



ICRANet

International Center for Relativistic Astrophysics Network

Pescara, 13/06/2022

Prot. 4332

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

СААКЯНА НАРЕКА ВАРДАНОВИЧА

«Study of Multiwavelength and Neutrino Emission from Blazars»,

представленную на соискание степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «теоретическая физика».

Диссертационная работа Саакяна Нарека Вардановича «Study of Multiwavelength and Neutrino Emission from Blazars» соответствует области «физика» и специальности 01.04.02 – «теоретическая физика».

Актуальность темы диссертации обусловлена значительным прогрессом в наблюдательной астрофизике за последние десятилетия, в первую очередь вводу в строй множества телескопов, работающих в широчайшем диапазоне частот электромагнитных волн от радио вплоть до гамма квантов очень высоких энергий. Таким образом, речь идет об одновременном наблюдении определенного объекта практически во всем спектре электромагнитного излучения – так называемая многоволновая астрономия. Кроме того, впервые представляется возможным связать электромагнитные наблюдения с другими источниками информации, а именно нейтрино и гравитационными волнами. В связи с этим, как обычно, возникает необходимость обработки большого количества порой разрозненных данных, а также скорейшего развития соответствующих теоретических моделей.

Диссертация выполнена на острие науки, где новейшие данные и средства их анализа позволяют открывать новые объекты, устанавливать их свойства, а также разрешать остающиеся нерешенными годами и десятилетиями вопросы. Все эти три важных момента отражены в настоящей диссертации. Во-первых, развиты новые методы обработки и визуализации данных, например методика SED/light curve animation. Во-вторых, установлено, что многоволновые данные наблюдений блазаров 3C 454.3 и 1ES1218+304 за большие промежутки времени (около десяти лет), в том числе в моменты вспышек, хорошо описываются в рамках однозонной лептонной модели. В то же время, наблюдения блазара BL Lac с 2008 по 2021 годы и блазара CTA 102 за период 2016-2017 в момент сильной вспышки показал, что такая модель недостаточна для описания данных. В-третьих, найден новый тип объекта - транзиентный блазар 4FGLJ1544.3-0649, свойства которого должны учитываться при описании космологической эволюции в популяционных моделях этих внегалактических источников. В четвертых, составлены новые каталоги блазаров. В-пятых, с высокой степенью достоверности установлено, что именно блазар TXS 0506+056 является источником астрофизических нейтрино высоких энергий, зарегистрированных телескопом IceCube. Показано, что блазар PKS 0502+049, также находящийся в области неба, соответствующей нейтринному сигналу телескопа IceCube, не подходит на роль источника зарегистрированного нейтрино. Все эти результаты определяют **научную новизну** настоящей диссертации.

Выводы диссертации представляются полностью **обоснованными и достоверными**.



ICRANet

International Center for Relativistic Astrophysics Network

Практическая значимость работы состоит в возможности использования разработанных методов анализа данных для получения информации о физической природе джетов блазаров, а также о механизмах излучения в них. Эти методы могут применяться к другим объектам, что заметно облегчается ввиду создания новых каталогов блазаров, и их систематическому представлению в свободном доступе для всего научного сообщества.

Все результаты диссертации проходили **апробацию** на международных научных конференциях и достаточно полно представлены в научной литературе. Список работ соискателя по теме диссертации содержит 41 работу, причем 7 работ соискатель опубликовал без соавторов.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации и основные ее результаты, а также положения диссертации, выносимые на защиту.

Рассмотрим основные научные результаты, полученные в диссертации.

В **главе 1** представлены результаты исследования многоволнового излучения типичного блазара 3C 454.3. Показано, что данные наблюдений за период с 2007 по 2018 годы хорошо описываются стандартной однозонной лептонной моделью с 4 компонентами и 6 свободными параметрами. Геометрические размеры областей излучения (компонент) фиксируются, по всей видимости, исходя из времени переменности в разных областях спектра. Анализ данных наблюдений показал, что периоды активности в области высоких энергий соответствуют большим значениям Лоренц-фактора релятивистского джета.

