

О Т З Ы В

официального оппонента Калмыкова Николая Николаевича на диссертацию Птицыной Ксении Владимировны «Происхождение космических лучей, нейтрино и гамма-излучения в окрестности сверхмассивных чёрных дыр в центрах галактик», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 - Физика атомного ядра и элементарных частиц

В диссертации К. В. Птицыной с единой точки зрения рассмотрена генерация космических лучей, гамма-излучения и нейтрино и разработаны модели, адекватно описывающие этот сложный комплекс проблем в предположении, что в непосредственной окрестности сверхмассивных чёрных дыр реализуется специальный режим ускорения лептонов и протонов электрическим полем.

Актуальность работы обусловлена спецификой изучения космических лучей сверхвысоких энергий и генерируемых ими излучений и вряд ли нуждается в специальном обосновании. Впечатляющие экспериментальные достижения последних 10-15 лет (отметим лишь данные гигантских установок для регистрации широких атмосферных ливней, а также экспериментов IceCube и Fermi) значительно повысили потребность в осуществлении надёжных и детальных вычислений, опирающихся на единый самосогласованный подход к исследуемым явлениям. Особую значимость и необходимость исследования такого рода приобретают в связи с тем, что в настоящее время ещё не выработана единая точка зрения на то, какие процессы ответственны за генерацию частиц самых высоких энергий. Одной из интересных и пока ещё недостаточно исследованных возможностей является ускорение в компактных областях в окрестностях чёрных дыр, на что имеются некоторые экспериментальные указания. Анализу такой модели ускорения и генерации сопутствующих излучений и посвящена работа К. В. Птицыной.

Оценка содержания диссертации и её завершённости. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 116 страниц, в том числе 21 рисунок, список литературы включает 165 наименований.

Во введении дана общая характеристика работы.

Первая глава содержит построение популяции однотипных, но при этом неидентичных источников космических лучей сверхвысоких энергий в рамках идеализированной модели ускорения в вакуумном зазоре в полярной области вблизи горизонта чёрной дыры. Приводятся аналитические оценки энергии ускоренных протонов и сопутствующего гамма-излучения. Описывается процедура построения модели популяции источников в предположении чисто протонного состава космических лучей сверхвысоких энергий, и проводится проверка этой модели на самосогласованность.

Вторая глава содержит результаты численного моделирования движения заряженных частиц (электронов и протонов) в вакуумном зазоре в заполненной плазмой бессиловой магнитосфере сверхмассивной чёрной дыры. Рассмотрены различные режимы ускорения и получены качественные оценки параметров зазора. Траектории частиц вычисляются посредством решения уравнений движения. Максимальные энергии протонов достигаются для аккреционных потоков низкой светимости и оказываются ниже, чем оценки, полученные в первой главе.

В третьей главе анализируются ограничения на адронные модели гамма-излучения блазаров с использованием результатов коллаборации IceCube (29 мюонных событий нейтрино с энергией более 200 ТэВ) и гамма-телескопа Fermi (749 блазаров из третьего каталога Fermi/LAT). Проведенный анализ позволил исключить адронные модели с ускорением протонов ударными волнами. Показано, что модели с ускорением протонов электрическими полями, для которых характерно наличие резкого максимума в спектре высокоэнергичных протонов, не могут быть исключены. Для этого класса моделей получены области параметров моделей ускорения, совместные с экспериментальными данными IceCube и Fermi.

В заключении приведены основные результаты работы.

Таким образом, даже из очень краткого изложения содержания диссертации становится очевидным большой объём работы, выполненной автором на высоком уровне. Текст диссертации характеризуется завершёностью и внутренним единством и хорошо отражает положения, выносимые на защиту.

Научная новизна.

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

Впервые исследованы особенности гамма-излучения высоких энергий из вакуумного зазора в магнитосфере сверхмассивной чёрной дыры.

Исследования осуществлены в широком диапазоне значений параметров источников, моделирование движения электронов проведено методом Монте-

Карло с детальным учётом как структуры магнитосферы, так и спектра излучения аккреционного потока.

Автором диссертации получены наиболее строгие на данный момент ограничения на адронные модели гамма-излучения блазаров.

Практическая значимость полученных автором диссертации результатов не вызывает сомнений.

Диссертация представляет собой хорошую основу для дальнейших исследований проблемы источников космических лучей сверхвысоких энергий. Созданная К. В. Птицыной модель популяции неидентичных источников может быть, в случае необходимости, уточнена в дальнейшем при появлении новых данных о нейтрино высоких энергий и увеличения чувствительности гамма-телескопов. Её проверкой может явиться регистрация (или отсутствие таковой) гамма-излучения от возможных источников космических лучей сверхвысоких энергий в пределах чувствительности установки Cherenkov Telescope Array.

Установленные в диссертации ограничения на адронные модели гамма-излучения блазаров важны для продолжения теоретических и экспериментальных исследований как собственно излучения блазаров, так и проблемы происхождения космических лучей сверхвысоких энергий. В дальнейшем, с увеличением набора данных телескопа IceCube и началом функционирования эксперимента Cherenkov from Astrophysical Neutrinos Telescope, может быть осуществлена более детальная проверка моделей, представляющихся в настоящее время возможными.

Результаты моделирования спектров излучения зазоров могут быть использованы для поиска характерных особенностей в наблюдаемых спектрах излучения в гамма-диапазоне, что даст возможность проверить развитую модель излучения зазора. Те же данные могут служить для объяснения жёстких компонент переменного излучения блазаров и радиогалактик.

