

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РАН

СТЕНОГРАММА
ЗАСЕДАНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
Д002.023.01

28 сентября 2022 года

Защита диссертации

Нохриной Елены Евгеньевны

на соискание учёной степени

доктора физико-математических наук

по специальности 01.03.02 «Астрофизика и звёздная астрономия»

*“Методы оценки физических параметров релятивистских
струйных выбросов из активных ядер галактик на основе
аналитического моделирования и наблюдений”*

Присутствовали члены диссертационного совета:

Новиков И.Д., д.ф.-м.н., член-корр. РАН, 01.03.02, физ.-мат. науки,
председатель диссертационного совета

Ковалев Ю.Ю., д.ф.-м.н., член-корр. РАН, 01.03.02, физ.-мат. науки,
заместитель председателя диссертационного совета (*присутствует онлайн*)

Шахворостова Н.Н., к.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки, учёный секретарь
диссертационного совета

Вибе Д.З., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Дагкесаманский Р.Д., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки

Дорошкевич А.Г., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки (*присутствует онлайн*)

Иванов П.Б., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Каленский С.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки

Ковалев Ю.А., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки (*присутствует онлайн*)

Лукаш В.Н., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Малофеев В.М., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки (*присутствует онлайн*)

Новиков Д.И., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки

Попов М.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки (*присутствует онлайн*)

Троицкий С.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки

Тюльбашев С.А., д.ф.-м.н., 01.03.02, физ.-мат. науки (*присутствует онлайн*)

Чашей И.В., д.ф.-м.н., 01.03.02, техн. науки (*присутствует онлайн*)

Председатель заседания – доктор физико-математических наук,
председатель диссертационного совета И.Д. Новиков.

Секретарь заседания – кандидат физико-математических наук,
учёный секретарь диссертационного совета Н.Н. Шахворостова.

*Заседание проводится с участием членов диссертационного совета и
оппонентов в удалённом интерактивном режиме. Распорядительный акт
директора ФИАН Колачевского Н.Н. о проведении заседания
диссертационного совета с участниками в удалённом интерактивном
режиме находится в приложении №1 к стенограмме.*

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Начинаем процедуру защиты диссертации Нохриной Елены Евгеньевны. Пожалуйста, я попрошу секретаря объявить все технические детали, дату, количество присутствующих и прочее.

СЕКРЕТАРЬ: Спасибо, Игорь Дмитриевич! Итак, сегодня 28 сентября, 12 часов 3 минуты московского времени. У нас начинается заседание по защите диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Соискатель — Нохрина Елена Евгеньевна. Сейчас в зале присутствуют 9 человек лично и онлайн присутствует 7 человек. Итого получается 16 членов диссертационного совета кворум есть. Я информирую о том, что аудиовидеозапись заседания и все члены совета, кто присутствует онлайн обязаны находиться с включенными камерами. При возникновении каких-либо технических неполадок сообщайте сразу и мы будем объявлять технический перерыв для восстановления связи. Я пожалуй еще оглашу присутствующих по фамилиям, как того требует протокол (*оглашает присутствующих согласно явочному листу*). Я закончила, Игорь Дмитриевич.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Тогда, пожалуйста, огласите нам технические детали, которые нам нужно дальше знать, где выполнена диссертация и прочее.

СЕКРЕТАРЬ: Хорошо, спасибо. Итак, как уже было сказано, соискатель Нохрина Елена Евгеньевна. Название диссертации — «Методы оценки физических параметров релятивистских струйных выбросов из активных ядер галактик на основе аналитического моделирования и наблюдений». Диссертация на соискание степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 астрофизика и звездная астрономия. Диссертация выполнена в Московском физико-техническом институте, г. Долгопрудный, Московская область. Ведущая организация по диссертации — Физико-технический институт имени Иоффе Российской академии наук, г. Санкт-Петербург. Оппоненты по диссертации: Барков Максим Владимирович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института астрономии Российской академии наук, г. Москва. Максим Владимирович здесь присутствует. Блинников Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник НИЦ Курчатовский институт, Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики, г. Москва. Сергей Иванович тоже здесь присутствует. И Докучаев Вячеслав Иванович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института ядерных исследований Российской академии наук, г. Москва. Вячеслав Иванович

тоже здесь присутствует. Все три оппонента присутствуют лично. Теперь я зачитаю основные выдержки из представленных документов. Сразу скажу, что все документы, представленные соискателем, в порядке, соответствуют установленным требованиям ВАК. Выдержка следующая. Соискатель Нохрина Елена Евгеньевна, 1981 года рождения, в 2005 году окончила с отличием Московский физико-технический институт с присуждением степени магистра по направлению “Прикладные математика и физика”, а в 2010 году окончила аспирантуру Московского физико-технического института. В 2010 году защитила диссертацию “Цилиндрические релятивистские и нерелятивистские течения в астрофизике” на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 “теоретическая физика” в диссертационном совете при Московском физико-техническом институте. Диплом кандидата наук № 115269 выдан 09 июля 2010 года. В период подготовки диссертации на соискание учёной степени доктора наук соискатель Нохрина Е.Е. работала в должности старшего научного сотрудника в Лаборатории фундаментальных и прикладных исследований релятивистских объектов Вселенной МФТИ. Все, я на этом закончила, Игорь Дмитриевич.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Тогда мы предоставляем слово соискателю Елене Евгеньевне для выступления с докладом по диссертации.

ДОКЛАД СОИСКАТЕЛЯ

СОИСКАТЕЛЬ: *(Выступает с докладом. В докладе демонстрирует и комментирует слайды 1-38, номера которых даны в начале соответствующих строк ниже. Слайды к докладу приведены в Приложении №2 к стенограмме, а также приложены к аттестационному делу в бумажной и электронной форме).*

Слайд 1

Добрый день, уважаемые члены Совета, присутствующие на защите, оппоненты! Я хотела бы представить доклад по диссертации на соискание степени доктора физико-математических наук “Методы оценки физических параметров релятивистских струйных выбросов из активных ядер галактик на основе аналитического моделирования и наблюдений” и результаты применения этих методов.

Слайд 2

Мой доклад будет устроен следующим образом: он разбит в соответствии с главами диссертации. Четыре основные главы диссертации. Это “Определение физических параметров джетов по наблюдаемому излому в форме”, “Использование эффекта видимого сдвига ядра для определения параметров релятивистских струйных выбросов”, “Экстремальные яркостные температуры – оценки параметров плазмы в выбросах” и “Влияние нагружения массой на ускорение и торможение джетов”. Затем я покажу на слайдах положения диссертации, которые выносятся на защиту, и слайд со списком публикаций, которые содержат основные результаты диссертации.

Слайд 3

Итак, первая часть, о которой я бы хотела рассказать, посвящена излому в джетах. Под этим термином я подразумеваю переход формы границы джета от параболической к конической или квазиконической. Стандартное изображение этого эффекта может быть видно на этом рисунке. Он взят из работы Накамуры и других 2018 года, но первые результаты были опубликованы в работе Асады и Накамуры в 2012 году. По оси X на таких графиках откладывается расстояние вдоль джета, по оси Y – локальный радиус джета или его полная ширина. В логарифмическом масштабе видно, что все формы границы, которые описываются степенными функциями, соответствуют прямым с разным наклоном. У основания джета, ближе к основанию джета он лучше сколлимирован: наклон более пологий, и это соответствует параболической области. Дальше джет становится менее сколлимированным, близко к конусу, наклон более резким. В какой-то точке происходит излом.

Слайд 4

Начиная где-то с 2018 года и по сей момент было открыто еще более десятка источников, которые демонстрируют такое же поведение формы границы джета. Причем это источники разного типа по углу наблюдения: радиогалактики, блазары, Сейферты с узкими линиями. Здесь изображены BL Lac, Сейферт с узкими линиями.

Слайд 5

Далее, присутствуют источники всех типов по классификации Фанароф–Райли, и первого и второго типа. Этот эффект был обнаружен и по одноэпоховым и по стаковым картам. И единственное, что выделяет этот класс источников от общего множества активных ядер галактик – это то, что он [эффект] обнаружен только для близких источников, что вероятно,

связано с недостаточным разрешением инструментов для более далеких источников. Все это наводит на мысль, что, вероятно, этот эффект может быть универсальным, и под этим лежит универсальный физический процесс.