В **главе 2** аналогичное исследование проводится для блазара BL Lac за период с 2008 по 2021 годы. Большое внимание уделяется комбинированию данных инструментов FERMI и SWIFT, имеющих на борту телескопы, работающие в разных диапазонах частот: от оптического до жесткого гамма-излучения. В результате получены квази-одновременные многоволновые спектры, используемые в дальнейшем для нахождения физических параметров модели. Продемонстрирована особая роль данных в мягком рентгеновском диапазоне, а также в очень высоких энергиях, в частности телескопа MAGIC, объяснение которых с необходимостью требует использование двухзонной модели, в отличие от простейшей однозонной. Здесь также обсуждаются возможные сценарии появления второй области излучения, такие как изменение свойств джета, роль протонной компоненты.

Глава 3 диссертации посвящена исследованию многоволновых данных блазара 1ES1218+304 за период с 2008 по 2020 годы. Спектры блазара в спокойном состоянии моделируются в однозонной лептонной модели. Показано, что данные наблюдений лучше описываются степенным спектром электронов с экспоненциальным обрезанием, нежели степенным спектром с изломом, тем более что последний не согласуется с моделями ускорения частиц. В разделе 3.3 численно решается уравнение переноса для электронов с источником и радиационными потерями. Утверждается, что в предположении постоянной инжекции ускоренных электронов наблюдаемый спектр фотонов воспроизвести не получается.

В **главе 4** представлены результаты исследования блазара STA 102 за период 2016-2017 годов, когда была зарегистрирована сильная вспышка этого объекта на основе данных телескопа FERMI. Установлено, что наблюдаемый спектр может объясняться, используя различные предположения о природе излучающих областей, но такое объяснение требует нескольких различных источников. В рамках лептонного механизма показано, что спектр электронов описывается механизмом диффузионного ускорения в ударных волнах.

Глава 5 посвящена анализу транзиентного блазара 4FGLJ1544.3-0649, обнаруженного телескопом FERMI в 2017 г. Получены кривые блеска и спектры в широкой области частот, с привлечением данных телескопа



ICRANet

International Center for Relativistic Astrophysics Network

SWIFT и радио наблюдений. Данные наблюдений снова объясняются однозонной лептонной моделью. Показано, что открытие этого переменного блазара имеет важные следствия для популяционного анализа блазаров, где подобные объекты ранее не рассматривались. Подчеркивается необходимость дальнейшего исследования таких объектов, особенно в связи с открытием внегалактических нейтрино, источниками которых могут являться такие переменные блазары.

В **главе 6** диссертации представлены каталоги 126 блазаров NuBlazar, основанный на данных телескопа NuSTAR, а также каталог рентгеновских объектов, наблюдаемых телескопом SWIFT одновременно с гамма-всплесками. Описываются процедуры составления каталогов, основанные на автоматической обработке данных. Представленные алгоритмы обработки данных, в частности, построения спектров, используются в других главах диссертации, например в главе 4. Дается также описание некоторых типичных объектов. Стоит заметить, что оба каталога составлены коллективом с большим числом авторов.

В **главе 7** исследуется область неба вблизи нейтринного события IceCube-170922A и происхождение излучения высоких энергий от объектов TXS 0506+056 и PKS 0502+049. Обстоятельное исследование гамма излучения высоких энергий в области детектирования нейтринного телескопа IceCube позволило с высокой степенью достоверности ассоциировать блазар TXS 0506+056 как источник нейтрино и, соответственно, космических лучей. Этот вывод получен на основе исследования свойств, кривых блеска и многоволновых спектров объектов в области нейтринного сигнала. В частности показано, что лептонная модель не объясняет наблюдаемую яркость и переменность спектра излучения данного блазара в области 10 ГэВ.

Следующая **8 глава** диссертации посвящена моделированию электромагнитного и нейтринного излучения блазара TXS 0506+056 в рамках лепто-адронной модели. Собраны наблюдения со всех доступных инструментов и составлены спектры блазара как в обычном состоянии, так и в состоянии вспышки, в течение которой было зарегистрировано нейтринное событие. Показано, что лепто-адронная модель согласуется с результатами наблюдений. Однако, такая модель содержит заведомо большее число параметров, нежели традиционная лептонная модель, причем остро стоит вопрос о вырождении по этим свободным параметрам.

