

## О Т З Ы В

### официального оппонента на диссертацию Нохриной Елены Евгеньевны **“Методы оценки физических параметров релятивистских струйных выбросов из активных ядер галактик на основе аналитического моделирования и наблюдений”**

на соискание ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальности 01.03.02 (Астрофизика и звёздная астрономия)

Диссертационная работа Нохриной Елены Евгеньевны «Методы оценки физических параметров релятивистских струйных выбросов из активных ядер галактик на основе аналитического моделирования и наблюдений» посвящена разработке и развитию методов исследования выбросов из астрофизических черных дыр, изучению физических параметров этих выбросов, а также изучению самих астрофизических черных дыр на основе аналитического моделирования и анализа наблюдений. Эта тематика представляется чрезвычайно актуальной для понимания физической природы аккреционной активности черных дыр в ядрах галактик, а также для планирования астрофизических наблюдений.

В последнее время развитие программ наблюдений активных ядер галактик в радиодиапазоне достигло точности микросекунд дуги и позволило разрешить поперечную структуру выброса для ближайших источников. Результаты успешной работы Радиоастрона и Телескопа Горизонта Событий, применение методов вейвлет-анализа скоростей ярких особенностей требуют, с одной стороны, учета поперечной структуры выброса при интерпретации наблюдений, а, с другой стороны, позволяют тестировать аналитические физические модели. Поэтому разработанные в диссертации Е.Е. Нохриной методы исследования физических параметров выбросов и астрофизических черных дыр на основе аналитического моделирования и наблюдений и полученные на основе этих методов результаты представляют большой теоретический и практический интерес.

Диссертация объемом 241 страниц состоит из Введения, 4 глав, Заключение и Списка литературы из 238 наименований.

Во Введении обосновывается актуальность исследований, представлен обзор научных публикаций по изучаемой проблематике, сформулирована цель диссертации и основные задачи, а также обоснована научная новизна и практическая значимость результатов диссертации.

В Главе 1 предложен и обоснован метод оценки параметра начальной замагниченности струйного выброса (джета) и связанного с ним параметра множественности. Важность независимой оценки этих параметров обусловлена тем, что параметр начальной замагниченности определяет максимальный фактор Лоренца плазмы, который в принципе может быть достигнут в джете. Величина параметра множественности связана с возможным сценарием рождения плазмы в основании джетов, что является до сих пор актуальным вопросом в физике запуска струйных выбросов.

Предложенный метод является новым и основан на универсальной связи между мощностью выброса и параметрами множественности и замагниченности. Метод использует измерения видимого сдвига ядра и некоторых других наблюдаемых параметров джетов. Рассмотрены несколько альтернатив (сильно или слабо замагниченный джет) и сделан выбор в пользу одного сценария. В результате для выборки из 97 источников (выборка содержит максимальное количество источников с необходимыми для оценок измерениями наблюдаемых параметров) получены распределения параметров множественности и замагниченности. Диапазон значений первого соответствует одной из общепринятых моделей рождения электрон-позитронных пар в результате двухфотонной конверсии и по порядку величины совпадает с соответствующими результатами численного моделирования. Распределение параметра множественности хорошо совпадает с соответствующим распределением, полученным измеренными кинематическими методами факторами Лоренца. На основе полученных параметров построены характерные профили распределения магнитного поля, концентрации плазмы и фактора Лоренца поперек джета на масштабах ширины порядка 1 парсек. Прямым вычислением конусов Маха построены характеристики и исследована поперечная связность джетов различных геометрий. Эти теоретические результаты подтверждают результаты, полученные ранее численным моделированием.

Глава 2 посвящена оценкам величины магнитного поля и концентрации плазмы в источниках с экстремальной яркостной температурой, в которых, по всей видимости, нет неравномерного распределения энергий между магнитным полем и излучающими частицами. При этом используется дополнительная физическая величина – яркостная температура. В предположении однородного джета получены формулы для определения магнитного поля и концентрации плазмы. Для источников VL Lac и 3C273 получены оценки этих величин. Показано, что использование однородной модели, по видимому, приводит к недооценке магнитного поля и переоценке концентрации плазмы. Метод развит с использованием неоднородной модели поперечной структуры джета. При этом удается оценить величину магнитного поля, но не концентрацию плазмы. Поперечная структура выброса используется для оценки величины магнитного потока в выбросе – важного параметра, определяющего мощность джета. Проведено сравнение результатов со средней мощностью и показано, что эти оценки для большого количества источников совпадают по порядку величины.

В Главе 3 впервые рассмотрен эффект нагружения выброса плазмой с учетом не только массы, но и заряда частиц. Показано, что в случае чистого нагружения массой происходит локальное замедление выброса в случае цилиндрической геометрии. Подробно рассмотрены различные сценарии рождения пар в результате двухфотонной конверсии с точки зрения скорости их центра масс относительно 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. Предложенный эффект вряд ли может влиять на динамику джета глобально, но может быть интересен при исследовании локального возникновения неустойчивостей.

Наконец, Глава 4 посвящена исследованию недавно открытого явления изменения формы выброса от параболической к конической для более чем десятка близких активных галактических ядер. Представлен обзор магнитогидродинамической (МГД) модели выброса с замкнутым внутри него током. Подробно изложен метод определения давления на границе выброса с учетом конечной температуры, при этом скорость звука в выбросе полагается существенно меньшей по сравнению со скоростью света.

