

*На правах рукописи*

Птицына  
Ксения Владимировна

Происхождение космических лучей,  
нейтрино и гамма-излучения  
в окрестностях сверхмассивных черных дыр  
в центрах галактик

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

**Научный руководитель:**

*Троицкий Сергей Вадимович*, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, ИЯИ РАН, Отдел теоретической физики, ведущий научный сотрудник.

**Официальные оппоненты:**

*Бескин Василий Семенович*, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Отделение теоретической физики им. И.Е. Тамма, Лаборатория проблем физики космоса, ведущий научный сотрудник.

*Калмыков Николай Николаевич*, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Отдел космических наук, Лаборатория наземной гамма-астрономии, главный научный сотрудник.

**Ведущая организация:**

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

Защита диссертации состоится 1 июня 2017 года в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Д002.119.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерных исследований Российской академии наук по адресу: 117312 Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН и на сайте [www.inr.ru](http://www.inr.ru)

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.119.01,  
доктор физ.-мат. наук

С.В. Троицкий

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

В диссертации рассматриваются вопросы происхождения космических лучей, нейтрино и гамма-излучения с точки зрения ускорения лептонов и протонов крупномасштабным электрическим полем, сформированным вследствие вращения черной дыры в магнитном поле, в компактных областях с пониженной концентрацией плазмы или полным её отсутствием в непосредственной окрестности сверхмассивных черных дыр (СМЧД) в центрах галактик. По аналогии с магнитосферами пульсаров, компактные области ускорения в магнитосферах черных дыр называют вакуумными зазорами.

О существовании компактных областей ускорения и сопутствующего излучения в непосредственной окрестности черных дыр в некоторых источниках свидетельствуют наблюдения быстрой переменности гамма-излучения высоких энергий от радиогалактик и блазаров, см., напр., [1, 2]. Данное утверждение подтверждается также прямыми методами микролинзирования гравитационно-линзированных блазаров [3, 4].

Большинство источников с быстрой переменностью гамма-излучения относится к лацертидам и радиогалактикам типа FR-I, в которых предполагается [5] наличие радиационно-неэффективного потока с низкой скоростью аккреции и низкой светимостью с максимумом плотности излучения вблизи горизонта черной дыры, определяемого синхротронной компонентой его спектра, на энергиях от миллиметрового до инфракрасного диапазона.

Области с пониженной концентрацией плазмы [6–8] могут формироваться в результате её непрерывного, нескомпенсированного [9, 10] в режиме радиационно-неэффективного аккреционного потока, оттока из магнитосферы черной дыры. С другой стороны, именно эти области сами могут являться источником плазмы [7, 11], необходимой для извлечения энергии вращения черной дыры [6].

Высокоэнергетические спектры гамма-излучения блазаров могут

быть описаны в рамках лептонного (обратно-комптоновское излучение ускоренных электронов), см., напр., [12–15], или адронного (протон-протонные и протон-фотонные взаимодействия и последующий электромагнитный каскад), см., напр., [16, 17], механизмов. В отличие от адронного, лептонный механизм, однако, не сопровождается рождением нейтрино.

Крупнейшая в мире установка по регистрации нейтрино IceCube зарегистрировала нейтрино высоких энергий, которые с высоким уровнем значимости имеют астрофизическое происхождение, см., напр., [18, 19]. Полученные из данных телескопа IceCube ограничения на поток нейтрино от некоторых блазаров и сравнение их с данными гамма-наблюдений позволили установить ограничения на адронные модели происхождения их гамма-излучения [20]. Новые данные IceCube позволяют установить более сильные ограничения на адронные модели. Среди неисключенных остаются модели со спектром инжекции протонов, близким к дельта-функции на энергиях космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ)  $> 10^{18}$  эВ. Именно такие спектры инжекции протонов могут формироваться при их ускорении электрическим полем в вакуумных зазорах в магнитосферах черных дыр. Покинувшие источник ускоренные протоны и, возможно, более тяжелые ядра могут давать вклад в наблюдаемый на Земле поток КЛСВЭ, происхождение которых уже долгое время остается неизвестным.

Ускорение в вакуумном зазоре в магнитосфере черной дыры [21] предполагалось в лептонной модели [13] гамма-излучения галактики M87. Аналог модели внешнего зазора пульсара был рассмотрен в работах [14, 15] с целью объяснения спектра гамма-излучения галактики IC310. Источником гамма-излучения в этих моделях является излучение ускоренных в зазоре электронов и последующий электромагнитный каскад.