В заключительной **9 главе** диссертации представлены результаты исследования другого объекта из области неба вблизи нейтринного события IceCube-170922A, а именно блазара PKS 0502+049. В частности, поскольку этот объект расположен вблизи блазара TXS 0506+056, он также рассматривался как кандидат на роль источника нейтрино. Анализ данных и их моделирование в рамках лепто-адронного сценария для этого источника показали, что хотя поток нейтрино можно согласовать с наблюдениями, светимость протонов оказывается слишком высока. Моделирование электромагнитного излучения этого блазара также проводится в рамках лептонной однозонной модели. Анализ наблюдений в жестком гамма диапазоне показал, что несмотря на то, что источник характеризовался вспышками до и после зарегистрированного нейтринного события, непосредственно в момент детектирования такой вспышки не наблюдалось.

В целом диссертация Нарека Вардановича Саакяна представляет собой законченную научно-исследовательскую работу высокой научной значимости. В диссертации сделано существенное развитие актуального научного направления, содержатся принципиально новые результаты, которые признаны мировым научным сообществом. Свидетельством тому является публикация результатов в ведущих рецензируемых журналах и высокий уровень цитируемости этих публикаций.

По работе, однако, следует сделать следующие **замечания**:



ICRANet

International Center for Relativistic Astrophysics Network

1. Формулировка основных положений, выносимых на защиту, чрезмерно многословна (напр. положение 2), и недостаточно конкретна, например положение 4) «... providing important information on the particle acceleration in the jet of CTA 102»: какую информацию?. Как известно, основные положения диссертации необходимо формулировать предельно конкретно и кратко.
2. Поскольку большая часть работы посвящена физическому моделированию излучения блазаров, следовало бы подробнее остановиться на описании используемой однозонной лептонной модели, а также ее модификаций. Рисунка 1 во введении явно не достаточно. Это описание почти идентично повторяется практически во всех главах, повторяются даже формулы, напр. 2.1, 3.2, 4.4, 8.1, 9.1. То же касается выражения для времени охлаждения электронов (1.2), (4.6) и (5.1). Определения фитирующих функций, используемых в главах 1 - 3 даны только в главе 3 (формулы 3.1 – 3.2). Затем эти же формулы повторяются в главе 4 (4.1-4.3).
3. Размер иллюстраций в некоторых частях диссертации неудовлетворительный: текст на графиках не читаем. Особенно это чувствуется в графиках с большим количеством данных, напр. рис. 3.3, 3.6, 4.3, 5.3, 6.16-6.22, 7.9, 8.1.
4. Текст диссертации не вычитан подобающим образом, имеются опечатки на стр. 45, 55, 58, 75, 91, 94, 111, 196, 200. Очевидны огрехи объединения статей, см., например, выражения в начале раздела 3.1 на стр. 59, или на стр. 91 и 94. В главе 3 на стр. 66 имеется неверная ссылка на раздел 4.4 (должно быть 3.4).
5. Таблицу 6.5, занимающую 12 листов, следовало бы разместить в приложении.
6. Глава 6 диссертации посвящена в целом астрономической задаче, слабо коррелирующей с физическим содержанием диссертации, и имеющая отдаленное отношение к специальности 01.04.02 – «теоретическая физика». Кроме того, она основана на нескольких работах с большим коллективом авторов, поэтому возникает вопрос об определении вклада соискателя.
7. В главах 8 и 9 формулы приведены по ходу текста без нумерации.
8. Литература приведена в алфавитном порядке по фамилии первого автора, но в тексте нумеруется арабскими цифрами, что выглядит неестественно.

Приведенные замечания нисколько не умаляют ценности данной работы, выполненной на высоком научном уровне.

Считаю, что диссертационная работа Нарека Вардановича Саакяна «Study of Multiwavelength and Neutrino Emission from Blazars» удовлетворяет всем требованиям ВАК Армении, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 01.04.02 – «теоретическая физика», а ее автор, безусловно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук, поскольку им получен ряд новых научно-обоснованных теоретических результатов, которые в совокупности является крупным достижением в физике и релятивистской астрофизике.

Профессор ICRANet,

доктор физико-математических наук,



Г. В. Верещагин

ICRANet