

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Баркова Максима Владимировича, ведущего научного сотрудника отдела Физики и Эволюции Звезд ИНАСАН, на диссертационную работу Елены Евгеньены Нохриной, представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 - “астрофизика и звёздная астрономия” на тему “Методы оценки физических параметров релятивистских струйных выбросов из активных ядер галактик на основе аналитического моделирования и наблюдений”.

Работа посвящена изучению релятивистских струйных выбросов из активных ядер галактик. Работа состоит из введения и четырех глав.

В первой главе используется эффект видимого сдвига ядра при наблюдениях на различных частотах для определения параметров джетов из активных ядер галактик. Найдены параметры джетов для почти 100 источников. Показана предпочтительность магнитной модели на фазе насыщения. Более того, показана существенная загрузка течения парами. Дополнительно, в конце главы проводится одномерное цилиндрическое исследование джетов на причинную связность, полученные результаты хорошо согласуются с 2D осесимметричными МГД симуляциями.

Во второй главе на основании измеренных экстремальных яркостных температур оцениваются в выбросах параметры плазмы. Автор использует современные представления о структуре магнитных джетов, что позволяет получить параметры плазмы в струе. Использование неоднородной модели джета позволяет получить более близкие значения магнитных полей в джетах, которые необходимы для объяснения потоков излучения в жестком гамма диапазоне.

В третьей главе рассматривается влияние нагружения массой на динамику джетов. В начале упоминаются механизмы торможения джетов, но был опущен один из самых эффективных, загрузка ветром от звезд в джете (см. к примеру Комиссаров 1994, [10.1093/mnras/269.2.394](https://doi.org/10.1093/mnras/269.2.394)). Автор впервые детально рассмотрел эволюцию пар при нагрузке струи и влияние эффекта нагрузки на электрическое и магнитное поле. Были получены асимптотические решения при низких значениях загрузки. Это исследование существенно прояснило картину эффекта загрузки электромагнитного джета.

В четвертой главе по наблюдаемому излому в форме джетов определяются их физические параметры. Эту главу можно считать основной во всей диссертационной работе, как по научной значимости, так и по объему. Автор решает аналитически уравнения Грэда-Шафранова и Бернулли с разумными упрощениями. Было показано, что при переходе от сильно-замагниченного решения к слабо-замагниченному профиль внешнего давления

меняется с 3.5 на 2.4, это позволяет в случае аккреции Бонди получить параболическую форму во внутренних областях джетов и коническую во внешних. Теоретическая форма джетов отлично воспроизводит данные наблюдений. В разделе 4.2 автор предлагает и реализует новый метод, основанный на измерении положения излома профиля струи, который позволяет определять фундаментальные параметры черной дыры, такие как параметр вращения и массу. Предложенный метод является новым и перспективным инструментом для исследования АЯГ. Метод позволяет напрямую связать световой цилиндр, фактор Лоренца и точку излома в форме джета. Кроме того, получается прямая связь положения точки излома с магнитным потоком/мощностью джета и давлением межзвездного газа на радиусе излома. Новые выявленные связи можно использовать как для исследования свойств СМЧД так и газа в материнских галактиках.

Работа содержит неточности и спорные моменты, к примеру:

В Главе 1 используется параметр эффективности ускорения  $\xi=0.01$  (взят из результатов PIC симуляций), при ускорении частиц в остатках сверхновых эта эффективность может достигать значений на порядок больше. Из работы не ясно, как изменятся результаты при больших значениях параметра  $\xi$ .

В разделе 1.3 не дано физическое обоснование выбора величины  $\gamma_{\min}$ .

В целом, с учетом представленных выше вопросов, приведенные значения в разделе 1.4 можно считать верхними оценками для множественности и нижними для магнетизации. Автору стоило бы построить не только гистограммы распределения, но и зависимости проекционных скоростей от оцененных замагниченостей, что позволило бы сделать более строгие выводы о качестве полученных результатов.

На странице 56 делается противоречивое утверждение, что параметр множественности находится в хорошем согласии с моделью рождения пар в магнитосферах ЧД. Последнее не верно для моделей с зазором. Это может реализоваться для некоторых видов аккреционных дисков, при узких наборах параметров. Подобные значения параметра множественности возникают при загрузке джета на поздних стадиях (Глава 3), но автор не упоминает об этом механизме.

