

## ОТЗЫВ

официального оппонента Бескина Василия Семеновича, доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника Отделения теоретической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н.Лебедева Российской академии наук

на диссертацию **МАКСИМА ВЛАДИМИРОВАЧА БАРКОВА**

**"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 компактных астрофизических объектов. Распространенной чертой таких течений является формирование струйных выбросов (джетов) – сколламированных течений, распространяющихся на расстояния, во много раз превышающие размеры породивших их «центральной машины». Актуальность темы диссертации обусловлена тем, что как природа запуска таких течений, так и их удивительная устойчивость пока не нашли своего полного объяснения. Тем не менее, в настоящее время достаточно хорошо установленным фактом является то, что основную роль во всех подобных объектах играют магнитогидродинамические процессы. Поэтому численное моделирование подобных течений является вполне адекватным и необходимым направлением исследований.

Диссертационная работа М.В.Баркова состоит из введения, обзора литературы, трех глав, заключения и четырех приложений. Общий объем диссертации состоит из 292 страниц. Во **Введении** сформулированы цели работы, обоснована ее актуальность, новизна, теоретическая и практическая ценность. Здесь же содержится глубокий обзор основных результатов, полученных в этой области (список литературы включает 361 наименование), что свидетельствует о тщательной проработке автором темы своего исследования.

**Первая глава** диссертации посвящена проблеме магнитного ускорения релятивистских струйных выбросов, более точно – вопросу возможности численного моделирования коллимации и ускорения плазмы. Конкретно, использовалась численная схема 3-го порядка точности по пространству и второй порядок по времени. Показано, что используемая процедура решения задачи Римана с низкой вязкостью позволяет разрешать мелкие детали в решении. Код был эффективно распараллелен с использованием технологии МПАй, что позволило использовать его на суперкомпьютерах.

**Вторая глава** диссертации посвящена моделям магниторотационных взрывов гиперновых и гамма-всплесков. Здесь было проведено первое МГД-моделирование магнито-ротационной модели гамма-всплесков в общей теории относительности с использованием точного уравнения состояния, нейтринного охлаждения и сферически симметричный нейтринный нагрева.

**Третья глава** диссертации посвящена моделированию гамма-всплесков в рамках коллапсарной модели. Здесь впервые сформулирован критерий для активации механизма Блэндфорда-Знаека. Обнаружена возможность образования односторонних выбросов. Найдена оценка параметра вращения черной дыры и ее массы при коллапсе ядра массивной звезды. В **заключении** приводятся положения, выносимые на защиту. Наконец, в приложении представлены выводы некоторых соотношений.

Я считаю, что диссертация М.В.Баркова является реальным шагом вперед 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. При этом важно, что автор рассматривает широкий круг астрофизических объектов с единых позиций. Так, например, в первой главе исследовались гладкие решения без ударных волн, что позволило использовать политропное уравнение состояния и не решать гидродинамические уравнения для расчета газового давления. При этом выбор эллиптических координат и точный учет граничных условий на оси вращения (Ахиллесова пята всех предыдущих расчетов!) позволил добиться рекордных Лорентц-факторов частиц и минимизировать негативное влияние численной вязкости. Во Второй Главе впервые начало численного моделирования соответствовало реальному случаю сферической аккреции, а не достаточно искусственному случаю заранее приготовленного тора. Последнее позволило автору «поймать» эффект бифуркации решения (эффект включения или активации БЗ). Кроме того, использовались "состаренные" начальные условия, что позволило сохранить вычислительные ресурсы и не тратить их на этапе, предшествующем формированию аккреционного диска. Наконец, в Главах 2 и 3 использовался различный шаг по времени в зонах (кольцах) с различным разрешением, что позволило ускорить расчет в 5-7 раз.