Результаты работы представляются полезными для изучения зазоров в магнитосферах чёрных дыр звёздных масс и их проявлений в наблюдениях.

Обоснованность и достоверность выводов и заключений обусловлена использованием апробированных методов расчёта и детальным анализом полученных результатов. Кроме того, следует отметить, что достижения К. В. Птицыной хорошо известны специалистам. Она принимала участие в 9 российских и международных конференциях и совещаниях, так что диссертация прошла вполне серьёзную апробацию. Основные результаты К. В. Птицыной представлены в 4 статьях, две из которых опубликованы в ведущих международных журналах, входящих в Top-25 по версии Web of Science. Это даёт основания считать, что результаты работы К. В. Птицыной успешно

прошли дополнительную независимую научную экспертизу и являются достоверными и обоснованными.

В качестве замечаний по представленной диссертационной работе отметим следующее.

Хотя диссертация в целом достаточно хорошо написана и оформлена, автору не удалось скорректировать все допущенные погрешности. В тексте имеются неизбежные опечатки и ошибки.

Не все аббревиатуры разъяснены. Так FSRQ не расшифровано ни на стр. 6, где впервые появляется, ни в списке аббревиатур, приведенном на стр. 100.

Местами автор проявляет склонность к использованию оборотов, более уместных в английском языке, чем в русском. Примером может служить третий абзац раздела Практическая значимость (стр. 21).

На стр.36 приведена оценка плотности источников космических лучей n и описана процедура её вычисления. Представляется, что была бы интересной и информация об использованном при получении оценки распределении источников по массам чёрных дыр $d n/d \log M$, фигурирующем в формуле (1.8) на той же странице.

В первой главе на стр.34 приведен рисунок 1.2, на котором демонстрируются спектры космических лучей сверхвысоких энергий, предсказываемые моделью для различных значений массы чёрной дыры. Поскольку во второй главе получены меньшие значения предельных достижимых энергий протонов, требуются комментарии относительно того, сохраняется ли возможность адекватного воспроизведения спектра космических лучей сверхвысоких энергий с учётом результатов второй главы.

Раздел 2.2 второй главы посвящён численному моделированию. У оппонента нет сомнений в достоверности результатов диссертации, однако сведения о погрешностях расчёта следовало привести.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки работы.

Таким образом, диссертация К. В. Птицыной «Происхождение космических лучей, нейтрино и гамма-излучения в окрестности сверхмассивных чёрных дыр в центрах галактик» на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц является завершённой научно-квалификационной работой, посвящённой актуальной проблеме современной астрофизики. Научные результаты, полученные в диссертации, являются новыми и имеют существенное значение для науки и практики. Выводы и рекомендации работы

достаточно обоснованы. Работа соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, а сама Ксения Владимировна Птицына, безусловно, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 - Физика атомного ядра и элементарных частиц.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Официальный оппонент

главный научный сотрудник лаборатории наземной гамма-астрономии отдела космических наук Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», г. Москва, доктор физ.- мат. наук, профессор

Калмыков Н. Н.

10 мая 2017 г.

e-mail: kalm@eas.sinp.msu.ru

Телефон: +7 (495) 939 2369

Подпись Калмыкова Н. Н. заверяю

Директор Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва, доктор физ.- мат. наук, профессор

Панасюк М. И.

Калмыков Николай Николаевич
Доктор физико-математических наук, профессор
Специальность 01.04.16 –Физика атомного ядра и элементарных частиц

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

- 1) Primary CR energy spectrum and mass composition by the data of Tunka-133 array. Prosin V.V., Chvalaev O.A., Budnev N.M., ... Kalmykov N.N., ...Karpov N.I. // 2015, EPJ Web of Conferences, vol. 99, p. 04002
- 2) Regions of excessive fluxes of cosmic rays, according to data from FIAN and MSU arrays. Gudkova E.N., Zotov M.Yu., Kalmykov N.N., Kulikov G.V., Nesterova N.M., Pavlyuchenko V.P. // 2015, Bulletin of the Russian Academy of Sciences, vol. 79, # 3, p. 352
- 3) The Promise of the Tunka-Grande Scintillation Experiment for Studying the Mass Composition of Primary Cosmic Rays. Budnev N.M., Ivanova A.L, Kalmykov N.N., Kuzmichev L.A., Sulakov V.P., Fomin Yu.A. // 2015, Moscow University Physics Bulletin, vol. 70, # 2, p. 160
- 4) TAIGA – the Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma Astronomy – present status and perspectives. Budnev N.M., Karpov N.I., Kalmykov N.N., ..., Sveshnikova L.G. //2014, Journal of Instrumentation, vol. 9, # 9, p. C09021
- 5) Estimating primary mass composition at energies 10^{17} – 10^{18} eV from EAS radio emission lateral distribution. Kalmykov N.N., Konstantinov A.A., Vedeneev O.V. // 2013, Journal of Physics: Conference Series, vol. 409, # 1, p. 012071
- 6) Evaluation of the gamma-quanta fraction in the primary cosmic ray flux with energy about 10^{17} eV according to the EAS MSU array data. Fomin Yu.A., Kalmykov N.N., Kulikov G.V., Sulakov V.P. // 2013, Journal of Physics: Conference Series, vol. 409, # 1, p. 012077
- 7) Spectra and mass composition of ultrahigh energy cosmic rays from point sources. Kalmykov Nikolai N., Shustova Olga P. // 2012, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, # 4, p. 035