

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Елены Евгеньевны Нохриной “Методы оценки физических параметров  
релятивистских струйных выбросов из активных ядер галактик на основе  
математического моделирования и наблюдений”  
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Диссертация Е.Е. Нохриной посвящена актуальной проблеме моделирования релятивистских струйных выбросов из активных ядер галактик – АЯГ. В последнее время в этой области астрофизики происходило и происходит накопление наблюдательных данных для выбросов из АЯГ, работа таких новых инструментов как Радиоастрон и Телескоп Горизонта Событий, развитие методов обработки наблюдательных данных. Все новые результаты требуют для их интерпретации и использования улучшения и развития применяемых моделей. Поэтому разработанные в диссертации Е.Е. Нохриной методы и полученные с их помощью результаты представляют большой теоретический и практический интерес.

Диссертация объемом в 241 страницу состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит список литературы из 238 наименований.

Первая глава диссертации посвящена оценкам ключевых параметров моделей выбросов: параметра начальной замагниченности струйного выброса (джета) и параметра множественности. Параметр замагниченности определяет максимальный фактор Лоренца в джете. Его независимое от прямых кинематических измерений определение имеет важное значение как для понимания состояния выброса, так и для оценки соответствия наблюдаемых и возможных реальных скоростей плазмы в выбросах. Оценка величины связанного с ним параметра множественности является определяющей при выборе модели заполнения магнитосферы черной дыры плазмой — открытого на данный момент вопроса. В диссертации предложен метод оценки этих параметров с использованием величины видимого сдвига ядра выброса, наблюдаемого на разных частотах. Для оценки параметра замагниченности требуется информация о мощности выброса. С помощью полученных выражений через наблюдаемые параметры выбросов, для выборки из 97 источников с измеренным сдвигом ядра получены распределения параметров. Полученные результаты дают аргумент в пользу двухфотонной конверсии пар от диска как основного процесса заполнения плазмой магнитосферы черной дыры. Построенное распределение параметра замагниченности говорит о том, что для большинства джетов скорости, измеренные кинематическими методами, соответствуют ожидаемым максимальным скоростям. По полученным результатам проведено исследование причинной связи выбросов с различной геометрией границы.

Во второй главе диссертации Е.Е. Нохрина предлагает метод оценки величины магнитного поля и концентрации плазмы в источниках, в которых, по-видимому, отсутствует равномерное распределение энергии между полем и плазмой. Для этого диссертант предлагает использовать дополнительное измерение яркостной температуры. Метод применен к двум источникам, выбор которых обусловлен надёжной оценкой яркостной температуры, полученной по данным измерения наземно-

космическим телескопом Радиоастрон: VL Лас и 3С273. Показано, что полученная в рамках однородной модели величина концентрации плазмы, видимо, переоценена. Автор развивает метод для простейшей неоднородной модели и показывает, что в этом случае оценки амплитуды магнитного поля выше, чем полученные в рамках однородной модели. При этом предлагается метод оценки полного магнитного потока в выбросе по измерениям видимого сдвига ядра. Показано, что сделанные таким образом оценки хорошо соответствуют средней мощности джетов.

В третьей главе диссертации рассмотрен эффект нагружения выброса зарядами. До сих пор эффекты нагружения рассматривались только с учетом массы вторичной плазмы. Впервые показано, что важным следствием такого нагружения является возникновение вторичных электрического и магнитного полей, что может приводить как к локальному ускорению, так и замедлению первичной плазмы в джете. Рассмотренный механизм может быть интересен как источник возникновения локальных неустойчивостей.

В четвертой главе рассматривается возможная физическая причина появления излома формы границы выброса — переходы формы от параболической к конической, — недавно открытого для близких источников явления. Исследована модель с замкнутым током и конечной температурой плазмы. Последняя важна, так как в предложенной модели давление на границе джета целиком определяется давлением плазмы. В рамках модели показано, что при одной и той же зависимости давления внешней среды от расстояния от центрального источника, джет, находящийся в равновесии со средой, имеет излом формы границы. Такая интерпретация является альтернативой объяснению наличия излома изменением свойств внешней среды, коллимирующей джет, рассматриваемой в других работах. При этом сейчас получены аргументы в пользу модели диссертанта (наблюдения источника NGC315 с изломом, расположенным на порядок ближе к черной дыре, чем ожидаемое положение границы изменения поведения внешнего давления). Показано, что положение излома совпадает со срезом выброса, на котором течение перестает быть замагниченным.

Такое объяснение излома позволяет разработать инструмент оценки параметров джета, внешней среды и черной дыры по положению излома и ширине выброса в нем. Этот метод развит в разделе 4.2. Разработанный инструмент оценки спина черной дыры может стать очень полезным, но требуется дальнейшее исследование влияния выбора модели на результат, что делается в разделе диссертации 4.4. Одновременно проведен анализ возможных искажений для значений масс черных дыр, полученных неявным методом. Показано, что, для источников, видимых под большими углами, масса, полученная методом корреляции яркости линий с размером области-источника этих линий, может быть недооценена. На основе разработанного метода получены значения спинов черных дыр порядка 0.1. Такая малая величина может быть объяснена эффектом селекции. Предложен метод оценки давления внешней среды, коллимирующей джет. Оценки давления, полученные этим методом, были проверены для источников M87 и NGC6251, и находятся в хорошем согласии с данными измерений с учетом возможной неточности модели и масштабов экстраполяции.

Метод оценки параметров активных ядер галактик по геометрии излома применен к выбросу из M87 — наиболее детально исследованному АЯГ. На масштабах от 1 до  $10^4$  парсек с высокой точностью воспроизведена наблюдаемая форма выбро-

са. Предложенным диссертантом методом определены полный магнитный поток и мощность джета, масса и спин черной дыры. Все оценки находятся в согласии с результатами Телескопа Горизонта Событий.