С другой стороны, можно отметить и ряд недостатков:

1. В Первой Главе использовалось течение с заданными жесткими стенками. Такой подход был действительно прорывным лет десять назад, однако в настоящее время он несколько устарел. Во всяком случае, в рассматриваемой схеме не удастся в полной мере учесть роль

газового давления – автор говорит о сжатии магнитных поверхностей. С другой стороны, согласие с аналитическими результатами (например, не отмеченное автором полное подобие Рис. 1.7 из диссертации и Рис. 4.3, стр. 278 из монографии V.S.Beskin, *MHD Flow in Compact Astrophysical Objects*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2010) показывает, что внутренняя структура релятивистских струйных выбросов слабо зависит от условий на самой внешней границе: более существенным оказывается поперечный размер джета.

2. На стр. 48 не объясняется выбор различных коэффициентов для двух различных задач, рассматриваемых в диссертации.

3. Мне кажется физически неточной интерпретация, что ускорение истекающей плазмы связано с действием силы Ампера. Во-первых, в ультрарелятивистском случае к этой силе нужно добавить электрическую силу, которая почти полностью нейтрализует силу Ампера. Во-вторых, эта сила не направлена вдоль скорости движения плазмы. Однако эта сила направлена перпендикулярно эквипотенциальным поверхностям, что приводит к движению в этом направлении, и, в итоге, заставляет частицы приобретать энергию.

4. Рассуждение на стр. 94 также не вполне понятно. Существование области, где «электрическая сила, направленная к оси, доминирует над магнитной силой» означало бы, что электрическое поле больше магнитного, т.е. само МГД приближение становится неприменимым. Ответ на этот вопрос был получен в работе S.V.Bogovalov, K.Tsinganos, *MNRAS*, **305**, 211–224 (1999), в которой было показано, что на большом расстоянии от оси возникает область с нулевым продольным током.

5. Неверным является утверждение на стр. 95 о том, что «формирование цилиндрического ядра является единственным способом избежать бесконечных токов вблизи оси». Как было показано в работе В.С.Бескина и Л.М.Малышкина, *ПАЖ*, **26**, 253 (2000), появление бесконечного тока в упомянутой работе [94] было связано с потерей одного из лидирующих членов в уравнении баланса сил; гладкое решение существует и при однородном полоидальном магнитном поле (этот случай, кстати, также воспроизведен в диссертации автора, см. верхнюю кривую на Рис. 1.19).

6. Формула (1.34) была получена задолго до работ [326-327], указанных в диссертации автором.

7. И, наконец, по поводу оформления. Не все формулировки диссертации выглядят достаточно четко. Например, на стр. 6 написано «Впервые сформулирован и получен критерий»... Это явное повторение. Автор пишет то лоренц-фактор, то Лорентц-фактор, или то Бландфорд-Знаек, то Блэндфорд-Знаек. На стр. 54 приведена ссылка на Рис. 1.14, тогда как Рис. 1.1 появляется лишь на следующей странице. И далее нумерация рисунков не соответствует их появлению в тексте. Не все формулы пронумерованы.

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.

Таким образом, диссертация М.В.Баркова “Магнитогидродинамические течения в релятивистских объектах” удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым п. 7 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК России, а ее автор Барков Максим Владимирович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

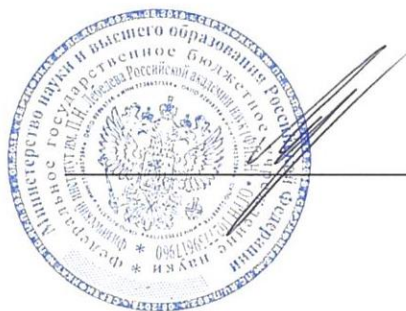
Официальный оппонент – доктор физико-математических наук В.С.Бескин, ведущий научный сотрудник Отделения Теоретической Физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н.Лебедева Российской академии наук.

  
\_\_\_\_\_ (В.С.Бескин)

Подпись руки В.С.Бескина заверяю.

Ученый секретарь ФИАН

к.ф.-м.н.

  
\_\_\_\_\_ (А.В.Колобов)

Контактные данные

Email: beskin@lpi.ru

Адрес места работы: 119991, Москва, Ленинский просп. 53

тел. (+7) 499-132-6595

6 сентября 2019 года