



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

# Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Политехническая ул., 26, С.-Петербург, 194021  
Телефон: (812) 297-2245 Факс: (812) 297-1017  
post@mail.ioffe.ru http://www.ioffe.ru

ИНН 7802072267/КПП 780201001  
ОКПО 02698463  
ОГРН 1037804006998

\_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

Председателю диссертационного совета  
Д002.023.01, д.ф.-м.н., члену-корр. РАН  
И.Д. Новикову

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»  
(д.ф.-м.н., зам. директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

\_\_\_\_\_ П.Н. Брунков

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертацию Нохриной Елены Евгеньевны  
на тему: Методы оценки физических параметров релятивистских  
струйных выбросов из активных ядер галактик на основе аналитического  
моделирования и наблюдений  
по специальности 01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия  
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Диссертация посвящена изучению фундаментальных процессов с огромным энерговыделением, происходящих в активных ядрах галактик. Из-за мощного выделения энергии эти объекты наблюдаются не только в близких галактиках, но и на космологически больших расстояниях. Активные ядра галактик содержат сверхмассивные черные дыры и аккреционные диски. В окрестностях сверхмассивных черных дыр наблюдаются релятивистские струйные выбросы. Диссертация посвящена моделированию этих струйных выбросов, что позволяет изучать механизмы их генерации и взаимодействия с окружающей средой, и в конечном итоге разрабатывать методы интерпретации разнообразных наблюдательных данных. Цель этих исследований – разработка надежных методов интерпретации наблюдений активных ядер галактик и получить уникальную информацию о физических условиях и параметрах этих ядер (в том числе, о массах и скоростях вращения сверхмассивных черных дыр). Такие исследования ведут к выяснению сложных и принципиальных

Исполнитель: Д.Г. Яковлев  
Тел. 812 292-71-80, факс 812 297-1017  
Yak.astro@mail.ioffe.ru

аспектов современной астрофизики и астрономии и являются несомненно актуальными.

Работа по указанной тематике включена в план фундаментальных научных исследований Российской академии наук (раздел: Астрономия и исследование космического пространства; тема: Происхождение, строение и эволюция Вселенной).

Новизна исследования и полученных результатов состоит в следующем:

Разработан метод (глава 1), позволяющий оценивать параметр замагниченности  $\sigma_M$  и параметр множественности  $\lambda$  плазмы в основании струйного выброса по измерениям видимых сдвигов размеров активных ядер галактик в радиодиапазоне на разных частотах. Метод применен для анализа наблюдений 97 активных ядер галактик и позволил построить функции распределения этих объектов по параметрам  $\sigma_M$  и  $\lambda$  и определить характерные значения параметров джетов. Результаты согласуются с моделью эффективной конверсии пар фотонов в электронно-позитронную плазму в истекающем потоке.

Разработан метод (глава 2) изучения активных ядер галактик, для которых возможно измерять как размеры ядра, так и яркостную температуру. В модели джета (однородного по сечению) метод позволил оценить не только концентрацию и замагниченность плазмы, но и величину магнитного поля. Показано, что если яркостная температура превышает равновесную температуру истекающей плазмы, то требуется учитывать неоднородность плазмы в поперечном сечении джета; разработан метод оценки магнитного поля для этого случая. Особое внимание уделено источникам VL Lac и 3C273, из-за их экстремальной температуры и из-за того, что именно для этих двух источников эта температура измерена наиболее надежно. Показано, что мощность большинства их 48 выбранных источников можно объяснить механизмом Блэндфорда-Знайека.

Разработана теория (глава 3), позволяющая объяснять наблюдаемые ускорения и замедления ярких элементов в струях джетов. Теория учитывает увеличение массы джета и изменение магнитных и электрических полей в областях эффективной генерации электронно-позитронной плазмы. При этом изменение электромагнитных полей за счет генерации электронно-позитронных пар учтено впервые. Показано, что оно может как ускорять, так и замедлять течение плазмы и влиять на развитие неустойчивостей на периферии джетов.

Разработан (глава 4) комплекс методов исследования активных ядер галактик, в которых проявляются изменения («изломы») формы джетов – с параболической формы вблизи черной дыры к конической вдали от нее. Эффект был обнаружен недавно в ряде активных ядер галактик и усилиями диссертанта позволил сделать новый шаг в изучении этих объектов.

Дана интерпретация (раздел 4.1) появления излома формы джета как перехода течения в выбросе от начального режима сильной замагниченности (с сильной перекачкой магнитной энергии в кинетическую энергию потока плазмы) к режиму слабой замагниченности (с ослабленной перекачкой энергии). Разработан метод определения (оценок) важнейших величин, регулирующих активность ядра галактики, по измерениям положения излома и ширины джета в месте излома. К этим величинам относятся: масса и частота вращения черной дыры, радиус светового цилиндра, давление среды, в которую происходит выброс.

Детально проанализирована (раздел 4.2) надежность измерения масс черных дыр в 44 выбранных ядрах активных галактик. Сделан вывод от том, что метод оценки масс с помощью эмпирического соотношения, связывающего размер области формирования широких линий в спектре квазара со светимостью в этих линиях, может давать заниженные значения масс черных дыр в близких активных ядрах галактик. Разработан метод оценки масс черных дыр по наблюдаемым положениям джетов и ширинах джетов вблизи изломов. Показано, что массы, оцененные этим методом, согласуются с массами, достаточно надежно определенными из кинематики движения светящейся материи в окрестности черных дыр.