Слайд 6

Сразу же после открытия, в статье Асады и Накамуры 2012 года был предложен первый вариант объяснения этого эффекта. Он связан с тем, что для джета, который коллимируется внешней средой, резкое изменение в профиле внешней среды (здесь оно изображено схематически на этой картинке), например, связанное с наличием радиуса Бонди и изменением в степени зависимости давления от расстояния. В связи с таким более или менее резким изменением может, действительно, происходить изменение формы выброса. Другое объяснение схематически представлено вот на этой, второй, картинке. На нем именно я буду сосредотачиваться. Оно связано с нашими представлениями о том, что джет запускается, будучи изначально сильно замагниченным. По мере своего распространения и расширения, плазма ускоряется, и энергия электромагнитного поля перекачивается в энергию плазмы. Таким образом, вот это изменение самого режима течения от сильно замагниченного к слабо замагниченному, влияет на внутреннее состояние джета, и излом может появиться даже при одной и той же зависимости давления внешней среды, коллимирующей джет, от расстояния.

Слайд 7

Было проведено полуаналитическое моделирование разных моделей, сначала зависимости давления от ширины джета. Первая модель – это модель с замкнутым электрическим током, я на ней [на подробностях] не останавливаюсь. В разных работах было проведено моделирование и холодного течения, и течения с учетом конечной температуры течения. Также была использована модель джета с постоянной угловой скоростью, которая, вероятно, хорошо описывает центральную часть джета и, может быть, весь джет. Обе модели дают одну и ту же зависимость давления джета от ширины на его границе. Вот этот график в логарифмическом масштабе. Две кривые соответствуют разным начальным замагниченностям джета. Мы видим две отдельные асимптотические области со степенной зависимостью давления от ширины джета. Переход, например, от показателя степени -3.7 к -2.4 . Эффект присутствует в обеих рассмотренных моделях.

Слайд 8

Для того, чтобы из такой зависимости получить форму границы, необходимо сделать предположение на поведение давления внешней среды. В качестве такового было сделано стандартное предположение о наличии сферически симметричной аккреции газа на черную дыру, то есть, режим аккреции Бонди. В этом случае давление описывается степенной функцией в зависимости от расстояния от черной дыры с показателем степени $-b$, где b , в зависимости от деталей конкретного моделирования, принимает значения от 1 до 2.5. Два с половиной соответствует классическому теоретическому значению. Подстановка $b=2$ показывает, что ближе к основанию джета у нас форма границы джета (здесь опять по оси X расстояние вдоль джета, по оси Y ширина джета) стартует как параболическая. Затем зависимость продолжается как квазиконическая с показателем степени d пропорционально r в степени 0.8. Кроме того, мы проверили, что вот эта точка пересечения перехода от одного режима к другому очень хорошо совпадает с точкой, в которой максимальная замагниченность по срезу джета на этом расстоянии становится равной единице, и начиная с этого момента все течение джета является слабо замагниченным.

Слайд 9

Эта теория была успешно применена для воспроизведения формы джета в M87. Это галактика с наибольшим количеством данных в силу своей близости. Форма джета без ядерной области промерена на пяти порядках масштаба расстояния. И на четырех [порядках] от парсековых расстояний до 10^4 парсек удалось воспроизвести форму джета, включая квазипараболическую область, квазиконическую область и сам излом.

Слайд 10

Ну и уже позже, в начале 2021 года, вышли одновременно две работы, которые косвенно подтверждают возможность такой интерпретации о том, что излом связан именно с изменением внутреннего режима джета. Это определение формы джета из галактики NGC 315, для которой есть оценки радиуса Бонди (вот я его показываю курсором), и надежно было показано, что он находится на порядок дальше, чем излом в этом джете.

Слайд 11

Такая интерпретация позволяет нам использовать измерения геометрии излома, то есть ширины джета в изломе и его положении вдоль джета для определения параметров, прежде всего, самого выброса, затем можно попытаться связать их с параметрами самой черной дыры и, заведомо,

связать их с параметрами самой внешней среды, которая коллимирует джет. Непосредственно ширина излома в джете позволяет нам оценивать радиус светового цилиндра, причем с достаточно высокой точностью даже если мы не знаем начальной замагниченности джета, от которой эта ширина зависит. Для разброса замагниченности на один порядок, оценка радиуса светового цилиндра имеет разброс всего в четыре раза. И если мы можем каким-то образом (в диссертации я обсуждаю два метода как это можно сделать, здесь я не буду на этом останавливаться) ограничить замагниченность, то мы с еще более высокой точностью можем оценить радиус светового цилиндра.

Слайд 12

И если мы предполагаем, что линии, которые определяют радиус светового цилиндра, связаны с черной дырой, то мы можем связать, пользуясь условием максимальной мощности джета Блэндфорда–Знайека, радиус светового цилиндра со спином. Условие максимальной мощности состоит в том, что угловая скорость вращения магнитных силовых линий, которая и определяет радиус светового цилиндра, равна половине угловой скорости вращения черной дыры. В этом случае, если мы имеем оценку массы черной дыры, мы можем связать нашу оценку радиуса светового цилиндра со спином. В процессе этой работы мы разделили источники на те, массы для которых определены явным методом, то есть по прямому измерению кинематики звезд, звездных скоплений, газа; по реверберационному картографированию, когда мы тоже оцениваем дисперсию скоростей газа и, с помощью задержки в линиях, понимаем расстояния, на которых они [области излучения линий] расположены. Это самый надежный метод. И неявный метод, который использует ту или иную эмпирическую зависимость или какие-то эмпирические корреляции.

Слайд 13

Вот результаты для спинов представлены здесь. Оказалось, что они распадаются на два класса. Сплошными линиями показаны спины для черных дыр источниках, массы которых были определены прямым методом, разного вида штриховыми линиями – неявным методом. Мы видим, что четыре из шести источников с более надежной оценкой массы попадают в серую полосу. Мы ожидаем, что активные ядра галактик должны в своем центре иметь черную дыру, имеющую безразмерный спин не менее 0.1. Источники с массами, определенными менее надежными методами, дают существенно меньший результат для спина.

Слайд 14

Мы не увидели, мы не получили в этой работе ни одного экстремального спина, но это не противоречит теориям совместной эволюции массы и спина черных дыр. Вот пример [моделирования], здесь картинки идут слева направо и сверху вниз, это результаты моделирования эволюции по z , то есть близкие источники расположены в нижнем ряду. Здесь не очень хорошо видно, но вероятность иметь спин около 0.1 максимальна именно для этих источников. Теории эволюции, не все, но многие, действительно предсказывают, что для ближайших источников спины могут быть не экстремальными.

Слайд 15

Далее мы провели анализ масс черных дыр, которые определены неявным методом, и обнаружили отрицательную корреляцию массы (вот здесь по оси Y) с углом наблюдения. Причем мы выбрасывали этот источник как возможный очевидный драйвер корреляции. Эта корреляция значимая, и мы считаем, что для относительно больших углов наблюдения, порядка и больше десяти градусов, возможно, неявный метод дает недооценку массы черной дыры, и это влечет за собой недооценку спина черной дыры.

Слайд 16

Я не буду повторять выводы этой части, но добавлю, что в нашем случае такие скромные спины могут являться следствием эффекта селекции, поскольку чем меньше спин, тем шире джет в изломе и тем дальше излом расположен вдоль джета. Тем он проще разрешается современными инструментами. Ну и буквально месяц назад вышла работы Люка Риччи и другие, я в ней соавтор, когда для NGC 315 этим методом были получены оценки на спин, близкие к критическим. Для разных замагниченностей 0.86 и 0.99.

Слайд 17

Положение излома вдоль джета дает нам информацию о совокупности параметров: давления внешней среды и квадрата полного магнитного потока в джете. Если у нас есть инструмент каким-то образом оценить этот поток (я буду обсуждать это ниже, можно связать его с оценкой полной мощности джета), то можно получить оценки величины давления на разных масштабах. Единственный источник, для которого мы могли проверить это, это источник 1637+826. Измерения, существенно дальше, конечно, на расстоянии 480 парсек, дают такую величину. А наши оценки, будучи экстраполированы в

соответствии с законом Бонди на эти же масштабы, дают такую же оценку с коэффициентом 5.

