

О Т З Ы В

**официального оппонента доктора физико-математических наук
профессора Бескина Василия Семеновича 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 рассмотрены проблемы происхождения космических лучей, гамма-излучения и нейтрино высоких и сверхвысоких энергий и получено их адекватное описание с единой точки зрения ускорения лептонов и протонов электрическим полем в компактных областях в непосредственной окрестности сверхмассивных черных дыр.

Актуальность работы обусловлена важностью исследования предполагаемых компактных областей ускорения и излучения в окрестностях сверхмассивных черных дыр. Изучению подобных областей в магнитосферах пульсаров посвящены многочисленные работы, поскольку именно с этими областями связывают наблюдаемое излучение в гамма-диапазоне. Подобные же явления в магнитосферах черных дыр до сих пор остаются малоисследованными. Поэтому представляется важным изучить как на теоретическом, так и на экспериментальном уровне возможные наблюдательные проявления, которые можно было бы связать с существованием компактных областей ускорения в магнитосферах черных дыр. Тем более что о наличии компактных областей ускорения свидетельствуют наблюдения быстропеременного гамма-излучения радиогалактик и блазаров. Следует также отметить, что помимо электромагнитного окна, ускорение адронов может сопровождаться сопутствующим сигналом нейтрино, энергия которых находится в диапазоне регистрируемых событий на IceCube, источники которых в настоящее время не установлены. Сами же ускоренные адроны могут давать вклад в наблюдаемый на Земле поток космических лучей, происхождение которых при сверхвысоких энергиях также до сих пор остается неизвестным. Анализ этого круга вопросов с точки зрения ускорения лептонов и адронов в компактных областях в магнитосферах черных дыр и посвящена работа К.В.Птицыной.

Оценка содержания диссертации и её завершенности. 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.

В первой главе в рамках идеализированной модели ускорения в вакуумном зазоре в полярной области вблизи горизонта чёрной дыры построена популяция однотипных, но неидентичных источников космических лучей сверхвысоких энергий в предположении их чисто протонного состава. Приводятся аналитические оценки энергии ускоренных протонов и сопутствующего гамма-излучения. Описывается построение модели популяции источников космических лучей сверхвысоких энергий, проводится проверка этой модели на самосогласованность.

Вторая глава посвящена численному моделированию ускорения и излучения в вакуумном зазоре в заполненной плазмой бессиловой магнитосфере сверхмассивной чёрной дыры. Проведено Монте-Карло моделирование движения заряженных частиц (электронов и протонов). Рассмотрены различные режимы ускорения и получены качественные оценки параметров зазора. Вычислены характерные спектры гамма-излучения для различных режимов ускорения. Максимальные энергии протонов достигаются для аккреционных потоков низкой светимости.

В третьей главе анализируются ограничения на адронные модели гамма-излучения блазаров с использованием результатов коллаборации IceCube и гамма-телескопа Fermi. Показано, что неисключенными остаются модели с ускорением протонов в компактных областях в магнитосферах черных дыр, для которых характерно наличие резкого максимума в спектре высокоэнергичных протонов. Для данной модели ускорения получены области параметров, совместные с экспериментальными данными IceCube и Fermi.

В заключении изложены основные результаты работы.

Текст диссертации характеризуется завершённостью и хорошо отражает положения, выносимые на защиту. Автором на высоком профессиональном уровне выполнен большой объем работы.

Научная новизна.

Впервые построена рабочая модель популяции неидентичных 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 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.

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

Практическая значимость результатов обусловлена актуальностью рассмотренных задач как с теоретической, так и с наблюдательной точек зрения.

В частности, полученные результаты могут быть использованы для дальнейших исследований проблемы источников космических лучей сверхвысоких энергий. Построенная К. В. Птицыной модель популяции неидентичных источников может быть уточнена в дальнейшем при появлении новых данных о нейтрино высоких энергий и увеличения чувствительности гамма-телескопов.

Результаты численного моделирования спектров излучения из областей продольного электрического поля в магнитосферах сверхмассивных черных дыр могут быть использованы для поиска характерных особенностей в наблюдаемых спектрах гамма-излучения радиогалактик и блазаров в широком диапазоне параметров источников и, соответственно, для проверки развиваемой модели зазоров. Кроме того, данные спектры гамма-излучения могут служить для объяснения жёстких компонент переменного излучения блазаров и радиогалактик. Результаты работы могут быть использованы и для изучения областей ускорения в магнитосферах чёрных дыр звёздных масс и их проявлений в наблюдениях.

Наконец, полученные в диссертации ограничения на адронные модели гамма-излучения блазаров могут оказаться важными в связи с проблемой происхождения нейтрино высоких энергий и 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, не исключенных на данном этапе исследований.

Обоснованность и достоверность выводов и заключений основана на том, что диссертация прошла достаточно серьёзную апробацию. Результаты, полученные К.В.Птицыной, докладывались на 9 российских и международных конференциях и совещаниях. Основные результаты К.В.Птицыной, вошедшие в диссертацию, представлены в 4 статьях, две из которых опубликованы в ведущих международных журналах и хорошо известны специалистам. Таким образом, результаты работы К. В. Птицыной успешно прошли независимую научную экспертизу и являются достоверными и достаточно обоснованными.

