

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф-м.н. Баркова Максима Владимировича, ведущего научного сотрудника отдела Физики и Эволюции Звезд ИНАСАН, на диссертационную работу Бутузовой М.С. "Джеты активных ядер галактик на различных пространственных масштабах: форма, ориентация, физические условия и переменность наблюдаемых параметров" представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.01 — "Физика космоса, астрономия".

Диссертация посвящена актуальной и важной для понимания природы Вселенной теме — физике активных ядер галактик (АЯГ). АЯГ одни из самых ярких объектов известных человечеству и глубокое понимание их устройства представляет живой интерес.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Введение содержит обзор современных данных о процессах в джетах АЯГ и их наблюдательных проявлениях, обоснование актуальности темы, а также цели и задачи исследования. Здесь же раскрываются научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, перечисляются методы. Завершают введение положения, выносимые на защиту, данные об апробации и личный вклад соискателя в совместные труды.

В первой главе разработана геометрическая модель винтового джета с нерадиальным движением компонентов, применённая к блазарам S5 0716+714 и OJ 287 на парсековых масштабах. На основе РСДБ-наблюдений введена модель, в которой ось джета образует винтовую линию на поверхности конуса, и получены выражения для изменения угла между лучом зрения и скоростью компонента при его движении по радиальной и нерадиальной траекториям. Проведён совместный анализ скоростей и позиционных углов деталей джета, а также показано, что корреляция между наблюдаемыми величинами (например, оптическим излучением и позиционным углом внутренней области) меняется со временем, а отношение периодов переменности определяется отношением расстояний соответствующих областей от вершины конуса. Для блазара OJ 287 по 145 эпохам 15 ГГц РСДБ-наблюдений выявлено изменение позиционного угла, параметры модели согласуются с развитием неустойчивости Кельвина–Гельмгольца. Предполагая, что винтовая форма вызывает 12-летние оптические вспышки, вековое изменение их пикового потока интерпретировано прецессией джета с периодом 1200 лет в системе отсчёта источника, что возможно объясняется эффектом Лензе–

Тирринга. Модельная кривая блеска хорошо согласуется с наблюдениями. Все результаты главы, кроме данных по изменению позиционного угла OJ 287, получены диссертантом лично.

Во второй главе моделируются поперечные распределения поляризации джета для разных топологий магнитного поля. Рассмотрены винтовое поле и структура «канал-оболочка». Показано, что только винтовое поле и нерадиальное движение компонентов позволяют воспроизвести наблюдаемые распределения степени и направления поляризации, включая смену продольного и поперечного направления по разные стороны джета. Проведено сравнение с наблюдениями квазаров и выявлено, что винтовая форма джета объясняет разнообразие распределений независимо от параметров модели. Все результаты получены диссертантом единолично.

Глава 3 посвящена исследованию оптической переменности блазаров S5 0716+714 и S5 1803+784 для изучения физических условий в джете на субпарсековых масштабах. Проведён анализ внутрисуточной переменности блеска и фотометрических параметров этих объектов. Предложена модель кратковременной переменности, основанная на наличии в джете субкомпонентов с повышенным доплер-фактором, что объясняет быстрые изменения яркости и цвета. Показано, что наблюдаемое «посинение» спектра при росте яркости связано с изменением наклона спектра из-за синхротронного самопоглощения. Разработан метод обработки данных TESS для анализа переменности блазаров. Проведена оценка напряжённости магнитного поля в излучающей области.

Глава 4 посвящена определению ориентации, физических параметров и механизмов рентгеновского излучения джетов квазаров на килопарсековых масштабах. Рассмотрены основные механизмы образования рентгеновского излучения: обратное комптоновское рассеяние фотонов реликтового фона (IC/CMB) и рассеяние излучения парсекового джета. Проведён анализ, показывающий, что джеты с рентгеновским излучением сохраняют скорость и направление с парсековых масштабов, а без рентгена — замедляются или изгибаются. Величина изгиба примерно в полтора раза меньше угла парсекового джета с лучом зрения. Большинство результатов получено диссертантом лично.

В Заключении представлены положения, выносимые на защиту.

Замечания:

В разделе 1.3 приводятся модельные кривые и текстовое описание значения наблюдаемых сверхсветовых движений в джете. Хорошо было бы привести модельную кривую и наблюдательные значения на одном графике.

Переход в формуле 1.20 не мотивирован. Доплер фактор не будет меняться если мал угол $\theta \cdot \Gamma$.

Раздел 1.5.2 смотрится анахронизмом. Анализ основан на работе Харди 1982 года, где рассматривается гидродинамический джет. При этом автор осведомлен о современных трендах в устройстве джетов АЯГ, т. к. правомерно ссылается на работы Бескина, Нохриной и других, где рассматривается МГД джеты. Соответственно, автору стоило бы провести анализ на устойчивость джета к желобковой неустойчивости (kink instability).

Анализ на прецессию Лензе-Тирринга проведен поверхностно. Оценка времени прецессии из работы Лю не позволяет объяснить наблюдаемый период при разумных параметрах аккреции. Автору стоило бы подставить реалистичные значения альфа параметра и скорости вращения ЧД, и аккреционного темпа необходимого для работе механизма Блэндфорда-Знаека. Формула 1.41 представляет просто частоту Лензе-Тирринга для свободной частицы, тогда как автору необходима частота прецессии диска, что, в свою очередь, свяжет ее с параметрами диска (см. Журавлев и др 2014).

В главе 2 рассматриваются две модели «винтовая» и «оболочка». Естественным было бы исследовать и третью конфигурацию, когда спиральное поле обвивает центральное полоидальное ядро, что должно естественным образом формироваться у джетов ускоряемых магнитным полем.