Слайд 18

естественно, это моделирование было применено для определения параметров M87. Для нее есть непосредственные измерения давления на расстоянии 220 парсек, то есть примерно на масштабах или чуть дальше излома. Есть надежные оценки массы 6.5×10^9 масс Солнца и есть оценки темпа аккреции. Получены результаты: мы считаем, спин должен лежать в диапазоне 0.2-0.3 в зависимости от замагниченности. Магнитный поток 3×10^{33} [Гс см²], что является средним классическим значением. И он дает в результате мощность от 2 до 6 на 10^{42} эрг/с, что является нижней границей той ожидаемой мощности джета, которую все имеют в виду, примерно 10^{43} . Ну и можно оценить состояние диска по безразмерному параметру ϕ . Из наших оценок получается, что ϕ примерно 75, что хорошо совпадает со значением 50 для магнитоарестованного диска. И это находится в соответствии с результатами моделирования Телескопа Горизонта Событий, поскольку они тоже получили, что для низких спинов состояние диска должно быть магнитоарестованным.

Слайд 19

Далее, конечно, очень интересно попытаться посмотреть, можем ли мы судить о параболическом начале джета в дальних источниках, для которых мы не можем непосредственно измерить излом. Нами был предложен следующий метод. Этот рисунок взят не из моей работы, это работа Кутькина и других 2019 года. На основании представленных на нем данных мы предложили этот метод. Он связан с тем, что скорости в джете, Лоренц-фактор, определяется по запаздыванию вспышек в ядрах на 15 и 8 ГГц. Это ограничивает возможность применения этого метода по классу источников, потому что нужны сильно переменные источники. В этой работе [Кутькин и др. 2019] была получена следующая корреляция: Лоренц-фактор пропорционален примерно корню из γ . Дальше мы проверили, пользуясь универсальным режимом ускорения плазмы в джете, когда фактор Лоренца пропорционален локальному радиусу джета, отнесенному к радиусу светового цилиндра, что выборка этих источников хорошо соответствует тому, что ядра находятся в параболической ускоряющейся части джета. Остальные режимы: конический джет, неускоряющийся джет, могут быть отброшены.

Слайд 20

В этой работе также ставился вопрос о том, можем ли мы все источники выборки отнести к одному какому-то тренду. И было показано, что, действительно, если ядра лежат в параболической ускоряющейся области, то должно выполняться вот это соотношение, то есть отношение Лоренц-фактора к корню расстояния вдоль джета определяется магнитным полем на световом цилиндре и величиной внешнего давления на каком-то заданном расстоянии. Для разумного разброса в значениях этих величин полоса разброса источников охватывает выборку, и, что самое главное, положение этих точек (по осям отложены Лоренц-фактор ядра и его положение вдоль джета) не зависит от максимального Лоренц-фактора. Это важно, чтобы объяснить, что все они лежат в этой полосе.

Слайд 21

Важная часть работы состоит в том, что если эти ядра лежат в параболической части джета, то это означает некоторую модификацию стандартной зависимости видимого сдвига ядра от частоты, которая определяется вот этим показателем степени k_r . Для конического джета с некоторыми дополнительными условиями $k_r=1$. Мы показали, что если форма джета у основания вот такая: $d \propto r^k$, то если джет движется с постоянной скоростью, то $k_r=k$, а для ускоряющегося джета $k_r=4k/3$. То есть если у нас парабола, $k=0.5$, то k_r должен быть равен примерно 0.7. Действительно, это подтверждается более ранними измерениями. Для NGC 315 это просто полностью совпадает. Этот эффект может приводить к переоценке положения апекса джета, его начальной точки. Мы предполагаем, что это происходит в M87, для которого Хада в статье 2013 года обнаружил тренд: близко к черной дыре снова появляется кусочек конического течения. Мы предполагаем, что такой эффект может наблюдаться даже при параболической форме джета, если форма границы построена в координатах, сдвинутых на $5r_g$.

Слайд 22

Я перехожу к следующей части. Это оценки параметров замагниченности и множественности по эффекту видимого сдвига ядра. Параметр множественности определяет как хорошо магнитосфера черной дыры заполняется плазмой. Он равен отношению концентрации плазмы к гольдрайховской концентрации. Существуют разные модели [генерации плазмы] и разные предсказания на величину этого параметра. Механизм генерации пар в магнитосфере – это пока нерешенная задача. Второй параметр, который может быть с ним связан – это параметр замагниченности

σ_m . Фактически, он определяет максимальный Лоренц фактор течения, который может быть в принципе достигнут джетом, когда вся энергия электромагнитного поля перекачана в частицы.

Слайд 23

Для оценки этих параметров независимо от кинематических наблюдений и от конкретного моделирования мы воспользовались универсальной связью параметров множественности и замагниченности с мощностью джета и использовали измерения частотно-зависимого видимого сдвига ядра. Получены формулы для λ и для σ_m . Для оценки полной мощности джета мы пользуемся корреляцией, полученной эмпирически и связывающей среднюю мощность выброса со светимостью на 200 – 400 ГГц.

Слайд 24

Это все было применено к выборке из 97 источников, 104 измерения видимого сдвига ядра. Получены следующие результаты. На этой гистограмме приведено распределение параметра множественности. Здесь не столько важно само распределение, мы не знаем, с чем его сравнивать, сколько характерная величина этого параметра порядка 10^{13} , которая очень хорошо совпадает с результатами моделирования рождения плазмы путем двухфотонной конверсии фотонов из внутренних частей аккреционного диска. Получено также распределение для σ_m . Характерные значения – десяток, несколько десятков. Напомню, что с точностью до фактора два это максимально возможный фактор Лоренца течения. Для сравнения я попыталась разместить один под другим полученное позже в 2019 году на основе измерения кинематики распределение (моделирование методом Монте-Карло) фактора Лоренца, которое очень хорошо воспроизводит то распределение σ_m , которое получили мы в этой работе.

Слайд 25

Следующая задача связана с экстремальными [яркостными] температурами в джетах. Некоторые методы оценки физических параметров струйных выбросов используют условие о том, что излучающая плазма в джете находится в состоянии равнораспределения. Под этим подразумевается, что в системе отсчета плазмы суммарная плотность энергии излучающих частиц равна плотности энергии магнитного поля. Это [предположение] существенным образом используется. В 1994 году Редхедом было показано, что такое состояние плазмы существенным образом ограничивает величину яркостной температуры, которая вводится формально по спектральной

плотности потока. Ограничение 6.7×10^{10} К. В то же время по данным измерений РадиоАстроны было получено, что для BL Lac яркостная температура как минимум на два порядка выше предела. Для источника 3C 273 была получена нижняя оценка на яркостную температуру, и она также значительно превышает равновесную яркостную температуру. Поэтому возникла идея, во-первых, посмотреть, как можно оценивать параметры без предположения о равномерном распределении, как на это может повлиять поперечная структура джета, ну и исследовать эффекты учета поперечной структуры.

Слайд 26

В работе было предложено заменить предположение о равномерном распределении дополнительным измерением: это надежное измерение яркостной температуры. В этом случае были получены значения в области ядер для магнитного поля и концентрации плазмы, которые приведены в этой таблице. Получается, что концентрация такая, что она дает вероятную переоценку мощности всего джета. Поэтому мы решили проверить, насколько изменит ситуацию учет поперечной структуры выброса.

Слайд 27

Мы использовали довольно консервативную стандартную оценку профилей магнитных полей, концентрации и Лоренц-фактора для описания этой структуры. Эти профили хорошо подтверждаются в частности численным моделированием.

Слайд 28

Мы получили, что в этом случае амплитуда магнитного поля (оно непостоянно поперек джета) определяется формулой, в которой возникает фактор, равный радиусу джета к радиусу светового цилиндра. Это существенно повышает величину амплитуды поля. Кроме того, учет этой структуры позволяет также оценить и полный магнитный поток. Когда мы измеряем магнитное поле методом видимого сдвига ядра, мы измеряем тороидальную компоненту поля, тогда как за полный магнитный поток отвечает полоидальная. Есть универсальные соотношения МГД между ними для релятивистского течения. В этом случае удастся оценить и полный поток в джете и попытаться оценить полную мощность джета по измерениям видимого сдвига ядра.

Слайд 29

Это было применено к 48 источникам, и в качестве результата построена гистограмма для отношения мощности джета, полученной по величине магнитного поля, по потоку, к средней мощности джета. Основным результатом является то, что такое распределение имеет очень выраженный пик в районе единицы. В логарифмическом масштабе около нуля.

