

## Отзыв

официального оппонента  
на диссертацию Баркова Максима Владимировича  
"Магнитогидродинамические течения в релятивистских объектах",  
представленную на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности 01.03.02 --- Астрофизика и звездная астрономия.

Диссертация Баркова М.В. посвящена исследованию релятивистских течений плазмы в присутствии магнитного поля в окрестности астрофизических объектов. Распространенной чертой таких течений является формирование струйных выбросов (джетов) - коллимированных течений, распространяющихся на большие расстояния во много раз превышающие размеры породивших их системы.

Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что несмотря на многочисленные исследования природа многих астрофизических явлений остается не проясненной, в частности, механизмы формирования, коллимации и распространения на гигантские расстояния релятивистских струй плазмы. Предполагается, что ключевую роль в этих процессах играет магнитное поле. Задачи такого рода даже в усеченных постановках чрезвычайно сложны и на сегодняшний день продвижение в их исследовании в большой мере связывается с технологией, называемой «вычислительным экспериментом». Вычислительная сложность решаемых в диссертации задач приводит к необходимости использования вычислительных комплексов с параллельной архитектурой и параллельной реализации вычислительных алгоритмов. Автором использован подход, основанный на MPI-технологии, что позволило провести расчеты релятивистских МГД-течений на «рекордных» пространственных масштабах. Данная диссертация является большим шагом в направлении численного моделирования релятивистских МГД-течений и прояснения на его основе указанных выше астрофизических проблем. Научная новизна и значимость этой работы не вызывают сомнений.

В диссертации автор развивает несколько основных направлений, каждое из которых связано с том или иной моделью общей проблемы – образованию, распространению и коллимации релятивистских джетов. Рассмотрение проблемы проводится как в рамках специальной, так и общей теории относительности. Основным инструментом исследования является численное моделирование. В представленной работе рассматриваются только

осесимметричные постановки задач релятивистской МГД. Даже в таком виде решаемые в диссертации задачи требуют больших (если не сказать огромных) вычислительных ресурсов. Это связано с тем, что процессы, приводящие к образованию и коллимации джетов, разворачиваются на существенно различных пространственно-временных масштабах, которые следует аккуратно разрешать для адекватного численного моделирования всего течения. Автором предложен нестандартный вычислительный прием, который позволил многократно сократить время расчетов и достичь, таким образом, возможности проводить массовые расчеты, варьируя параметры модели, и делать физические выводы, аргументируя их результатами численного моделирования. Конечно, такая аргументация не является окончательной хотя бы потому, что в рассмотренных моделях предполагается осевая симметрия, а учет пространственно трехмерных возмущений может привести к существенной корректировке результатов и выводов. Тем не менее, выполненная автором работа является существенным продвижением в направлении исследования и объяснения ряда астрономических феноменов.

Работа состоит из введения, обзора литературы, трех глав, заключения и четырех приложений. Во введении сформулированы цели работы, обоснована ее актуальность, новизна, теоретическая и практическая ценность.

Содержательной части диссертации предшествует подробный обзор литературы по соответствующей тематике. Список литературы содержит 361 наименование, что свидетельствует о тщательной проработке автором темы своего исследования.

Первая глава диссертации посвящена магнитному ускорению джетов. Кроме того, она носит общий характер. Здесь формулируются уравнения общерелятивистской МГД без конкретизации используемой в дальнейшем метрики. Уравнение баланса энергии заменяется условием адиабатичности (более того, политропичности) течения. С одной стороны такая модификация уравнений исключает возможность аккуратного описания ударных волн, с другой стороны - позволяет избежать существенных вычислительных проблем в ситуациях, когда ударные волны не образуются или их роль не значительна. Приводятся интегралы стационарных течений (величин, сохраняющихся вдоль линий тока), которые затем используются для контроля точности численного интегрирования уравнений релятивистской МГД. Для численного интегрирования уравнений использовался вычислительный алгоритм гудоновского типа на криволинейной (в полоидальной плоскости) расчетной сетке. Выбор сетки был обусловлен формой расчетной области, которая представляла собой некоторый расширяющийся канал. Такая форма расчетной области позволила исключить из рассмотрения не интересные для данной задачи части пространства, выполняющие роль

некоторого резервуара, в котором распространяется джет. Формулируются граничные и начальные условия. В этой главе предложен алгоритм поэтапного расширения расчетной области, позволивший проводить численное моделирование стационарных релятивистских течений в больших по сравнению с их источником областях за приемлемое компьютерное время. Используя разработанную вычислительную технологию, автору удалось выполнить серию расчетов струйных выбросов из активных галактических ядер, варьируя профиль и скорость вращения центральной черной дыры. Проанализировано влияние формы границы расчетной области на эффективность ускорения плазмы и установлено, что это влияние существенно. В результате проведенных расчетов установлено, что магнитный механизм ускорения релятивистской плазмы может быть весьма эффективным. В ряде вариантов итоговый Лоренц-фактор течения достигал значений 100 и выше. При этом происходила эффективная перекачка энергии из электромагнитной компоненты в кинетическую. Выделены три характерных режима течения и рассмотрена эффективность ускорения плазмы для каждого из этих режимов. Проведено сравнение течений изначально холодной и горячей плазмы. Численные решения, полученные в безразмерном виде, были применены для анализа струйных выбросов из активных галактических ядер и гамма-всплесков. Обсуждаются различные механизмы коллимации релятивистской струи. Рассматриваются полуаналитические решения, построенные на основе и с использованием результатов численного моделирования.