В разделе 4.4 для источников с неразрешенной на данный момент формой джета предложен метод неявной оценки формы в области наблюдаемого ядра. Показано, что у эффективно разгоняющегося выброса параболической формы должны наблюдаться корреляция фактора Лоренца с корнем расстояния вдоль выброса, причем коэффициент корреляции слабо зависит от параметров выброса. На основе этого получены зависимости величины сдвига ядра от частоты для параболических неускоряющихся и ускоряющихся выбросов, уже наблюдаемые в немалом количестве источников. Последняя работа важна для определения истинного основания джета и применена к выбросу из M87.

Диссертант проделала важную работу в актуальной области астрофизики, связанной с исследованием активности ядер галактик. Актуальность работы несомненна в силу разработки и применения методов и моделей к самым новым наблюдательным данным. Развитие неоднородных моделей джетов важно в связи с накоплением наблюдательных данных с высоким разрешением, требующих для своей интерпретации более детального моделирования струйных выбросов. Одновременно, предложенные методы и результаты оценки физических параметров существенны для понимания процессов запуска струй.

Научная новизна работы диссертанта заключается в разработке новых методов исследования струй на основе магнитогидродинамического моделирования и новейших наблюдений. Достоверность всех полученных в диссертации результатов подтверждается аккуратным моделированием, ранее многократно подтвержденным другими методами и использованием надежных наблюдательных данных. Результаты диссертанта востребованы и применяются другими научными группами в своих исследованиях. Методы, разработанные Е.Е. Нохриной в диссертации, дают значимый новый инструмент для исследования активных ядер галактик, струйных выбросов и внешней среды. Методы планируется использовать и тестировать на текущих программах наблюдений.

Диссертант выносит на защиту семь важных новых научных результатов, опубликованных в 10 публикациях в рецензируемых изданиях, в том числе в 9 изданиях первого квартала. При этом диссертант аккуратно оговаривает свой вклад в эти публикации, в большей части которых он является определяющим.

В целом, диссертационная работа Е.Е. Нохриной является законченным исследованием в актуальной и бурно развивающейся области астрофизики, выполненным на высоком научном уровне. Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертации и опубликованным статьям.

Можно сделать ряд замечаний по диссертации, которые носят чисто редакционный характер.

1. На стр.23 написано:

“Тогда оценочная формула для мощности джета совпадет с точностью до коэффициента с формулой из [21]”, т.е. из работы Блэндфорда-Знаека (1977) и приводится формула (1.5).

В работе Блэндфорда-Знаека очень много формул, но такой, как и слова “джет” (jet) у них нет.

2. На стр.27 делается предположение “о равенстве плотности потока электромагнитной энергии и энергии плазмы в области излучения”. Т.е. предполагается равенство величин разных размерностей?
3. На той же странице дана связь параметров  $\alpha$  и  $p$ , причём выше на стр.21 упоминались значения  $p$  из набора 2.4, 2.5 и 3. Тогда  $\alpha$  должно попадать в интервал от  $-0.7$  до  $-1$ . Почему же ниже на стр.28 принимается  $\alpha = -0.5$  вне этого интервала?
4. На стр.45 получено малое значение замагниченности, что “находится в противоречии с начальным предположением сильно замагниченного режима”. Неясно, какой же вывод следует из этого противоречия? Двумя строками ниже параметр множественности ошибочно назван параметром замагниченности.
5. Не раз встречаются мало изящные конструкции типа “хотя [96] ... нашел” на стр.29, “[164] исследовал” на стр.123, “[15] использовал” на стр.171. Нельзя начинать фразу с номера ссылки, тем более нельзя говорить “использовал” и т.п. – во всех упомянутых случаях в цитируемых работах много авторов.
6. На стр.207 целая фраза осталась непереверждённой с английского. Много опечаток рассеяно по всему тексту, даже в Заключение их несколько. Это говорит о спешке при подготовке диссертации.

Высказанные замечания не влияют на высокую оценку диссертационной работы. Диссертация Нохриной Е.Е. “Методы оценки физических параметров релятивистских струйных выбросов из активных ядер галактик на основе аналитического моделирования и наблюдений” полностью удовлетворяет требованиям, изложенным в пунктах 9–11, 13 и 14 “Положения о присуждении ученых степеней”, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к диссертационным работам, представленным на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Нохрина Елена Евгеньевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

#### **Соответствие диссертации паспорту специальности.**

Тема диссертации Е.Е. Нохриной “Методы оценки физических параметров релятивистских струйных выбросов из активных ядер галактик на основе аналитического моделирования и наблюдений” соответствует пунктам 1–3 паспорта специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия, отрасли физико-математических наук:

1. Исследование физических процессов, связанных с генерацией излучения (электромагнитного, нейтринного, гравитационного), распространения и поглощения излучения в космических средах; разработка методов анализа электромагнитного излучения в различных спектральных диапазонах в применении к астрономическим наблюдениям.

2. Исследования физических свойств космических объектов (планет, звезд, галактик и их систем) межпланетной, околозвездной, межзвездной и межгалактической среды, базирующиеся на астрономических наблюдениях.

3. Изучение происхождения, движения и эволюции космических объектов на базе фундаментальных физических теорий и астрономических наблюдений.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук

главный научный сотрудник Курчатовского комплекса

теоретической и экспериментальной физики

Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”,

123182 Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Специальность 01.03.02 – астрофизика и радиоастрономия

тел.: 8-916-918-3120, эл. почта: sblinnikov@bk.ru

Блинников Сергей Иванович

“ ” сентября 2022 года

Подпись Блинникова С.И. удостоверяю

Главный учёный секретарь

Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”,

Сергунова Кристина Анатольевна