Слайд 30

Последняя часть посвящена исследованию нагружения джета массой. Это была менее прикладная и более теоретическая задача. Мы смотрели, что произойдет с джетом, если во внешних частях джета происходит двухфотонная конверсия, рождаются пары, и происходит нагружение джета массой. Впервые здесь был исследован эффект, связанный не с массой, а с нагружением зарядами. Пары начинают двигаться в скрещенных электрическом и магнитном полях определенным образом, вызывая поляризацию заряда, поверхностные токи, которые протекают локально. В этой задаче мы самосогласованно рассматривали специфическое движение пар, имеющих изначально различные скорости движения центра масс относительно фоновой плазмы. Были вычислены компоненты тензора энергии-импульса нагруженной плазмы. Самогласованно вычислены возмущения электрического и магнитного поля вследствие нагружения. Получены результаты для изменения величины фактора Лоренца с учетом изменения величины тока и угловой скорости вращения, которая отвечает за электрическое поле.

Слайд 31

Были получены следующие результаты. Давайте я начну с правой картинки. Это случай, когда пары рождаются с центром масс, имеющим нулевую скорость относительно течения. По оси Y изображено отношение возмущенного Лоренц-фактора к начальному. По оси X – отношение концентрации нагруженной плазмы к концентрации фоновой плазмы. Это случай был рассмотрен раньше, это чистое нагружение массой. И мы видим очень небольшое замедление джета. Вот здесь [отношение] единица, 0.98, 0.96 при примерно 1% нагруженной плазмы. На этом рисунке представлен случай, когда пары рождаются с центром массой в покое относительно ядра. Фоновая плазма протекает мимо них. В этом случае возникают ранее не рассмотренные возмущения электрического и магнитного полей, они экранируются в разной степени, и торможение плазмы происходит гораздо быстрее, чем в случае чистого нагружения массой.

Слайд 32

И если пары рождаются с центром масс, который движется со скоростью, большей скорости течения, то у них очень много энергии вращательной, и показано, что это может приводить к локальному ускорению плазмы.

Слайд 33

По результатам этой работы в качестве приложения были получены нулевые оценки для тех светимостей, которые необходимы, чтобы объяснить этим эффектом ускорения и замедления плазмы. Были получены оценки на гамма-кванты в ТэВ-ном диапазоне, которые нужны для разгона, и на фотоны в МэВ-ном диапазоне, которые могут отвечать за торможение. Это нулевые оценки. Более важным здесь является фактор самого возмущения полей и возникновения разного рода неустойчивостей на границе джета. То есть скорее, этот эффект ответственен не за ускорение или замедление джетов, а за появление неустойчивостей.

Слайд 34

Я закончила с изложением основного содержания диссертации и в качестве заключения я еще раз проговорю основные положения, выносимые на защиту.

1. Предложен метод оценки начальной замагниченности течения σ_m и параметра множественности λ по измерениям видимого сдвига ядра. По результатам анализа величин сдвигов ядер для выборки из 97 источников получены распределения источников по параметрам замагниченности и множественности. Показано, что максимальные факторы Лоренца течения плазмы в большинстве источников выборки должны иметь значения в пределах 20 – 50. Полученная характерная величина $10^{12} - 10^{15}$ параметра множественности позволяет выдвинуть аргумент в пользу модели рождения электрон-позитронных пар в результате двухфотонной конверсии в магнитосфере черной дыры.

2. Предложен метод оценки величины магнитного поля, концентрации плазмы и локальной замагниченности в рамках модели однородного джета по измерениям яркостной температуры и видимого сдвига ядра. Показано, что при оценке параметров источников с наблюдаемой яркостной температурой, превышающей равновесное значение, важен учет поперечной неоднородности выброса. Получено выражение для оценки магнитного поля по яркостной температуре в рамках модели неоднородного джета. Предложен метод оценки полного магнитного потока в струйном выбросе по данным измерений видимого сдвига ядра и яркостной температуры. Для

выборки из 48 источников показано, что для большинства из них, их средняя мощность может быть объяснена механизмом Блэндфорда–Знайека.

Слайд 35

3. Исследованы эффекты нагружения джетов электрон-позитронной плазмой в результате двухфотонной конверсии. Впервые исследовано влияние нагружения джета зарядами. Получены выражения для внутренней энергии и анизотропного давления вторичной плазмы. Показано, что нагружение массой локально способно замедлять выброс. Нагружение джета зарядами возмущает электрическое и магнитное поля в джете и способно как локально замедлять, так и ускорять плазму. Этот процесс может играть важную роль в развитии неустойчивостей во внешних частях джетов.

4. На основе аналитического моделирования с учетом конечной температуры показано, что наблюдаемое в ряде источников изменение формы выброса с параболической на коническую может быть объяснено изменением состояния выброса: переходом джета от сильно замагниченного к слабо замагниченному режиму. По данным измерения ширины джета в изломе и положения излома, предложен метод оценки ключевых параметров активного ядра галактики: радиуса светового цилиндра выброса, спина и массы черной дыры, величины давления внешней среды, удерживающей выброс. Для источников с массами, измеренными методом дисперсии скоростей, величины большинства спинов лежат в интервале 0.1 – 0.3, что хорошо согласуется с моделями запуска джетов и моделями эволюции спинов для близких источников. Для источников с наблюдаемым изломом получены величины давления внешней среды, необходимого для удержания выбросов.

Слайд 36

5. Для исследования характерных масштабов положения изломов в выбросах в физических единицах проведен анализ масс черных дыр для выборки из 44 источников. Показано, что массы, полученные с использованием соотношения между размером области формирования широких линий и светимостью в линиях, имеют значимую отрицательную корреляцию с углом наблюдения. Это фактор необходимо учитывать при оценках данным методом масс черных дыр в близких активных ядрах галактик, так как он может давать заниженные значения. Предложен метод оценки масс черных дыр по измеренной ширине джета в изломе. Показано, что массы, определенные этим методом для источников с обнаруженным изломом,

находятся в хорошем согласии с оценками масс по кинематике – одним из наиболее точных методов определения масс черных дыр в АЯГ.

6. Проведено аналитическое моделирование формы границы джета в галактике М87, которое точно воспроизвело форму выброса на масштабах от 1 до 10^4 парсек. Получены оценки радиуса светового цилиндра, спина черной дыры 0.1 – 0.3, полного магнитного потока в выбросе и мощности джета. По данным измерений формы границы, темпа аккреции и величины внешнего давления предложен метод оценки массы черной дыры. Показано, что ожидаемый темп аккреции согласуется с наличием магнитоарестованного диска около черной дыры в М87.

Слайд 37

7. На основе аналитического моделирования и использования данных измерения видимого сдвига ядра и характерной скорости плазмы по запаздыванию вспышек, подтверждено наличие параболической части начала джета в далеких источниках, недоступных для прямых измерений формы выброса в силу конечной разрешающей способности инструментов. Вычислен ожидаемый показатель степени для частотно-зависимого видимого сдвига ядра с учетом параболичности. Он находится в хорошем согласии с последними данными наблюдений.

Слайд 38

Я оставляю список публикаций, где были получены основные результаты этой диссертации и благодарю за внимание.

ВОПРОСЫ ПОСЛЕ ДОКЛАДА СОИСКАТЕЛЯ

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо. Какие вопросы будут к докладчику. Пожалуйста, Павел Борисович.

ИВАНОВ П.Б. У меня следующий вопрос. Вот Вы какое-то там аналитическое моделирование делали, а потом непосредственно применили к наблюдениям, получили хорошее согласие и так далее. Ну, казалось бы, перед тем, как применять достаточно идеализированные аналитические модели к наблюдениям, хотелось бы проверить, насколько они реалистичны, сравнивая их с численным счетом, где Вы можете контролировать параметры задачи и просто непосредственно смотреть, в частности, например, вот этот переход формы джета, и так далее. В общем, можно много чего проверить, сравнивая с симуляциями численными. Такого рода работы были сделаны?