По результатам моделирования в рамках цилиндрического подхода (производные вдоль выброса существенно меньше, чем поперек) получена зависимость давления на границе джета от его локальной ширины в безразмерных величинах, которая хорошо аппроксимируется двумя степенными законами. При этом в случае степенной зависимости давления внешней среды от расстояния вдоль джета и при условии равновесия между джетом и средой форма выброса естественным образом изменяется с параболической на коническую (“излом”). Показано, что положение излома хорошо совпадает с изменением режима течения от слабо к сильно замагниченному. Это позволяет непосредственно связать внутренние характеристики течения с измеряемой геометрией и дает новый метод исследования выбросов. Эта физическая интерпретация излома позволяет по его геометрии – ширине выброса в изломе и его положению вдоль джета – оценивать параметры выброса и центральной черной дыры. При этом в рамках модели можно получить оценку размера светового цилиндра – масштаба длины в МГД моделировании. Эта оценка зависит непосредственно от величины параметра замагниченности, который может быть ограничен из наблюдений характерных скоростей. Предложенный метод позволяет с точностью до множителя порядка единицы оценить этот параметр.

Радиус светового цилиндра предлагается связать со спином черной дыры с помощью условия максимального энерговыделения и оценки массы черной дыры. В работе проведен анализ методов оценок масс черных дыр. Получено, что для кинематических методов спин черных дыр порядка 0.1 и меньше, что является нижней ожидаемой границей для ЧД в активных ядрах галактик. Для оценок масс ЧД неявным методом спин получается еще ниже. В качестве причин такого расхождения с ожидаемыми результатами называются возможную заниженную оценку масс, полученную неявным методом. Возможной причиной низких спинов для ЧД с массами, определенными кинематическими методами, называется эффект селекции. Предложен метод оценки по порядку величины давления внешней среды внутри сферы Бонди. Этот метод проверен на двух источниках (M87 и NGC6251) с известными измерениями параметров окружающей выброс

среды, хотя и на несколько больших масштабах, чем наблюдаемый излом. Результаты совпадают с точностью до порядка величины, что является хорошим соответствием с учетом возможной неточности модели и масштабов экстраполяции.

Разработанный метод оценки параметров активных ядер галактик по геометрии излома применен к выбросу из M87. На масштабах от 1 до 104 парсек успешно воспроизведена наблюдаемая форма выброса. С использованием предложенного диссертантом метода определения параметров источника по излому получены оценки спина черной дыры, полного магнитного потока и мощности джета, а также массы. Все оценки находятся в согласии с результатами Телескопа Горизонта Событий. Предложен неявный метод оценки формы струйных выбросов в области наблюдаемых ядер. Метод применен к небольшой выборке из 11 источников. Предложено теоретическое объяснение для обнаруженной ранее для этих источников корреляции между фактором Лоренца в ядре и положением ядра. Фактически, эта работа развивает метод определения параметров по излому. Важным следствием этой работы является скорректированная зависимость видимого сдвига ядра от частоты, что уже наблюдается для немалого количества источников.

На защиту выносятся семь важных 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. Научная новизна и достоверность всех полученных в диссертации результатов подтверждается оригинальными теоретическими выкладками, детальным моделированием и использованием надежных наблюдательных данных. Методы, разработанные в диссертации, дают значимый новый инструмент для исследования природы активности ядер галактик и, несомненно, будут использованы и протестированы на текущих программах наблюдений.

Структура диссертации тщательно проработана. Язык диссертации лаконичный и ясный. Грамматических претензий к тексту нет. В качестве некоторого недостатка диссертации следует отметить отсутствие подробных оценок точностей астрофизических наблюдений, необходимых для проверки теоретических результатов диссертации. Но это скорее не недостаток, а пожелание для продолжения исследований.

Автореферат диссертации полностью соответствует тексту диссертации. Результаты диссертации являются новыми. Они своевременно опубликованы в ведущих научных журналах, а также были доложены на научных конференциях и семинарах. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы в ФИАН им. П.Н. Лебедева, в ОИЯИ (Дубна), ИФВЭ, ИТФ РАН им. Л.Д. Ландау, ИЯИ РАН, на физических факультетах МГУ, РУДН, КГУ, и в других научных организациях.

В целом, диссертация «Методы оценки физических параметров релятивистских струйных выбросов из активных ядер галактик на основе аналитического моделирования и наблюдений» представляет собой законченное научное исследование, удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор, Нохрина Елена Евгеньевна, заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 (Астрофизика и звёздная астрономия)

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук  
ведущий научный сотрудник лаборатории нейтринной астрофизики  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института ядерных исследований Российской академии наук,  
Москва 117312, Проспект 60-летия Октября 7а,  
Специальность 01.04.02 (теоретическая физика)  
тел.: 8-906-045-8561, эл. почта: [dokuchaev@inr.ac.ru](mailto:dokuchaev@inr.ac.ru)

В.И. Докучаев  
30.08.2022

Подпись В.И. Докучаева удостоверяю:  
Заместитель директора Института ядерных исследований РАН  
доктор физико-математических наук

Г.И. Рубцов