## Цель и задачи диссертационной работы

Целью работы является изучение явлений, связанных с ускорением и излучением электронов и протонов в компактных областях в окрестностях сверхмассивной черной дыры в центрах галактик.

Для достижения поставленной цели выделены следующие задачи:

1. построение популяции неидентичных источников КЛСВЭ в рамках модели ускорения протонов в вакуумных зазорах в окрестностях СМЧД:
  - вычисление модельного спектра КЛСВЭ с учетом распределения источников по массам центральных черных дыр, их эволюции с красным смещением и эффектов распространения от источника к наблюдателю;
  - аналитическая проверка реалистичности модели: вычисление концентрации источников, оценка параметров источников;
  - численная проверка реалистичности модели: вычисление сопутствующего ускорению излучения от популяции источников с учетом его распространения от источника к наблюдателю и сравнение с диффузным фоном;
2. исследование роли возможного существования вакуумных зазоров в магнитосферах сверхмассивных черных дыр в центрах активных галактик типа FR-I и лацертид в формировании их спектра в гамма-диапазоне в широкой области параметров источников:
  - аналитические оценки параметров зазора и режимов ускорения в зазоре в зависимости от параметров источника;
  - численное вычисление параметров зазора путем Монте-Карло моделирования распространения электронов и позитронов в зазоре в магнитосфере черной дыры с учетом структуры электрического и магнитного полей в магнитосфере, потерь энер-

- гии на излучение и взаимодействие с фотонами фонового излучения от аккреционного потока и формы фонового спектра;
- вычисление спектра излучения от ускоренных электронов в зазоре путем Монте-Карло моделирования;
  - моделирование распространения протонов в зазоре и вычисление их максимальной энергии в широком диапазоне параметров источников;
  - определение областей параметров источников с характерными наблюдательными проявлениями по результатам численного моделирования;
3. анализ данных IceCube по астрофизическим нейтрино с энергиями выше 100 ТэВ и ограничение адронных моделей гамма-излучения блазаров:
- определение ограничений на поток нейтрино от блазаров из совместного анализа данных IceCube и Fermi;
  - вычисление спектра нейтрино в модели вакуумного зазора в магнитосфере черной дыры для различных значений параметров источников;
  - анализ полученных ограничений;
  - определение параметров возможных источников нейтрино в рамках неисключенной установленными ограничениями модели ускорения протонов в вакуумном зазоре с максимумом спектра протонов в диапазоне космических лучей сверхвысоких энергий.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Построена модель популяции неидентичных источников космических лучей сверхвысоких энергий, успешно описывающая наблюдаемый спектр выше  $10^{19}$  эВ и удовлетворяющая ограничениям на концентрацию источников КЛСВЭ, даже в предположении

о чисто протонном составе. Ускорение космических частиц происходит в непосредственных окрестностях сверхмассивных центральных черных дыр обычных и активных галактик. Сопутствующее гамма-излучение не превышает наблюдаемого диффузного гамма-фона.

2. Показано, что существование вакуумного зазора в магнитосфере сверхмассивной черной дыры имеет следующие явные особенности в спектре излучения источников в гамма-диапазоне:
  - (а) спектр излучения зазоров в источниках с радиационно-неэффективным аккреционным потоком высокой и средней светимости доминируется обратно-комптоновским излучением с резким, супер-экспоненциальным обрезанием в гамма-диапазоне очень высоких энергий. Энергия обрезания спектра определяется свойствами аккреционного потока;
  - (б) в случае радиационно-неэффективного потока средней светимости компонента обратно-комптоновского излучения имеет жесткий спектр и резкое обрезание. Спектр излучения из зазора может быть использован для объяснения жестких гамма-спектров лацертид;
  - (с) спектр излучения из зазора в источниках с аккреционным потоком низкой светимости доминируется синхротронным или изгибным излучением с максимумом в диапазоне 1 – 100 ГэВ;
  - (д) излучение зазора во всех трех режимах радиационно-неэффективного потока (низкой/средней/высокой светимостей) проявляется как узкий пик на фоне более широкого/гладкого спектра джета.
3. Показано, что протоны в зазорах магнитосфер сверхмассивных черных дыр могут быть ускорены до высоких энергий  $\geq 10^{18}$  эВ в случае источников с радиационно-неэффективным потоком очень низкой светимости.
4. Получены ограничения на адронные модели гамма-излучения