СОИСКАТЕЛЬ. Работы следующие. Мы не видели, чтобы в последних симуляциях был получен излом. Например, последняя работа, исследующая этот эффект применительно к М87, была опубликована в статье Chatterjee 2019 года. Они не смогли получить такого излома. Тем не менее, в работах Комиссарова и Максима Баркова, который здесь присутствует, мы позже уже нашли, что излом функции давления был получен ранее и именно в численном моделировании. Что касается идеальной модели, которую мы описываем, да, естественно, она идеализирована, но, например, модель, которую мы использовали, с замкнутым током, предсказывает качественно такие же распределения физических величин, что и численное моделирование. Мы проводили сравнение с результатами работы Chatterjee и других 2019 года. С этой работой наше распределение величин неплохо совпадает, поэтому мы считаем, что некоторое согласие с численным моделированием есть.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо, еще вопросы.

ЛУКАШ В.Н. У меня вопрос к четвертому пункту. Там по М87. Вы до этого говорили, что по Вашему методу можно. Шестой пункт. Вы сказали, что основные параметры, согласно Вашему методу, туда входила и масса. Раз Вы массу не измеряли, откуда и какую Вы взяли. Мы взяли массу в 6.5×10^9 масс Солнца. Но на самом деле в этой работе, я это не освещала в докладе, мы пытались предложить и метод оценки самой массы черной дыры в М87 по данным измерений величины внешнего давления, если мы можем определить показатель степени для аккреции Бонди и экстраполировать этот профиль внутрь. И если предположить, что выполнено соотношение, полученное ранее в работе Zamaninasab и другие 2014 года, между углом раскрыва джета и скоростью, то совокупность этих измерений позволила нам оценить и массу М87, черной дыры в М87. Она получилась того же порядка, что и наблюдается: примерно от 5 до 9 на 10^9 масс Солнца. Конечно, разброс этой величины, точность была ниже, чем по кинематике и позже оценок по результатам измерения Телескопа Горизонта Событий. Можно взять 6.5×10^9 масс Солнца, и все результаты будут такие же. Но в работе мы еще предложили метод оценки массы. И, в принципе, с большим диапазоном [ошибок], но он совпал с другими данными наблюдений.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо, еще вопросы.

Лукаш В.Н. Это продолжение моего первого вопроса. А если массу взять на порядок меньше, какой получится спин? Можете оценку для сравнения дать? Это будет нелинейная зависимость, спин упадет существенно.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо, еще вопросы. На онлайн не вопросов? Нет.

КОВАЛЕВ Ю.Ю. Нет, спасибо.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Тогда мы перейдем к следующему пункту. Слово предоставляется секретарю для зачитывания отзывов, пришедших в наш совет. Сначала отзыв организации, где выполнена диссертация.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ, ГДЕ БЫЛА ВЫПОЛНЕНА РАБОТА

СЕКРЕТАРЬ: Да, спасибо Игорь Дмитриевич. Я начну с заключения Московского физико-технического института, в котором была выполнена диссертация. *(Зачитывает заключение организации, где была выполнена работа. Заключение положительное, прилагается).*

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

СЕКРЕТАРЬ: Теперь я зачитываю отзыв ведущей организации — Физико-технического института имени Иоффе Российской академии наук. *(Зачитывает отзыв ведущей организации. Отзыв положительный, прилагается).*

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо, Надежда Николаевна. Скажите, другие поступившие отзывы имеются?

СЕКРЕТАРЬ: Нет, других отзывов не поступало.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Елена Евгеньевна, Вы будете сразу отвечать на замечания, которые были, или сразу на все замечания, включая оппонентов?

СОИСКАТЕЛЬ: Давайте сразу на все замечания, включая [замечания] оппонентов.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Хорошо. Если так, то значит мы тогда переходим к отзывам оппонентов. Правильно я понимаю? Слово предоставляется первому оппоненту Баркову Максиму Владимировичу. Пожалуйста.

ВЫСТУПЛЕНИЕ ПЕРВОГО ОППОНЕНТА

БАРКОВ М.В.: *(Выступает со своим отзывом. Отзыв положительный, прилагается).*

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Все у Вас, да? Какие вопросы будут к оппоненту?

БЛИННИКОВ С.И. Можно?

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Конечно.

БЛИННИКОВ С.И.: Максим, скажите, пожалуйста, я не понял цифры — десять в двенадцатой эрг в секунду какие-то тэвные... Это маленькая кажется [цифра].

БАРКОВ М.В.: Нет, десять в сорок второй.

БЛИННИКОВ С.И.: А, тогда правильно. Хорошо, спасибо. Внесите в стенограмму.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Еще вопросы? Пожалуйста, Павел Борисович.

ИВАНОВ П.Б.: У меня даже не вопрос, а комментарий.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Так, комментарии потом. Вопросы какие? Нет больше вопросов. Спасибо! Насколько я понимаю, ответы будут всем оппонентам в конце. Тогда мы переходим ко второму оппоненту. Пожалуйста, Сергей Иванович.

ВЫСТУПЛЕНИЕ ВТОРОГО ОППОНЕНТА

БЛИННИКОВ С.И.: Здравствуйте, добрый день всем! Я не буду зачитывать всю положительную часть, уже много раз [озвучено], я со всем согласен, что излагалось, это очень важные результаты. Но несколько слов я хотел добавить от себя, что мне конкретно понравилось в положительной части, а потом уже зачитаю замечания. Я бы добавил к актуальности вот этой диссертации то, что лично меня волнует. Когда-то прямо в этом здании с Геннадием Семеновичем Бисноватым-Коганом мы занимались первыми моделями аккреции на черные дыры и электродинамикой аккреционных дисков, и это потом использовалось в моделях джетов. Большую часть жизни я с ними не сталкивался, надо сказать. Но в последние годы это стало чрезвычайно актуально, особенно когда пять лет назад появилась многоволновая астрономия, и наши с Игорем Дмитриевичем и другими соавторами предсказания о возникновении гамма-всплесков коротких при слиянии нейтронных звезд получило наблюдательное подтверждение. Почему меня крайне заинтересовала вот эта диссертация — здесь анализируются те джеты, которые видны в галактиках, благодаря выдающимся достижениям радиоастрономии и вообще всеволновой

астрономии. И то, там приходится делать различные интерпретации, в частности как в центральных областях по запаздыванию устанавливать... Но многое видно глазом. Джеты там несомненно существуют, прямо измеряются сверхсветовые кажущиеся скорости, а все модели гамма-всплесков, и долгих, и коротких — никаких джетов там не видят. Некоторые только в последствиях, в послесвечении, тоже сверхсветовые движения. Поэтому хотелось понять, а что же реально люди, которые видимые джеты, что они знают? Реально ли там существуют вращающиеся черные дыры, с какими спинами? Так вот этому посвящена эта работа. И именно мне как раз понравилось то, что много аналитических оценок, очень много простых полуаналитических, то есть простых обыкновенных дифференциальных уравнений. Мы понимаем, что есть прекрасные численные схемы, которые разные части этой задачи, но без таких оценок, как здесь проведены, не будет понимания. Цель расчетов — понимание. И вот этим очень хороша эта работа, она в очень многих местах дает это понимание. И там, где найдены какие-то расхождения — это самое интересное, это значит надо в этой области дальше продолжать работать, и такая работа заслуживает высочайшей оценки. *(Далее зачитывает свой отзыв. Отзыв положительный, прилагается).*

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Какие будут вопросы к Сергею Ивановичу? Нет вопросов. На онлайн? Нет. Спасибо. Слово предоставляется третьему оппоненту Докучаеву Вячеславу Ивановичу.

ВЫСТУПЛЕНИЕ ТРЕТЬЕГО ОППОНЕНТА

ДОКУЧАЕВ В.И. Я тоже присоединяюсь к мнениям предыдущих отзывов положительных о диссертации, что она замечательная, получены очень ценные и важные результаты по животрепещущим проблемам. На которые, тем не менее, ответов до сих пор нет. Первая же проблема: а где же ускоряются космические лучи? Протоны, ядра, где рождаются нейтрино? Проблема была сформулирована еще может быть сорок лет назад. У нас это Березинский и Зацепин. За границей я, скажем, упомяну, Мартина Рисса. Формула Хиллоса, график. И вот сорок лет назад популярной была точка зрения, что ускорение, конечно, связано с черными дырами. Это самые мощные источники во Вселенной. Это все понимают, и верят в это до сих пор, и мы других способов не знаем. Разные механизмы: ударные волны и электромагнитное прямое ускорение. И сорок лет назад была сформулирована точка зрения, когда наблюдались так называемые

радиогалактики двойные с радиоушами на расстояниях в десятки, а то и сотни раз, превышающих размеры материнской галактики. Тогда говорили, наверное, в этих радиоушах, куда бьет струя неизвестной физической природы, и вот она ударяет в плотную плазму на очень больших расстояниях, там генерируются ударные волны. Так происходит ускорение протонов, ядер, и потом нейтрино рождаются. А вблизи от черной дыры непосредственно очень трудно ускорять, там колоссальное поле излучения, и протоны, уже не говоря про электроны, очень быстро будут там терять энергию.

