

УТВЕРЖДАЮ:
Заместитель директора
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Физико-технического института
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,

_____/С.В. Лебедев/

« 26 » апреля 2017 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу **ПТИЦЫНОЙ Ксении Владимировны «Происхождение космических лучей, нейтрино и гамма-излучения в окрестностях сверхмассивных черных дыр в центрах галактик»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Диссертационная работа К.В. Птицыной посвящена изучению возможности происхождения космических лучей сверхвысоких энергий ($>10^{18}$ эВ), высокоэнергичных нейтрино и гамма-излучения в рамках модели ускорения заряженных частиц в электрическом поле, формирующемся в окрестностях вращающихся аккрецирующих сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик. Исследования различных аспектов физики космических лучей, астрофизических нейтрино и космического гамма-излучения (в том числе, происхождения, распространения, взаимодействия с веществом) относятся к фундаментальным, основополагающим исследованиям физики, астрофизики и космологии. Благодаря наличию существенного потока космических лучей во всех доступных измерениям диапазонах энергий выше ГэВ, они не только сами по себе всегда являлись объектом передовых исследований, но способствовали получению принципиально новой информации в различных областях физики. Достаточно вспомнить, что революция в экспериментальной физике элементарных частиц в 1930-х годах, начавшаяся с открытия позитрона Карлом Андерсоном, произошла именно благодаря наблюдениям космических лучей. Позже были построены ускорители элементарных частиц, в исследованиях на которых были блестяще подтверждены многие выводы, сделанные на основании наблюдения элементарных частиц в широких атмосферных ливнях, порожденных частицами космических лучей. Но и после этого космические лучи остаются источником новой информации для специалистов, поскольку в их спектре присутствуют частицы с энергиями, недостижимыми для современных и даже планируемых наземных ускорителей. Нейтрино благодаря своей колоссальной проникающей способности и отсутствию электрического заряда открывают для специалистов новое окно возможностей для наблюдения далеких астрофизических объектов и проверки наличия экзотических форм материи (например, топологических дефектов с массой более 10^{20} эВ). В свою очередь, гамма-излучение позволяет исследовать наиболее высокоэнергичные явления, происходящие в Галактике и за ее пределами, связанные со взрывами звезд на поздних стадиях эволюции, слиянием звезд, распространением ударных волн, мощными высокоскоростными истечениями,

формирующиеся в окрестности сверхмассивных черных дыр в ядрах активных галактик. Изучение процессов, происходящих в таких физических системах, важно для создания целостных моделей этих объектов и явлений и проверки адекватности теоретических моделей физики элементарных частиц в диапазоне энергий выше 100 ТэВ. Наблюдения гамма-излучения позволяют установить пределы на концентрацию первичных черных дыр малых масс ($\sim 10^{15}$ г), что чрезвычайно важно для правильного понимания эволюции ранней Вселенной. Значительные усилия научного сообщества направлены на организацию масштабных экспериментов по наблюдению космических лучей, астрофизических нейтрино и космического гамма-излучения. Среди них есть как космические (PAMELA, AMS-02, Fermi, AGILE и др.), так и наземные (KASKADE, Pierre Auger Observatory, AGASA, TAIGA, H.E.S.S., VERITAS, MAGIC, ARGO-YBJ и др.). Постоянный поток новых экспериментальных данных требует усилий со стороны физиков-теоретиков по разработке и совершенствованию моделей астрофизических объектов – источников космических лучей, нейтрино и гамма-излучения. Следует отметить, что сверхмассивные черные дыры, расположенные в центральных областях галактик, считаются одними из наиболее вероятных кандидатов на роль источников всех указанных форм излучения. В силу сказанного выше, диссертация Птицыной К.В. безусловно является актуальным научным исследованием, идущим в ногу со временем.

Представленная диссертационная работа К.В. Птицыной состоит из введения, трех глав и заключения. Во Введении дан краткий обзор состояния исследуемых вопросов, обоснована актуальность работы, определены предмет и цели исследования, обоснованы научная новизна и практическая значимость работы и обозначен личный вклад автора в выносимые на защиту основные результаты. Также во Введении приведены положения, выносимые на защиту, дана информация об апробации диссертации и приведен список основных публикаций по теме диссертации.

Первая глава диссертации посвящена построению модели популяции сверхмассивных черных дыр с неидентичными параметрами как источников космических лучей сверхвысоких энергий. В рамках этой задачи дано описание модели ускорения заряженных частиц в зазоре в полярной области, оценена энергия ускоренных таким образом протонов и сопутствующих гамма-квантов. Рассчитан модельный спектр космических лучей с учетом эволюции источников и эффектов распространения космических лучей от источника к наблюдателю, а также спектр сопутствующего гамма-излучения. Рассмотрены ограничения на параметры модели популяции, проведена ее проверка на самосогласованность. Показано, что предложенная модель популяции источников успешно описывает наблюдаемый спектр космических лучей сверхвысоких энергий и удовлетворяет необходимым ограничениям (в частности, полный поток сопутствующего гамма-излучения не превышает наблюдаемый поток диффузного фонового гамма-излучения в гигаэлектронвольтном диапазоне энергий).