Не понятно почему в формуле 2.44 автор увеличивает Лоренц фактор до полной величины Майкелевской магнетизации, а не до ее половины.

В таблице 2.1 присутствуют 6 источников с  $\Psi_{\text{MAD}} < \Psi_{\text{Cs}}$ , в отдельных случаях более чем на порядок. Автор полностью игнорирует такие случаи, хотя естественно было бы обратить на них внимание и обсудить возможные причины возникновения такой конфигурации. Так же

автор не обсуждает огромный разброс по мощностям джетов, который составляет 7 порядков, что хорошо было бы сделать более подробно.

Решение для магнетизации на Рис. 3.3, видимо не применимо для больших Лоренц факторов т. к. не было сохранено условие малости отклонения Лоренц факторов от начальных.

При решении задачи о нагрузке джетов не учитывалось влияние комптонизации, и из-за несамосогласованности процесса загрузки, могло привести к не физическому ускорению джета и увеличению магнетизации при произвольных начальных значениях энергий и направлений впрыскиваемых в течение пар. Описанный автором эффект ускорения джета возможен при наполнении струи парами рожденными в горячем аккреционном диске, последнее согласуется с численными МГД расчетами (к примеру см. Комиссаров 2009). Однако, ускорение джета при самосогласованной загрузке (photon breeding) ожидать трудно.

В уравнениях 3.92 и 3.93 Используется не самая удачная величина ( $L_\gamma$ ) полная мощность, более логично было бы использование изотропной светимости ( $L_{\gamma, iso}$ ), что может быть проверено наблюдениями и не зависит от Лоренц фактора джета. Наблюдаемая светимость в гамма оказывается в 100 раз больше, чем оценка после формулы 3.95.

При выводе уравнения 3.96 не учитывались влияния многих факторов таких как: оптическое излучение звезд, инфракрасное излучение, и излучение АЯГ. Последний фактор является доминирующим и на расстоянии 10 пк от ЧД может превышать реликтовый фон до 1 000 000 раз. Т.е. ограничение на гамма светимость окажется на несколько порядков ниже приведенного в уравнении 3.96.

В разделе 4.3 обсуждается мощность джета M87  $1.e43$  эрг/с. В ряде работ (см. Owen 2000) обсуждаются значения в 10-100 раз больше, на уровне несколько  $1.e44$  эрг/с. Также большие значения мощности джета, на уровне  $1.e44-1.e45$  эрг/с (Barkov 2012), требуются для объяснения ярких  $1.e42$  эрг/с и коротких (длительность день) вспышек в жестком гамма диапазоне (ТЭВ) и постоянного потока на 100 МэВ на уровне  $>1.e42$  эрг/с. Вероятно, такая корректировка благотворно бы повлияла бы на непротиворечивость предложенной модели в разделе 4.3.7.

На рисунке 4.12 не приведено значение радиуса светового цилиндра, последний отвечает за сдвиг теоретических кривых влево-вправо. Т.к. часть наблюдаемых точек, явно лежат вне теоретических кривых, выбор значения этого параметра стоило обосновать в тексте.

Формула 4.64 для ускоряющегося джета, в случае M87 не применима на расстоянии 220 пк.

Ссылка [11], как в автореферате, так и в диссертации, не верна, она должна быть заменена на [20].

Автор регулярно ссылается на работы более поздние, пренебрегая хронологией или просто опуская их (к примеру, ускорение в монополюльном решении было рассмотрено в работах [13] и [20] до работы [10]).

Не верная ссылка на таблицу на странице 85, присутствуют и другие опечатки.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертации Е.Е. Нохриной. Все вынесенные автором на защиту положения являются новыми, актуальными и обоснованными. Они неоднократно докладывались на международных конференциях и семинарах, а также опубликованы в рецензируемых ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Полученные результаты уже используются и будут востребованы в ведущих Российских астрономических учреждениях: САО РАН, ГАИШ МГУ, ФИАН им. П.Н. Лебедева, ИКИ РАН, СПбГУ, ИНАСАН.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертация Е.Е. Нохриной удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 - “астрофизика и звёздная астрономия”.

д.ф-м.н.  
ведущий научный сотрудник,  
отдел физики и эволюции звезд,  
ИНАСАН,  
119017, г. Москва, ул. Пятницкая 48  
barkov@inasan.ru

Барков Максим Владимирович

9 Сентября 2022 года.

Подпись Баркова Максима Владимировича заверяю.