Сейчас ситуация радикально изменилась. Популярны стали схемы, что ускорение происходит непосредственно вблизи черной дыры. Но хороших работ, с которыми не связано зубодробительное негативное отношение, до сих пор нет. Почему, потому что очень трудно учесть потери ускоряемой частицы, протона или ядра, в сильном поле излучения вблизи черной дыры. Много просто неправильных работ, где, скажем, люди вообще не учитывают потери, а считают, что есть униполярный индуктор, и между полюсом и экватором черной дыры, как этот вопрос задавал еще Березинский, сорок лет на семинарах у Гинзбурга и у Гуревича Александра Викторовича. Вот там уже потенциал 10^{21} эВ. Вот там и происходит ускорение. А ему говорили, а поле излучения, потери, их никто посчитать не может, и до сих пор никто не может посчитать. И сейчас надежда связана с именем Александра Чеховского, который хочет учесть вот эти потери в симуляциях, уже не в моделировании, а в симуляциях на суперкомпьютерах в Америке с учетом общей теории относительности, это метрика Керра, и магнитной гидродинамики. Это ученик Василия Семеновича Бескина, которого к себе перетащил Блэндфорд. Сквозь всю диссертацию идет эта идея, этот процесс Блэндфорда–Знайека. Это потрясающее достижение, статья опубликована давным-давно, но стрелять она стала сейчас, когда Блэндфорд перетянул к себе ученика Василия Семеновича Бескина, или теор. отдела ФИАН, кафедры Гинзбурга, к себе в Америку. Посадил его на суперкомпьютер, и они впервые показали, что таки да, модель Блэндфорда–Знайека реализуется. В чем суть модели? Через черную дыру течет ток. По экватору втекает, течет вдоль горизонта и вдоль оси вытекает. В результате возникает вектор Пойнтинга, бьющий вдоль оси вращения черной дыры, и вот он подхватывает и ускоряет частицы. И эта идея, или этот механизм Блэндфорда–Знайека, был блестяще подтвержден множеством симуляций, в которых Чеховской участвует в Штатах. Таки да, возникает там струя, джет бьет. Во времена Мартина Рисса сорок лет назад говорили, ну, наверное, как-то гравитация плюс вращение черной дыры создает этот джет. Теперь это

подтверждается. Работает механизм Блэндфорда–Знайека. В частности, побочным эффектом этого является то, что модель Шакуры–Сюняева абсолютно неприменима при аккреции черных дыр. Потому что это ньютоновская модель, и она не учитывает релятивистские эффекты, и в ней считается, что частицы доходят до минимально устойчивой орбиты, а дальше они падают, и это использовалось во многих и многих работах. Так вот механизм Блэндфорда–Знайека говорит, как раз наоборот. Очень мощное излучение идет прямо непосредственно от горизонта событий черной дыры, потому что вся плазма, текущая на черную дыру, непрерывно греется током. И это и генерирует крупномасштабное магнитное поле, и генерирует струю. Это в симуляциях потрясающим образом видно. И в ближайшие годы Чеховской обещает в эту схему включить траектории отдельных протонов или ядер, и посмотреть, проследить за этой траекторией и как происходит ускорение. С учетом всех потерь, которые можно вложить вот в эти симуляции на суперкомпьютерах. В ближайшие годы это будет сделано. Но до сих пор мы не знаем, где происходит ускорение. Непосредственно у горизонта, или в джете на расстоянии килопарсек, или на расстояниях в мегапарсек в радиоушах. Первая проблема, ответа нет.

Второе, мы толком не понимаем физику джетов. То есть симуляция нам говорит, какие-то получены результаты, но что там реально происходит, джеты из фотонов ли состоят, протонов и электронов, мы до сих пор не знаем.

Следующий важный момент, нетривиальный, это связь с космологией. В космологии, при симуляциях крупномасштабной структуры, распределения галактик или сверхновых, используется уравнение Фридмана. То есть используется общая теория относительности в режиме сильного поля, когда потенциал порядка c^2 . То есть теория работает в режиме сильного поля, работает она или нет, мы не знаем. Потому что теория относительности проверена в режиме слабого поля. Но сейчас подтверждено, что она работает, так как обнаружены сливающиеся черные дыры, гравитационные волны, и Телескоп Горизонта Событий, но при интерпретации космологии мы до сих пор используем уравнение Фридмана. И в суперсимуляциях крупномасштабной структуры, как фон, задается режим развития Вселенной в соответствии с уравнениями общей теории относительности. А работает он или нет, мы не знаем. И отсюда возникла вот эта темная энергия и темная материя. И, как побочный эффект, пошел страшный ливень модифицированных теорий гравитации. Которые сказали: “Так вы же не знаете, какая теория гравитации верна в режиме сильного поля”. Да,

Эйнштейн может быть верен, а, может быть, там работают другие теории гравитации. И вот эта ваша темная энергия и темная материя – это имитация неправильного выбора правильной теории гравитации. Мы должны искать ответ на вопрос, какая же теория гравитации правильная.

Так вот, то, что обсуждается в этой диссертации, и то, что сейчас делается современным экспериментом и будущим развитием, это возможность проверки и нахождения правильной теории гравитации, это, скажем, будущий космический проект Миллиметрон, который может дать ответы на эти вопросы, изучая формы теней черных дыр.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Вячеслав Иванович, Вы извините, у нас очень мало времени.

ДОКУЧАЕВ В.И. Я заканчиваю. Структура диссертации тщательно проработана, язык диссертации лаконичный и ясный. Грамматических претензий к тексту нет, хотя и содержится много мелких опечаток, которые легко преодолеваются при вдумчивом чтении. 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). Спасибо.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо, какие вопросы будут?

ЛУКАШ В.Н. У меня вопрос к оппоненту. Вы сказали, что ответов на основные вопросы нет, мы не знаем ответы на вопросы, которые поставлены

по струям. Но мы будем голосовать за диссертацию Елены Евгеньевны. Какие ответы на вопросы есть в этой диссертации?

ДОКУЧАЕВ В.И. В этой диссертации есть много указаний на то, какой ответ будет правильный. На основе решения многочисленных модельных задач, как теоретически, так и численно, в которых используются формальные, конечно, параметры, но они физически обоснованы автором и всей совокупностью современных публикаций и представлений. И о том, как должно происходить формирование струйных выбросов, как и где может происходить ускорение космических лучей, о которых я говорил в несколько критическом аспекте. Но диссертация содержит потрясающе важные научные результаты.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо, еще какие вопросы? Нет больше вопросов. Так, сейчас ответы на замечания, а потом общая дискуссия. Пожалуйста.

СОИСКАТЕЛЬ: *Отвечает на замечания ведущей организации и оппонентов, демонстрирует слайды 39-45 (см. приложение №2 к стенограмме).*

ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

СОИСКАТЕЛЬ. Я бы хотела поблагодарить Дмитрия Георгиевича Яковлева и оппонентов за высказанные замечания, со многими замечаниями я согласна. Но некоторые замечания я бы хотела прокомментировать. Я не буду полностью их зачитывать (*формулировки замечаний и комментарии соискателя по ним даны ниже*).

1. 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).

СОИСКАТЕЛЬ: Первое замечание касалось использования гравитационного радиуса и возможной потери фактора двойка. В этой и других работах, гравитационный радиус – это масштаб длины при работе с черными дырами. Все используемые формулы учитывают отличие гравитационного радиуса от шварцшильдовского и численный коэффициент явным образом.

ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ ВТОРОГО ОППОНЕНТА

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.*

СОИСКАТЕЛЬ. Имеется в виду формула (4.5) для радиальной компоненты потока энергии, переписанная в виде мощности уже в работе Moderski & Sikora (1996) MNRAS, 283, 854-864, формула (3). Несмотря на отсутствие в статье Блэндфорда и Знаека (1977) прямого упоминания джета, но вычисления проводятся для вращающейся черной дыры, погруженной в регулярное магнитное поле, а в разделе 8 обсуждается применение результатов к активным ядрам галактик.