Вторая глава посвящена детальному изучению особенностей формирования зазора с учетом свойств радиационно-неэффективного аккреционного потока. Рассчитана ширина зазора для широкого диапазона параметров источника. Методом Монте-Карло проведено численное моделирование ускорения, распространения и излучения частиц в вакуумном зазоре. Исследованы возможные наблюдательные

проявления зазоров в гамма-спектрах блазаров и радиогалактик. Показано, что в гамма-спектре зазора в магнитосфере черной дыры, погруженной в радиационно-неэффективный поток высокой светимости $L > 10^{43}$ эрг/с (при массе черной дыры $3 \cdot 10^9 M_{\text{Sun}}$), доминирует излучение, обусловленное обратным комптоновским рассеянием с супер-экспоненциальным завалом в области гамма-излучения высоких энергий. При этом величина энергии обрезания определяется свойствами аккреционного потока и не зависит от геометрии зазора. В случае аккреционного потока низкой светимости $L < 10^{41}$ эрг/с (при массе черной дыры $3 \cdot 10^9 M_{\text{Sun}}$) в спектре от зазора доминирует синхротронное или изгибное излучение в диапазоне 1 – 100 ГэВ. Характерные особенности в спектрах излучения вакуумного зазора могут быть использованы для проверки этой модели.

При рассмотрении ускорения протонов в вакуумных зазорах с размером, меньшим радиуса горизонта, показано, что в случае медленно вращающихся черных дыр (параметр момента $a \sim 0.1 M$) при наличии магнитных полей, близких к экстремальным значениям $\sim 10^4$ Гс (соответствующим эддингтоновскому пределу светимости при $M_{\text{BH}}=10^9 M_{\text{Sun}}$) энергии ускоренных протонов могут достигать значений порядка 10^{18} эВ и более.

Третья глава посвящена анализу ограничений на адронные модели гамма-излучения блазаров. Путем совместного анализа спектра высокоэнергичных астрофизических нейтрино (по данным эксперимента IceCube) и спектра гамма-излучения (по данным орбитального телескопа Fermi/LAT) получены некоторые ограничения на модели ускорения адронов в вакуумном зазоре. Показано, что с наблюдательными данными не согласуются те модели, в которых гамма-излучение возникает в каскадах, вызванных ускоренными на ударном фронте протонами при взаимодействии с фотонами из ультрафиолетового поля излучения в центральной области активного галактического ядра. Модели, в которых спектр протонов имеет острый пик в диапазоне ультравысоких энергий могут быть согласованы с наблюдательными данными. Примером такой модели является модель ускорения протонов в вакуумных зазорах магнитосфер черных дыр. Используемые наблюдательные данные позволяют ограничить параметры этой модели (светимость и магнитное поле в радиационно-неэффективном потоке, окружающем черную дыру).

В Заключении суммированы выводы диссертационной работы в целом и указаны некоторые перспективы дальнейшего развития исследований в рамках тематики диссертации.

Научная новизна данной работы заключается в следующем:

(i) Впервые построена модель популяции источников космических лучей сверхвысоких энергий, удовлетворяющая как условию их многочисленности, так и имеющимся наблюдательным данным.

(ii) Впервые исследованы основные особенности характерного гамма-излучения высоких энергий вакуумного зазора в магнитосфере сверхмассивной черной дыры в широком диапазоне значений параметров источников методом Монте-Карло моделирования движения электронов в магнитосфере черной дыры с детальным учетом структуры магнитосферы и спектра излучения аккреционного потока.

(iii) Получены наиболее строгие на данный момент ограничения на адронные модели гамма-излучения блазаров.

Достоверность и **обоснованность** полученных результатов обеспечена использованием адекватных аналитических и численных методов в рамках разумных физических приближений, сравнения результатов с результатами, полученными другими авторами, апробацией на международных и российских конференциях, на семинарах и в статьях. По теме диссертации автором опубликовано 4 работы, из них 3 – в изданиях, входящих в перечень ВАК. Работы автора широко цитируются как отечественными, так и иностранными специалистами.

Результаты диссертации доложены на ряде международных и российских конференций.

Полученные результаты имеют **значительную теоретическую и практическую значимость**.