Проведены тщательные оригинальные исследования (раздел 4.3), позволившие установить форму джета в наиболее полно изученной галактике M87 на расстояниях до 10 кпк от черной дыры. Благодаря наличию излома струйного выброса удалось оценить мощность джета, полный магнитный поток в выбросе, скорость вращения и массу черной дыры. Проведен скрупулёзный анализ неопределенностей этих результатов, прежде всего, оценок массы черной дыры. Важно, что найденные значения массы хорошо согласуются со значениями, полученными с помощью Телескопа Горизонта Событий.

Разработан и успешно реализован (раздел 4.4) новый метод поиска изломов джетов в далеких активных ядрах галактик, где прямое обнаружение изломов затруднено удаленностью объектов. Метод основан на использовании измерений видимого сдвига ядра активной галактики и скорости истечения плазмы по запаздыванию переменности источника на разных частотах.

Таким образом, диссертация вносит весомый вклад в фундаментальные исследования таких уникальных объектов во Вселенной, как активные ядра галактик, демонстрирующие мощные струйные выбросы. Проведен систематический анализ методов интерпретации наблюдений струйных выбросов, что позволило извлекать многостороннюю информацию о параметрах центральных черных дыр, механизмах генерации и распространения струйных течений, и о параметрах среды, окружающей сверхмассивные черные дыры. Разработаны и успешно использованы новые методы интерпретации наблюдений. Полученные результаты уже используются

и несомненно будут использоваться для изучения активных ядер галактик мировым научным сообществом. В Российской Федерации такие исследования проводятся в ГАИШ МГУ, ФИАН им. П.Н. Лебедева, ИКИ РАН, СПбГУ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе и в ряде других организаций.

Научные положения, выводы и заключения диссертации обоснованы и достоверны благодаря перепроверке результатов разными методами, сравнением (где возможно) с результатами других авторов, тщательному отбору наблюдательных данных для теоретической интерпретации. В качестве примера можно привести особую тщательность анализа ошибок измерения массы черной дыры в галактике M87 (разделы 4.3.4 и 4.3.6).

В целом диссертация представляет собой завершенное научное исследование, заслуживающее высокой оценки. Тем не менее, к работе можно сделать несколько замечаний:

Аналитическое моделирование, проделанное во многих разделах диссертации, основано на использовании достаточно приближенных (оценочных) выражений. Для примера, в формулах (1.48) и (1.49) для параметров множественности и замагниченности плазмы численные коэффициенты известны лишь по порядку величины. Полученные из этих формул физические параметры задачи не могут претендовать на слишком высокую точность. Приведение вычисленных из наблюдательных данных параметров с тремя или четырьмя значащими цифрами – явное превышение порядка малости. Например, трудно себе представить, что параметр множественности для источника 0804+499 из таблицы 1.2 в точности равен  $35.88 \cdot 10^{13}$ . Как следует из текста на стр. 41, автор прекрасно понимает степень неопределенности полученных параметров, но зачем тогда приводить числа с превышенной точностью в таблицах?

Одним из важных параметров теории является гравитационный радиус черной дыры. В диссертации он вводится как  $r_g = GM/c^2$ . Такое определение правильно для предельно быстро вращающейся черной дыры. В диссертации же, в основном, рассмотрены медленно вращающиеся черные дыры, а их радиус в два раза больше. Такой подход сразу вносит неопределенность (типа множителя 2) в радиус черной дыры, что транслируется в неопределенность (типа множителя 16) в оценке (1.5) мощности джета. А формула (1.5) используется далее в теоретических построениях, например, на стр. 31 и 80. Это еще раз подтверждает оценочный характер проделанного анализа, но никак не ставит под сомнение основные результаты, поскольку неопределенности анализа подробно обсуждаются в разных разделах работы (см., например, разделы 4.3.4 и 4.3.6).

В некоторых местах диссертация написана достаточно небрежно. Например, «миллисекунду дуги» автор временами (например, на стр. 33 и 122) называет «микросекундой» (но вычисления проделаны правильно). Фраза на

стр. 27 «Эти фотоны затем поглощаются этими же электронами, что приводит к поглощению» представляется тавтологией. На стр. 115 вводится «центр масс двух фотонов» (по-видимому – центр масс электронно-позитронной пары, рожденной двумя фотонами?). В названии главы 4 «Определение физических параметров джетов по наблюдаемому излому в форме» лучше бы добавить «джетов» или написать «в их форме». В ссылке [67] указал ошибочный номер статьи (L5 вместо L6).

Сделанные замечания не затрагивают основных результатов диссертации.

Таким образом, диссертация Нохриной Елены Евгеньевны является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как важное научное достижение в понимании природы активных ядер галактик и в разработке комплексного подхода для интерпретации наблюдений этих объектов. Всё сказанное соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, заведующим сектором теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе, членом-корр. РАН Д.Г. Яковлевым.

Отзыв рассмотрен и утвержден на астрофизическом семинаре ФБГУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, протокол № 19 от 14 июня 2022 г.

Заведующий сектором теоретической астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе  
Д.Г. Яковлев