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?*

СОИСКАТЕЛЬ. Опечатка. Здесь имеется в виду равенство плотностей энергий в системе отсчета плазмы. Ниже употребляются правильные термины.

3. На той же странице дана связь параметров α и p , причём выше на стр.21 упоминались значения p из набора 2.4, 2.5 и 3. Тогда α должно попадать в интервал от -0.7 до -1. Почему же ниже на стр.28 принимается $\alpha = -0.5$ вне этого интервала?

СОИСКАТЕЛЬ. Здесь для сохранения преемственности с другими работами было взято классическое значение показателя степенного распределения электронов по энергиям $p=2$ (что соответствует $\alpha = -0.5$) при ускорении с помощью механизма Ферми первого рода на ударных волнах.

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.

СОИСКАТЕЛЬ. Формула, полученная в предположении о сильно замагниченном течении на расстояниях порядка положения радиоядра, наблюдаемого на частотах 8-15 ГГц, при подстановке наблюдаемых параметров дает характерное значение параметра замагниченности порядка 100. Так как с точностью до фактора 2 это максимальный Лоренц фактор течения, то для характерных ширин ядер, течение в этой области должно быть слабо замагниченным.

ОТВЕТЫ НА ЗАМЕЧАНИЯ ПЕРВОГО ОППОНЕНТА

1. 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 ξ .

СОИСКАТЕЛЬ. В работе это действительно не обсуждалось. Финальные формулы для параметров множественности и замагниченности зависят от параметра ξ в степени 0.25, что является слабой зависимостью.

2. В разделе 1.3 не дано физическое обоснование выбора величины γ_{min} .

СОИСКАТЕЛЬ. Согласна. В работе Wardle D. и др. (1998) на основе поляризации джета из 3C 279 сделан вывод о том, что $\gamma_{min} \ll 100$. Тем не менее, зависимость от этого параметра также слабая: степень 0.25.

3. 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.

СОИСКАТЕЛЬ. Согласна. Действительно, механизм “фотонного бридинга” (Штерн и Путанен, 2006 и 2008 годы) может отвечать за каскадный процесс рождения плазмы.

4. 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 $\Psi_{MAD} < \Psi_{Cs}$, 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.

СОИСКАТЕЛЬ. Такая оценка использовалась по порядку величины. Для оценки Ψ_{MAD} здесь уже использовалась формула $\Psi_{MAD} = 50 \sqrt{\dot{M} r_g^2 c}$ (McKinney et al. 2012), с оценкой $L_{acc} \approx 0.1 \dot{M} c$ (Zamaninasab et al. 2014). Величина Ψ_{Cs} определялась по оценкам величины сдвига ядра, угла раскрыва джета и угла наблюдения. Эти данные различны и могут быть не согласованы с максимальной оценкой для потока, полученной в рамках модели магнитоарестованного диска. Разброс в мощности джетов по оценке величины магнитного поля составляет 4 порядка величины, тогда как разброс средних мощностей составляет 3 порядка. Это связано как с неточностями применения формулы, полученной для корреляции; с точностью определения параметров выброса, например, величины сдвига ядра; с точностью предположений, сделанных в модели. Кроме того, важным фактором различия и разброса может быть изменение мощности джета в процессе эволюции и значимого отличия текущей мощности от средней. Основным результатом здесь является хорошо выраженный пик отношения величин около единицы.

5. 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.

СОИСКАТЕЛЬ. Да, задача решалась без учета комптоновских потерь.

6. В разделе 4.3 обсуждается мощность джета M87 10^{43} эрг/с. В ряде работ (см. Owen 2000) обсуждаются значения в 10-100 раз больше, на уровне несколько 10^{44} эрг/с. Также большие значения мощности джета, на уровне

10^{44} - 10^{45} эрг/с (Barkov 2012), требуются для объяснения ярких 10^{42} эрг/с и коротких (длительность день) вспышек в жестком гамма диапазоне (ТэВ) и постоянного потока на 100 МэВ на уровне $>10^{42}$ эрг/с. Вероятно, такая корректировка благотворно бы повлияла бы на непротиворечивость предложенной модели в разделе 4.3.7.

СОИСКАТЕЛЬ. Согласна. Такая корректировка зависит от параметров, например, от величины внешнего давления в области ускорения. Это исследование необходимо провести и, желательно, на нескольких источниках.

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.

СОИСКАТЕЛЬ. Выбранные огибающие взяты из работы Кутькин и др. (2019) как интервал апостериорной вероятности. Дальше в работе этот интервал использовался для оценок интервалов значений спина как функции радиуса светового цилиндра. Это сделано для трех источников с измеренной непосредственно формой джетов.

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

СОИСКАТЕЛЬ. На масштабы 220 пк экстраполировано значение внешнего давления в предположении, что в этой области давление уже подчиняется степенному закону, соответствующему режиму аккреции Бонди. И это все такие большие замечания, которые я могу прокомментировать.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо большое за Ваши ответы. Теперь диссертация открыта для общей дискуссии. Пожалуйста, кто хочет выступить. Пожалуйста.

ОБЩАЯ ДИСКУССИЯ

ИВАНОВ П.Б. Я просто в качестве комментария, к кинетической мощности в галактике M87. По поводу того, что Максим Барков сказал. Есть еще пятна, HST spots, который излучают, насколько я помню, в рентгене. И по взаимодействию тоже мощность джета на уровне 10^{44} – 10^{45} [эрг/с] получается, насколько я помню, в работе Begelman и других.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо, кто еще хочет выступить. Пожалуйста.

БЕСКИН В.С. По понятным причинам я не могу не выступить, потому что Лена была моей аспиранткой. Но, к сожалению, Сергей Иванович основное уже сказал. Потому что если мы посмотрим на название “астрофизика и звездная астрономия”, то в подавляющем большинстве случаев это либо астрофизика, либо астрономия. А эта диссертация как раз, действительно, на стыке. Я мог в свое время обучить Елену Евгеньевну теоретической астрофизике, но никак не мог обучить ее астрономии. И вот здесь я хочу сказать, что выстрелила Лаборатория Юрия Юрьевича Ковалева, которой Лена теперь будет принадлежать исключительно образом, и вот значительная часть диссертации посвящена была тому, что Елена Евгеньевна, научившись астрономии в Лаборатории Ковалева, смогла вот этот кусок астрономической обработки, на основе теоретических результатов, действительно, в гармонии соединить. И вот это, конечно, совершенно замечательно. Спасибо.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо. Кто еще хочет выступить?

КОВАЛЕВ Ю.А. В онлайн есть.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. На онлайн кто?

КОВАЛЕВ Ю.Ю. Игорь Дмитриевич, у нас по порядку Леонид Ильич Гурвиц первым поднял руку. Я второй.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Хорошо.

ГУРВИЦ Л.И. Спасибо, раз мне слово дали первому, прежде всего, всем добрый день. Рад видеть многих на экране. Мне довелось работать с Еленой Евгеньевной всего в одной работе. Она сегодня частенько была на экране. Цитировалась эта работа по Мессье 87. Я должен признать, что у меня остались самые теплые, приятные воспоминания об этой работе. И, надеюсь, мы сможем продолжить в каких-то других работах. Но хочу я не столько о своих впечатлениях, очень положительных, сколько о значимости этой работы, если посмотреть на нее вот с какой стороны. Фокус работы – это активные галактические ядра. Как мы все понимаем, значительные успехи в исследовании этих объектов связаны с исследованиями с чрезвычайно высоким угловым разрешением. И сейчас мы находимся в интересном таком этапе, когда завершились проекты космических радиоинтерферометров первого поколения. Это VSOP и, конечно, РадиоАстрон. Получены первые результаты с наземной системой Телескопа Горизонта Явлений, ЕНТ. Но следующие инструменты, а они абсолютно необходимы для дальнейших исследований в этом направлении, обязаны иметь угловое разрешение

примерно на порядок выше, чем достигнуто сейчас и на Земле, и в космосе. Так вот, такие системы очень сложны и дороги. Я думаю, многим здесь объяснять не надо, как это сложно. Скажем, РадиоАстрон развивался в течение нескольких десятков лет. Обосновывать создание таких систем приходится сложным образом, убеждая, во-первых, коллег-ученых, которые работают в других областях. А во-вторых, финансирующие структуры, в том, что мы занимаемся важным и интересным делом. Для того, чтобы такие обоснования были убедительными, нужно быть хорошо вооруженным. И вот я хочу повторить то, что говорилось Сергеем Ивановичем Блинниковым, кажется им, что в диссертации много аналитики, которая дает понимание предмета. Физическое понимание. Вот такое понимание чрезвычайно важно для обоснования наших экспериментаторских амбиций. В этом смысле, то, что сделано Еленой Евгеньевной, мне представляется очень ценным, и я могу заверить всех слушающих сейчас меня, что ее работы часто цитируются и будут продолжать цитироваться, когда мы обосновываем дальнейшее развитие нашей отрасли науки. В этом смысле у меня нет никаких сомнений, что диссертация представляет собой очень ценное исследование, что, конечно, она отвечает всем формальным требованиям, а диссертант, безусловно, заслуживает присуждения степени доктора физ.-мат. наук. Спасибо.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо. Юрий Юрьевич, пожалуйста.