Вторая глава диссертации посвящена моделям магниторотационных взрывов гиперновых и гамма-всплесков. Изучалось влияние, которое может оказать рождение протонейтронной звезды с сверхсильным магнитным полем на развитие отложенного взрыва сверхновой. Проведены серии расчетов, в которых варьировались параметры модели. Оказалось, что взрывы, полученные в результате моделирования, вызываются не магнитным полем, а тепловой энергией, «запасенной» в начальных данных задачи. В расчетах, названных автором «удачными взрывами», формируются струйные выбросы от центрального объекта – протонейтронной звезды, которые «прожигают» звезду-прародителя (точнее то, что от нее осталось) и выходят в окружающее пространство. На основании анализа полученных результатов высказывается предположение, что некоторые длинные гамма-всплески могут обусловлены указанными процессами.

Третья глава диссертации посвящена исследованию роли механизма Бленфорда-Знаека в генерации гамма-всплесков. Принимается, что гамма-всплески могут возникать при коллапсе звездного ядра на черную дыру в присутствии упорядоченного внешнего магнитного поля. На основании качественных соображений предложен критерий запуска механизма Бленфорда-Знаека, связывающий величину магнитного потока через полусферу

горизонта черной дыры и темп аккреции на нее. Численное моделирование, проводимое в данной главе, направлено на подтверждение или опровержение (лучше сказать, установление ограничений) предложенного критерия. Предполагалось, что при некотором значении безразмерного параметра, составленного из указанных величин, произойдет качественное изменение – бифуркация решения. Это изменение связано, как ожидает автор, с включением механизма Бленфорда-Знаека и формированием биполярного истечения. При проведении расчетов в основном варьировались скорость вращения черной дыры и темп аккреции. Также рассматривались различные конфигурации начального магнитного поля: однородная и дипольная. По сравнению с предыдущими главами учитывалась довольно подробная микрофизика. Численное моделирование подтвердило ожидания автора и приближенную справедливость выдвинутого им критерия запуска механизма Бленфорда-Знаека. Установлено также, что если аккрецирующее вещество имеет достаточный момент вращения, чтобы не упасть на черную дыру, а образовать аккреционный диск, то предложенный критерий должен быть пересмотрен. На основе полученных численных результатов построена полуаналитическая теория рассматриваемых процессов.

В заключении приводятся положения, выносимые на защиту.

В приложения вынесен вывод некоторых формул и соотношений.

Работа несвободна от недостатков.

1. В представленной работе основным инструментом исследования астрофизических процессов и релятивистских МГД-течений является численное моделирование – вычислительный эксперимент. Однако методы численного интегрирования соответствующих уравнений описаны очень скупо. В частности, не затронут вопрос о сохранении бездивергентности магнитного поля в численной модели. Автор отсылает читателей за подробностями к статьям, но было бы уместно уделить этой стороне работы некоторое место в тексте самой диссертации.

2. На мой взгляд изложение материала в некоторых местах носит излишне конспективный характер. Некоторые формулировки в тексте диссертации тяжеловесны, не всегда понятно, что автор имеет в виду. В тексте довольно много опечаток. Имеются также неточности, не имеющие, впрочем, большого значения.

3. Несмотря на обширный список литературы в нем нет ни одной русскоязычной ссылки. В частности, на монографию В.С.Бескина «Осесимметричные стационарные течения в

астрофизике», М.:ФИЗМАТЛИТ, 2005. Нет ссылки и на ее английский перевод: V.S.Beskin, MHD Flows in Compact Astrophysical Objects: Accretion, Winds and Jets. Berlin, Springer,2010.

Указанные недостатки не умаляют качества работы, которую можно охарактеризовать как законченное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Автором получены новые и интересные результаты, которые имеют несомненную научную ценность и могут найти широкое применение в современной астрофизике.

Все результаты диссертации опубликованы в высоко рейтинговых научных изданиях и прошли апробацию на международных конференциях.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК России к диссертациям, представляемым на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 --- Астрофизика и звездная астрономия, а ее автор, Барков Максим Владимирович, заслуживает присуждения искомой степени.

Официальный оппонент

Колдоба Александр Васильевич

ведущий научный сотрудник - заведующий лабораторией флюидодинамики и сейсмоакустики Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), д.ф.-м.н.

141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

тел.: +7 (495) 408-45-54

эл. адрес: info@mipt.ru

Подпись заведующий лабораторией флюидодинамики и сейсмоакустики МФТИ (ГИУ)  
удостоверяю

Ученый секретарь МФТИ (ГИУ)

к.ф.-м.н.



Ю.И.Скалько