К сожалению, следует отметить, что представленная диссертация не свободна от **недостатков**, некоторые из которых перечислены ниже:

- Повсеместно в тексте встречается смешанное употребление русских и английских размерностей физических величин (не в рамках размерности одной величины, но на одной и той же странице, напр. на стр. 40 в пояснении перед формулой (1.19) использована размерность "eV", а в самой формуле (1.19) - "эВ"). Иногда размерности отсутствуют вовсе (напр. на стр. 60 в подписи к рис. 2.3), что, впрочем, может быть отнесено к опечаткам.
- В тексте присутствует некоторое количество опечаток, орфографических и грамматических ошибок. Часто используются сленговые выражения, например на стр. 71 использовано выражение "если только магнитное поле в источнике не достигает экстремальных значений, сравнимых с эддингтоновским пределом". Следовало написать хотя бы так: "если только магнитное поле в источнике не достигает экстремальных значений, соответствующих эддингтоновскому пределу по формуле (NN)" или "определяемых эддингтоновским пределом по формуле (NN)" (к сожалению, эта формула не пронумерована, хотя и приведена на стр. 29).
- Возможно, для очень узкого круга специалистов в настоящее время представляется очевидным, что магнетары не могут быть кандидатами на роль источников космических лучей сверхвысоких энергий. В то же время, для несколько более широкого круга астрофизиков этот вопрос совсем не очевиден. Более того, в 2002 г. Дж. Аронсом (J. Arons, "Magnetars in the Metagalaxy: An Origin for Ultra-High-Energy Cosmic Rays in the Nearby Universe", The Astrophysical Journal, Volume 589, Issue 2, pp. 871-892, 2003) было высказано обоснованное предположение, что магнетары могут быть источниками космических лучей сверхвысоких энергий. В то же время, в диссертации данная категория объектов как потенциальных источников космических лучей сверхвысоких энергий даже не упоминается, что представляется упущением.

Высказанные выше замечания не умаляют высокого уровня работы и значимости полученных результатов. Диссертация К.В. Птицыной является законченным научным трудом. Полученные автором результаты имеют существенное значение для астрофизики

и физики элементарных частиц. Материалы диссертации полностью изложены в опубликованных работах автора. **Автореферат полностью и правильно отражает содержание диссертации.**

Диссертационная работа была доложена и обсуждена на Объединённом астрофизическом семинаре ФТИ им. А.Ф. Иоффе 25 апреля 2017 года (протокол № 15 от 25.04.2017), по результатам которого был составлен данный отзыв.

Таким образом, диссертация Птицыной Ксении Владимировны на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц – является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, а её автор **заслуживает** присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц.

Отзыв составил:

секретарь астрофизического семинара,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
астрофизики высоких энергий ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Ю.А. Уваров

телефон: (812) 292-7160
электронный адрес: uv@astro.ioffe.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26, телефон: (812) 297-2245, факс: (812) 297-1017
post@mail.ioffe.ru

руководитель отделения физики плазмы, атомной
физики и астрофизики ФТИ им. А.Ф. Иоффе, доктор
физико-математических наук, профессор

А.М. Быков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе).

194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Тел.: +7(812) 297-22-45

Электронный адрес администрации института: post@mail.ioffe.ru

Список публикаций сотрудников института по теме диссертации за 2012-2017 гг.:

- 1) Bykov, Andrei M., Donald C. Ellison, and Sergei M. Osipov. "Nonlinear Monte Carlo model of superdiffusive shock acceleration with magnetic field amplification." *Physical Review E* 95, no. 3 (2017): 033207.
- 2) Warren, Donald C., Donald C. Ellison, Andrei M. Bykov, and Shiu-Hang Lee. "Electron and ion acceleration in relativistic shocks with applications to GRB afterglows." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 452, no. 1 (2015): 431-443.
- 3) Bykov, A. M., D. C. Ellison, P. E. Gladilin, and S. M. Osipov. "Ultrahard spectra of PeV neutrinos from supernovae in compact star clusters." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 453, no. 1 (2015): 113-121.
- 4) Zelenyi, Lev M., Andrei M. Bykov, Yury A. Uvarov, and Anton V. Artemyev. "Intermittency of magnetic field turbulence: Astrophysical applications of in-situ observations." *Journal of Plasma Physics* 81, no. 4 (2015)
- 5) Bykov, Andrei M. "Nonthermal particles and photons in starburst regions and superbubbles." *The Astronomy and Astrophysics Review* 22, no. 1 (2014): 1-54.
- 6) Bykov, Andrei M., Donald C. Ellison, Sergei M. Osipov, and Andrey E. Vladimirov. "Magnetic field amplification in nonlinear diffusive shock acceleration including resonant and non-resonant cosmic-ray driven instabilities." *The Astrophysical Journal* 789, no. 2 (2014): 137.
- 7) Bykov, Andrei M. "Nonthermal particles and photons in starburst regions and superbubbles." *The Astronomy and Astrophysics Review* 22, no. 1 (2014): 1-54.
- 8) Bykov, A. M., Axel Brandenburg, M. A. Malkov, and S. M. Osipov. "Microphysics of cosmic ray driven plasma instabilities." *Space Science Reviews* 178, no. 2-4 (2013): 201-232.
- 9) Balogh, André, Andrei Bykov, Robert Lin, John Raymond, and Manfred Scholer. "Cosmic Plasmas and Particle Acceleration: An Introduction." *Space Science Reviews* 173, no. 1-4 (2012): 1-4.
- 10) Bykov, A. M., G. G. Pavlov, A. V. Artemyev, and Yu A. Uvarov. "Twinkling pulsar wind nebulae in the synchrotron cut-off regime and the γ -ray flares in the Crab Nebula." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters* 421, no. 1 (2012): L67-L71.