КОВАЛЕВ Ю.Ю. Спасибо, коллеги, я буду очень короток, потому что основное, что я хотел сегодня сказать, Василий Семенович уже упомянул. Я, правда, не делил бы нас и то, чем мы занимаемся, на астрофизику и астрономию, а, скорее, на теоретическую астрофизику и на наблюдательную астрофизику. И вот то, что мы пять лет назад как раз вместе с Еленой Евгеньевной и с Василием Семеновичем стартовали, своей основной целью и ставило начать более тесное общение и более тесную совместную работу на стыке теоретической и наблюдательной астрофизики. Когда наши коллеги теоретики, как бы аккуратно выразиться, теряют часть своей свободы, в том смысле, что они значительно более серьезно и внимательно начинают относиться к тому, как их теорию ограничивает наш эксперимент, наши наблюдения. И, фактически, эта докторская диссертация, наверное, как докторская, первая вышла из этого подхода или этого направления, я надеюсь, что первая и далеко не последняя, как раз демонстрирует вот эту вот аккуратность или серьезные ограничения, которые накладываются на теоретика и ограничивают его в полете его фантазии. Но, при этом, дают теоретику возможность значительно более уверенно формулировать свои

модели и свои выводы по физике исследуемых объектов. Мне кажется, это такая хорошая история успеха, и я призываю диссертационный совет голосовать за. Спасибо.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо. Еще кто-нибудь хочет выступить? Если нет, я бы хотел сказать пару слов, и мое замечание содержит вопрос к диссертанту. Вот скажите, Вы неоднократно упоминали о том, что Ваши результаты хорошо совпадают с данными других авторов. В том числе и с данными, которые были получены другими методами задолго даже до Вас. А скажите, как часто Ваши методы могут работать или работают, когда другие методы просто неприменимы по тем или иным причинам.

СОИСКАТЕЛЬ. Живой пример это последняя публикация по NGC 315, где единственным измерением была хорошо промеренная форма границы выброса из этой галактики, и тем не менее, с применением моих методов и других, удалось восстановить много параметров, надеемся, что правильно, пока сложно проверить. Например, получить предельный спин, другими методами это сделать невозможно. Получена величина магнитного потока, она получена и другим методом, и они находятся в очень хорошем согласии, что подтверждает правильность этого метода. Вот один из таких примеров. Метод определения спинов черных дыр или радиуса светового цилиндра, требуется, конечно, проверка этого метода, больше данных, для того, чтобы протестировать его. И эти данные сейчас накапливаются. Но приведенный пример, метод, он не имеет аналогов, и мы надеемся, что он позволит нам сказать что-то и о точке запуска джетов, и о скоростях вращений.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо. Кто еще хочет выступить? Пожалуйста.

БАРКОВ М.В. Скажу пару слов. Из опыта, мы делали модели, и здесь, в работе, как раз предложены аналитические работы, которые суммируют и упрощают численные результаты и приводят его в удобоваримый вид, который можно использовать в нормальных условиях. Это очень хорошо, потому что, например, ну вот я на своем опыте встречал ситуации, когда мы делаем какие-то оценки для гамма-астрономии, и у нас просто в нулевом приближении модель джета не проходит. Приходится как раз использовать неоднородную структуру. Вот если использовать неоднородную структуру, то модель вписывается гораздо лучше. И вот как раз предложенные вариации с неоднородными джетами, как их употреблять, это, я считаю, очень полезная вещь. Так что это как раз такой симбиоз.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ. Спасибо. Еще желающие есть? Нет. Тогда будем считать общую дискуссию закрытой. И заключительное слово предоставляется Вам.

СОИСКАТЕЛЬ. Спасибо большое. Я бы хотела в заключительном слове выразить благодарности. Самая первая и главная благодарность, самая теплая, моему научному руководителю Василию Семеновичу Бескину, с которым мы вместе продолжаем работать, и который всегда оказывает поддержку и помощь, которая особенно важна на начальных этапах. Но она важна периодически всегда в течение всей карьеры. Спасибо Вам большое. Я бы хотела выразить благодарность Ковалеву Юрию Юревичу, с которым мы совместно очень много работали, пять лет существования лаборатории, и это совершенно беспрецедентный опыт. Я очень надеюсь, что такое сотрудничество, дистанционно, но не менее плотно, будет продолжено и дальше. Я бы хотела выразить благодарность всем моим соавторам, в первую очередь Саше Плавину, Саше Пушкареву, Илье Пащенко, Леониду Гурвицу за совместную работу. Дмитрию Георгиевичу Яковлеву и оппонентам, Вячеславу Ивановичу Докучаеву, Сергею Ивановичу и Максиму Владимировичу за их труд изучить диссертацию, сделать ценные замечания, и всему диссертационному совету за время, потраченное на защиту этой диссертации. Спасибо большое.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо большое. Теперь переходим к процедуре голосования.

ТАЙНОЕ ГОЛОСОВАНИЕ

СЕКРЕТАРЬ. Да, спасибо! Индивидуальные ссылки на электронные бюллетени для голосования уже разосланы по адресам почты в системе Криптовече. Я напоминаю процедуру. Для того, чтобы проголосовать, нужно пройти по ссылке из письма, зайти в свой личный кабинет в Криптовече, сначала зарегистрироваться в голосовании, будет выдан электронный бюллетень, и в электронном бюллетене нужно будет выбрать один из вариантов: за или против. Если будут выбраны оба варианта или не выбрано ни одного, то такой бюллетень будет учтен как недействительный. Как всегда, вы знаете, что у нас здесь есть компьютер специально для голосования, установлен в зале заседаний. Либо вы также можете пользоваться своими личными устройствами: компьютерами, ноутбуками, смартфонами. Я полагаю, мы можем объявить перерыв 15 минут на голосование.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Тогда объявляется перерыв на 15 минут для проведения тайного голосования, значит мы вернемся ровно в половине третьего. Так я понимаю.

Перерыв на голосование 15 минут. В течение перерыва все присутствующие на заседании члены диссертационного совета голосуют в системе для удаленного тайного голосования «Криптовече».

СЕКРЕТАРЬ: Уважаемые коллеги, все на месте собрались. Голосование завершено. Сейчас я выведу на экран результаты голосования. Всего голосовало 16 человек, роздано 16 электронных бюллетеней. За — 16, против — 0, недействительных бюллетеней — 0. Таким образом, единогласно. По итогам голосования сформирован протокол о результатах электронного тайного голосования, который вы также видите на экране.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Спасибо. Нам надо утвердить протокол голосования. Кто за то, чтобы этот протокол утвердить? Утверждено. Теперь нам надо принять заключение диссовета.

СЕКРЕТАРЬ: Проект заключения рассылался по электронной почте, все замечания были учтены. Традиционно от Дмитрия Зигфридовича, от Рустама Давудовича. Большое спасибо.

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ: Есть еще замечания? Нет дополнительных замечаний. Тогда будем голосовать. Кто за то, чтобы принять заключение? Спасибо. Единогласно. Тогда поздравляем Вас с успешной защитой! (Аплодисменты).

КОВАЛЕВ Ю.Ю. Коллеги, я останавливаю запись этого заседания.

Заседание закрывается.

Председатель заседания,
председатель диссертационного совета,
д.ф.-м.н., член-корр. РАН

И.Д. Новиков

Секретарь заседания, учёный
секретарь диссертационного совета,
к.ф.-м.н.

Н.Н. Шахворостова

28 сентября 2022 г.