на фронте диполизации и образование за фронтом структур с электронными вихрями и пониженным магнитным полем, которые соответствуют магнитным дырам.

В главе II изучаются возможные механизмы образования субионных магнитных дыр на фронте диполизации. Рассматриваются линейные волновые плазменные колебания в плазме за фронтом диполизации, нелинейная стадия которых может приводить к образованию субионных магнитных дыр. Линейный анализ проводится в рамках системы уравнений многокомпонентной магнитной гидродинамики с изотропным давлением компонент. Получено дисперсионное уравнение, которое является достаточно сложным и не имеет аналитических решений, и поэтому исследуется численно. Показано, что наиболее подходящим кандидатом является электронная магнитозвуковая мода в трехкомпонентной плазме, содержащей одну компоненту ионов и две компоненты электронов с различными температурами. Такая мода распространяется почти ортогонально магнитному полю.

Глава III посвящена приближенным стационарным аналитическим моделям субионных магнитных дыр. В первой части главы рассматриваются приближенные стационарные пространственно одномерные решения системы Власова-Максвелла в цилиндрических координатах. Для выведенных в декартовых координатах точных стационарных пространственно одномерных решения Харриса (с изотропным давлением) и решения Николсона (с анизотропным давлением) получены приближенные аналоги в цилиндрических координатах. При этом основную сложность для получения пространственно одномерного аналитического решения в цилиндрических координатах представляет появление разделения заряда и ненулевого скалярного потенциала, которые отсутствуют в плоских одномерных токовых слоях Харриса и Николсона. Для решения этой проблемы автор успешно применяет недавно предложенный подход замены уравнения Пуассона приближенным дифференциальным уравнением для скалярного потенциала, которое получают из условия квазинейтральности.

Во второй части главы рассматриваются приближенное пространственно трехмерное решение уравнений одножидкостной магнитной гидродинамики, которое имеет форму начального приближения в асимптотическом разложении решения по двум малым параметрам, в качестве которых рассматривается отношение продольного размера магнитной дыры к наибольшему поперечному размеру и отношение меньшего поперечного размера к большему. Приводятся оценки масштабов и характерных параметров магнитных дыр по полученным приближенным моделям и устанавливается, что они, в целом, соответствуют данным измерений.

В главе IV рассматриваются вопросы связи между субионными магнитными дырами и мелкомасштабной структурой полярных сияний. Детально анализируется событие 17.02.2010 года. Установлены схожесть данных пространственно-временных характеристик магнитных дыр и мелкомасштабных структур в полярных сияниях, а также соответствие направлений и величины скоростей их дрейфа, что подтверждает, что

магнитные дыры действительно могут являться источниками мелкомасштабных полярных сияний.

Следует отметить хороший научный замысел диссертации и ее высокий научный уровень, поскольку для исследования вопроса на хорошем уровне используются несколько методов исследования: анализ данных спутниковых и наземных измерений, анализ результатов численного моделирования, а также несколько теоретических методик, которые применяются как для линейного анализа развития образующих магнитные дыры возмущений, так и для получения описывающих магнитные дыры приближенных стационарных решений. Автор диссертации, являясь очным аспирантом, за ограниченное время успел освоить несколько перечисленных выше методов научного исследования и успешно применить их на практике, проделав при этом большой объем работы.

Вместе с тем, диссертация имеет ряд недостатков, которые, как правило, присущи диссертациям очных аспирантов из-за ограниченности времени на выполнение исследований и подготовку диссертации.

В качестве первого и основного замечания следует указать опечатку в формулировке 2-го выносимого на защиту результата, которая имеет вид «Разработаны двумерные кинетические и трехмерная магнитогидродинамическая модели магнитных дыр субионного масштаба, в рамках которых установлены ограничения на параметры данных нелинейных плазменных структур». Но в главе III получены пространственно одномерные кинетические модели, что правильно указано в содержании диссертации и в других местах введения. То есть нужно было написать «Разработаны пространственно одномерные кинетические модели ...».

В качестве второго замечания следует отметить недостаточно детальное изложение в главе III получения приближенных стационарных пространственно одномерных кинетических моделей. Для более понятного изложения этого относительно нового подхода было бы желательно во введении главы III изложить общую логическую схему получения системы уравнений для приближенного решения и четко перечислить ее в одном месте. Также было бы желательно обсудить основные сложности, которые возникают при обобщении пространственно одномерных точных стационарных решений в виде токового слоя Харриса и токового слоя Николсона в декартовых координатах на случай приближенного решения в цилиндрических координатах.

Однако эти замечания касаются формулировок и методики изложения, и не влияют на общую положительную оценку работы и достоверность полученных результатов. Они вполне извинительны ввиду сложности рассматриваемых вопросов и разнообразия используемых в диссертации методов исследования.

Диссертация представляет собой законченное актуальное для физики космической плазмы научное исследование, в результате которого получено обоснованное физическое представление о субионных магнитных дырах как о локальных электронном вихрях, которые образованы более горячей популяцией токонесущих электронов, а также

выяснена роль субионных магнитных дыр в мелкомасштабной структуре полярных сияний во время взрывной фазы суббури. Диссертация создает хороший научный задел для дальнейших актуальных исследований магнитных дыр и мелкомасштабных структур в полярных сияниях как по данным измерений, так и с помощью теоретических подходов, а также с помощью численного моделирования.

Автореферат и диссертация написаны достаточно ясно, с хорошим качеством текста, а также с четкой логической структурой и обозначением текущего уровня в рассматриваемых проблемах и новизны результатов. Количество опечаток мало, они очевидны и не влияют на правильное понимание текста. Выносимые на защиту результаты хорошо обоснованы, а их достоверность не вызывает сомнений. Автореферат отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и ее автор Павел Игоревич Шустов заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1 – физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент

Мингалев Олег Викторович,

доктор физико-математических наук

по специальности «01.03.03 – физика Солнца»,

ведущий научный сотрудник и заведующий сектором

ФГБНУ «Полярный геофизический институт»

30.09.2024

Мингалев О.В.

Контактные данные:

Адрес: 184209 Мурманская обл., г. Апатиты,

ул. Академгородок, д. 26а, ПГИ

Телефон: +7 921 172 02 38

E-mail: mingalev_o@pgia.ru

Подпись д.ф.-м.н. О.В. Мингалева заверяю.

Ученый секретарь

Полярного геофизического института

Попова Т.А.