На странице 93 обсуждается изменение скорости от 0.998 до 0.9994 и утверждается, что это изменение на 30%.

В разделах 3.3 и 3.4 не обсуждаются размер физические свойства бловов.

Формула 3.4 пропущен знак минус.

В разделе 3.7 принятие размера излучающей области за размер горизонта физически не обосновано. Автор мог бы дать ограничение на размер излучающей области из кратчайшего времени переменности (которое рассматривается в разделе 3.8). Далее получена оценка на размер оптического ядра, но она не используется автором.

Рисунок 3.17 является загадкой. Формула 3.9 дает степенную функцию наблюдаемая частота в степени 5 и Доплер фактор в степени -3. 1) Автор смог подменить эту комбинацию одной частотой в сопутствующей системе координат. Далее, магнитное поле B приведено в логарифмической шкале, сопутствующая частота в линейной, при этом построенные зависимости представляют из себя прямые, чего не должно быть. Диапазон значений сопутствующей частоты от $1.5 \cdot 10^{13}$ до $4 \cdot 10^{13}$ Гц, с учетом центральной частоты I фильтра $3.3 \cdot 10^{14}$, подразумевает вариацию Доплер фактора в зоне излучения в диапазоне 8-23. Т.к. размер оптического ядра около $6 \cdot 10^{14}$ см, то для СМЧД с массой $5 \cdot 10^8$ солнечных он соответствует $4 R_g$ в метрике Керра или, в лучшем случае, одному световому цилиндру. В случае гидродинамического джета лорентц фактор не может превышать 4, а в случае магнитного джета лорнц фактор будет менее 2. Т.е. считать сделанные оценки магнитного поля корректными нельзя.

Страница 120. Утверждение, что наблюдения подтверждают модель, слишком оптимистичное. ВВВ получается при любом механизме дающем выпуклый спектр, не

обязательно при синхротронном самопоглощении. Критика оценки напряженности магнитного поля приведена выше.

Работы 196 и 197 считать независимыми затруднительно. Т.к. Тавекио и Гизелини работают в одной научной группе.

Секция 4.1 предположение, что излучение пропадает, т. к. джет тормозится, не мотивировано. Релятивистские электроны ответственные за излучение в рентгене остынут в поле джета за несколько десятков лет или на дистанции до 100пк. Для формирования кпк джетов в рентгене требуется впрыск/ускорение высокоэнергичных электронов вблизи области излучения.

В уравнении 4.7 и 4.8 не учитывается доплер бустинг реликтового излучения при переходе в СО джета, эффект пропорционален доплер фактору в кубе.

На страницах 139-140 обсуждается ОКР от джета ЦИ. Введена поправка на разные доплер факторы в кпк джете и у наблюдателя. Однако, пренебрегается изменяемой во времени диаграммой направленности ЦИ. Светимость джета может существенно отличаться 10 000 лет назад от современно, фотоны которые формировали ОКР сигнал наблюдаемый в данный момент. Т.е. основываться на современном сигнале ЦИ не обоснованно. Не совсем ясно, почему предполагается один и тот же спектральный индекс у электронов ЦИ и у кпк джета.

В современных работах используется многокомпонентная модель излучения ОКР которые учитывают реликтовое, собственное синхротронное излучение, излучение тора, в случае кпк джета, надо учитывать излучение ЦИ и звезд родительской галактики. По крайней мере, хотелось бы видеть аргументированный разбор влияния всех этих факторов на рентгеновское излучение кпк джета. Ограниченная попытка была сделана на страницах 141-142, но т. к. в выражении 4.8 не учитывался доплер бустинг для реликтовых фотонов, выражения 4.23 и 4.24 оказываются не верными.

Автору было бы полезно провести общий анализ энергетического бюджета. К примеру, посмотреть время остывания электронов в поле реликтового излучения, ЦИ и магнитных полей полученных из предположения равномерного распределения и по методике автора. Все эти времена надо сравнивать с временами на адиабатические потери. Хорошо было бы сравнить с гипотезой происхождения рентгеновского кпк джета за счет синхротронного излучения. От этого исследование только выиграло.

В работе не учитывались сечения Кляйна-Нишины, хотя автор на расунке 4.10 строит кривые до $1.e30$ Гц или $1.e16$ эВ (по порядку), в этом диапазоне необходимы релятивистские поправки.

Опечатки:

На странице 13 в разделе Публикации автор утверждает, что диссертация основана на 12 статьях, после чего приводит список содержащий 18 публикаций. В Автореферате указано 18 публикаций.

Стр 111 ссылка на работы [164-1666].

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертации М.С. Бутусовой. Вынесенные автором на защиту положения являются новыми, актуальными и обоснованными. Они неоднократно докладывались на международных конференциях и

семинарах, а также опубликованы в рецензируемых ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Полученные результаты уже используются и будут востребованы в ведущих Российских астрономических учреждениях: САО РАН, ГАИШ МГУ, ФИАН им. П.Н. Лебедева, ИКИ РАН, СПбГУ, ИНАСАН.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертация Бутузовой Марины Сергеевны «Джеты активных ядер галактик на различных пространственных масштабах: форма, ориентация, физические условия и переменность наблюдаемых параметров», представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 — "Физика космоса, астрономия", полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года No 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

д.ф.-м.н.

Барков Максим Владимирович

ведущий научный сотрудник,

отдел физики и эволюции звезд,

ИНАСАН,

119017, г. Москва, ул. Пятницкая 48

barkov@inasan.ru

30 Марта 2026 года.

Подпись Баркова Максима Владимировича заверяю.