В качестве замечаний по представленной диссертационной работе отметим следующее.

1. В Главе 1 (в отличие от Главы 2) предполагается вакуумная магнитосфера черной дыры. Это очень серьезное упрощение, поскольку само магнитное поле не может существовать без окружающей плазмы, а в присутствии плазмы существуют многочисленные процессы, приводящие к экранировке продольного электрического поля (в подобной по постановке задачи теории магнитосфер радиопульсаров от этого предположения давно отказались; в теории магнитосфер черных дыр это, к сожалению, не так). При этом при анализе потерь энергии частиц обсуждаются лишь изгибные потери. Потери, связанные, например, с обратным комптоновским рассеянием, не обсуждаются.
2. В формуле (1.5) впервые появляется угол наклона, причем выражение для энергии частиц расходится при нулевом угле (что просто означает, что изгибные потери не ограничивают рост энергии частиц для частиц, движущихся вдоль оси вращения). Необходимо было написать более точную формулу, справедливую для всех углов. Да и сама модель однородного (на бесконечности) магнитного поля не выдерживает критики. Магнитное поле может создаваться лишь окружающей плазмой, и поэтому радиус кривизны большинства магнитных силовых линий не будет сильно отличаться от радиуса черной дыры.
3. В модели также предполагается, что для данного источника все ускоренные частицы проходят одну и ту же разность потенциалов (и для них можно использовать один радиус кривизны). Вопрос об инжекции частиц в область ускорения, благодаря которому эти параметры у одного источника могут быть различными, не обсуждается.
4. В присутствии области ускорения нужно более аккуратно определить величину Ω_F , которая должна быть разной для областей истечения и аккреции.
5. Непонятно, как в область ускорения могут попасть протоны. В отличие от электронов (и позитронов) этот процесс нельзя объяснить фотон-фотонным рождением. Этот процесс в диссертации не обсуждается.
6. В тексте отмечается, что “размер зазора вычисляется самоогласованным образом, как граница области рождения пар”. Т.е., как граница вакуумного зазора, рассмотренного выше. Но даже в первой работе 1990 года, в которой была выдвинута идея внутреннего зазора в магнитосфере черной дыры, плотность заряда в области ускорения не предполагалась равной нулю а определялась самосогласованно через плотность существующих там частиц.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки работы. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертация К.В.Птицыной «Происхождение космических лучей, нейтрино и гамма-излучения в окрестности сверхмассивных чёрных дыр в центрах галактик» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком профессиональном уровне. Диссертация Птицыной К.В. 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.

Официальный оппонент

ведущий научный сотрудник лаборатории проблем физики космоса отделения теоретической физики им. И.Е.Тамма Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), г. Москва, доктор физ.- мат. наук, профессор

Бескин В.С.

дата 15 мая 2017 г.

E-mail: beskin@lpi.ru

Тел. +7(499) 132-65-95

Подпись руки Бескина В.С. заверяю

Ученый Секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), г. Москва, кандидат физ.- мат. наук

Колобов А.В.

Бескин Василий Семенович
доктор физико-математических наук, профессор
специальность 01.04.02 – теоретическая физика

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

- 1) L.I.Arzamasskiy, V.S.Beskin, K.K.Pirov "Statistics of interpulse radio pulsars - the key to solving the alignment/counter-alignment problem". MNRAS, 466, 2325-2336 (2017)
- 2) V.S.Beskin, A.V.Chernoglazov "On the deceleration of relativistic jets in active galactic nuclei I: Radiation drag". MNRAS, 463, 3398-3408 (2016)
- 3) E.E.Nokhrina, V.S.Beskin, Y.Y.Kovalev, A.A.Zheltoukhov. "Intrinsic physical conditions and structure of relativistic jets in active galactic nuclei" MNRAS, 447, 2726-2737 (2015)
- 4) V.Beskin, S.Chernov, C.Gwinn, A.Tchekhovskoy "Radio Pulsars" in The Strongest Magnetic Fields in the Universe, Space Science Reviews, 191, 207-237 (2015)
- 5) V.V.Prokofev, L.I.Arzamasskiy, V.S.Beskin, "On the primary beam deceleration in the pulsar wind" MNRAS, 454, 2146-2153 (2015)
- 6) В.С.Бескин, А.А.Желтоухов. "Об аномальном моменте сил, действующем на вращающийся намагниченный шар в вакууме" УФН, 184, 865-873 (2014)
- 7) А.Л.Акопян, В.С.Бескин. "К определению формы изображения радиоимпульсов пульсаров в картинной плоскости". АЖ, 91, 1000–1007 (2014)
- 8) В.С.Бескин, Я.Н.Истомин, А.А.Филиппов "Радиопульсары — поиски истины". УФН, 183, 179–194 (2013)
- 9) В.С.Бескин, А.А.Желтоухов. "К структуре магнитного поля вблизи черной дыры в активных галактических ядра". ПАЖ, 39, 243-248 (2013)
- 10) Л.И.Арзамасский, В.С.Бескин. "О влиянии углового момента аккрецирующего вещества на структуру течения в режиме медленного оседания и при аккреции Бонди-Хойла". Письма в Астрономический Журнал, 39, 934-941 (2013)