блазаров:

- (a) исключены адронные модели со степенным спектром инжекции протонов, взаимодействующих с фотонами ультрафиолетового диапазона энергий;
- (b) исключены адронные модели с характерным для ускорения на релятивистских ударных фронтах степенным спектром с показателем степени  $\Gamma \approx 2$  инжекции и протон-протонными взаимодействиями;
- (c) не исключены адронные модели гамма-излучения блазаров с жестким протонным спектром с максимумом при энергиях диапазона космических лучей высоких и сверхвысоких энергий. Такие спектры протонов могут реализовываться в моделях ускорения в вакуумном зазоре в магнитосфере черной дыры в источниках из определенной области пространства их параметров.

### **Научная новизна**

- Впервые построена модель популяции источников КЛСВЭ, удовлетворяющая как условию их многочисленности, так и имеющимся наблюдательным данным;
- впервые исследованы основные особенности характерного гамма-излучения высоких энергий из 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;
- получены наиболее строгие из существующих на данный момент ограничения на адронные модели гамма-излучения блазаров.



## Практическая значимость

- Полученные в работе результаты полезны для дальнейшего исследования источников космических лучей сверхвысоких энергий. Модель популяции неидентичных источников может быть проверена или уточнена в дальнейшем с учетом новых данных регистрации нейтрино высоких энергий и увеличением чувствительности гамма-телескопов. Проверкой данной модели будет наблюдение или ненаблюдение гамма-излучения от возможных источников КЛСВЭ в ожидаемых пределах чувствительности СТА.
- Полученные ограничения на адронные модели гамма-излучения блазаров являются важным результатом как для их дальнейшего теоретического и экспериментального исследования, так и в контексте вопроса происхождения КЛСВЭ. Проверка неисключенных на настоящем этапе адронных моделей гамма-излучения блазаров может быть осуществлена в дальнейшем с увеличением экспозиции набора данных телескопом IceCube и началом работы CHANT.
- Результаты численного Монте-Карло моделирования спектров излучения зазоров в широком диапазоне параметров источников могут служить для поиска характерных особенностей в наблюдаемых спектрах излучения в гамма-диапазоне, что позволит проверить модель излучения зазора, а также могут быть использованы для объяснения жестких компонент переменного излучения блазаров и радиогалактик.
- Результаты работы могут быть использованы для изучения зазоров в магнитосферах черных дыр звездных масс и их проявлений в наблюдениях.

## Основные публикации по теме диссертации

Материалы, составляющие содержание диссертации, изложены в работах [30–33].

## Апробация работы

Результаты диссертации были доложены на следующих российских и международных семинарах и конференциях:

1. Международный семинар “17th International Seminar on High Energy Physics (QUARKS-2012)”, Ярославль, 4 - 10 июня, 2012 г.
2. Международная школа “International School for Subnuclear Physics”, Эриче, Италия, 23 июня - 2 июля, 2012 г.
3. Международная школа “Dark Matter Composition and Detection”, Стокгольм, Швеция, 29 июля – 6 августа, 2013 г.
4. Международная конференция “28th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics”, Женева, Швейцария, 13-18 декабря, 2015 г.
5. Всероссийской конференции “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра”, Москва, 21-24 декабря, 2015 г.
6. Международный семинар “19th International Seminar on High Energy Physics (QUARKS-2016)”, Санкт-Петербург, 29 мая – 4 июня, 2016 г.
7. Международная конференция “6th International Symposium on High-Energy Gamma-Ray Astronomy”, Гейдельберг, Германия, 11-15 июля, 2016 г.
8. Международная школа “Computational Plasma Astrophysics”, Принстон, Нью-Джерси, США, 18-29 июля, 2016 г.
9. Международная конференция “TeV Particle Astrophysics 2016”, Женева, Швейцария, 12-16 сентября, 2016 г.

## Личный вклад

Личный вклад автора в работы, вошедшие в диссертацию, является определяющим. В материале первой главы автором были получены аналитические оценки и проведены вычисления ограничений на параметры источников модели. В материале второй главы автором были проведены аналитические оценки, Монте-Карло моделирование распространения электронов и протонов в зазоре, реализована итерационная схема вычисления параметров зазора с учетом структуры магнитосферы и распространения электронов в зазоре, смоделированы спектры гамма-излучения. В материале третьей главы автором были проанализированы ограничения на адронные модели гамма-излучения блазаров, вычислены спектры нейтрино в моделях с жестким спектром протонов, вычислены характерные энергии ускоренных в зазоре протонов при их прохождении через радиационно-неэффективный аккреционный поток для широкой области его параметров, проанализированы параметры возможных источников, совместные с ограничениями из анализа данных.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 116 страниц, включая 21 рисунок. Список литературы насчитывает 165 наименований.

## Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации и дан краткий обзор состояния исследуемых вопросов.

**Первая глава** посвящена построению популяции неидентичных источников КЛСВЭ. В качестве модели ускорения в источнике выбрана модель ускорения в вакуумном зазоре в полярной области вблизи горизонта черной дыры [21, 22].

В **разделе 1.1** дается краткое описание модели ускорения в

полярной области [21] и приводятся аналитические оценки энергии ускоренного в зазоре протона и сопутствующего гамма-излучения. Вращающаяся черная дыра в вакууме погружена в однородное магнитное поле, наклоненное под углом  $\chi$  к оси вращения. Протоны и более тяжелые ядра ускоряются вдоль магнитных силовых линий электрическим полем, индуцированным вращением черной дыры. Максимальная энергия определяется условием  $\mathcal{E}_p = \min(\mathcal{E}_{\max}, \mathcal{E}_{\text{curv}})$ , где  $\mathcal{E}_{\max}$  – максимальная энергия при заданной разности потенциалов,  $\mathcal{E}_{\text{curv}}$  – энергия, определяемая балансом приобретаемой энергии потерь на изгибное излучение  $d\mathcal{E}_-/dt = d\mathcal{E}_+/dt$ :

$$\mathcal{E}_{\text{curv}} \approx 2.9 \times 10^{20} \frac{A}{Z^{1/4}} \left( \frac{M}{10^9 M_{\odot}} \right)^{\frac{3}{8} + \frac{\alpha}{4}} \left( \frac{\chi}{1^\circ} \right)^{-\frac{1}{2}} (k\kappa)^{\frac{1}{4}}, \quad (1)$$

где  $Z$  – заряд ядра,  $A$  – атомная масса,  $M$  – масса черной дыры,  $\kappa$  – коэффициент, связывающий значения ускоряющего электрического поля в зазоре и магнитного поля,  $k$  и  $\alpha$  параметризуют магнитное поле вблизи горизонта черной дыры и определяются моделью аккреционного потока:  $B_0 = kB_{\text{Ed}} (M/10^9 M_{\odot})^{\alpha}$ , где  $B_{\text{Ed}} = 10^4 (M/10^9 M_{\odot})^{-1/2}$  Гс есть эддингтоновский предел магнитного поля.

При построении модели популяции источников КЛСВЭ предполагается чисто протонный состав КЛСВЭ, все протоны ускоряются у данной черной дыры до одной и той же энергии, определяемой выражением (1). При заданном модельно-зависимом магнитном поле максимальная энергия протонов определяется массой черной дыры  $M$ . Зависимость от углового момента черной дыры незначительно размывает монохроматический спектр ускоренных протонов.

В разделе 1.2 описывается построение модели популяции источников в рамках выбранной модели ускорения, представлен модельный спектр космических лучей.

Предполагается, что светимость каждого источника в космических лучах  $L_{\text{CR}}$  является степенной функцией массы черной дыры  $L_{\text{CR}} \propto M^{\beta}$ , нормировка светимости  $L_{\text{CR}}$  и показатель степени  $\beta$

являются свободными параметрами модели популяции и учитывают долю сверхмассивных черных дыр, являющихся источниками КЛСВЭ с предполагаемой моделью ускорения.

Параметры модели популяции источников определяются из условия наилучшего соответствия модельного спектра КСЛ-ВЭ наблюдаемому. Концентрация источников с центральной черной дырой определенной массы  $M$  при различных красных смещениях определяются из функции масс сверхмассивных черных дыр [24]. Модельный спектр космических лучей вычисляется с учетом взаимодействия протонов с фоновым излучением на пути от источника к наблюдателю, использован численный код, разработанный в [25]. Полученный спектр представлен на Рис. 1.

В разделе 1.3 обсуждаются ограничения на модель популяции и проводится её проверка на самосогласованность. Показано, что концентрация источников удовлетворяет ограничению из отсутствия кластеризации направлений прихода КЛ-СВЭ в предположении об их чисто протонном составе, светимость сопутству-

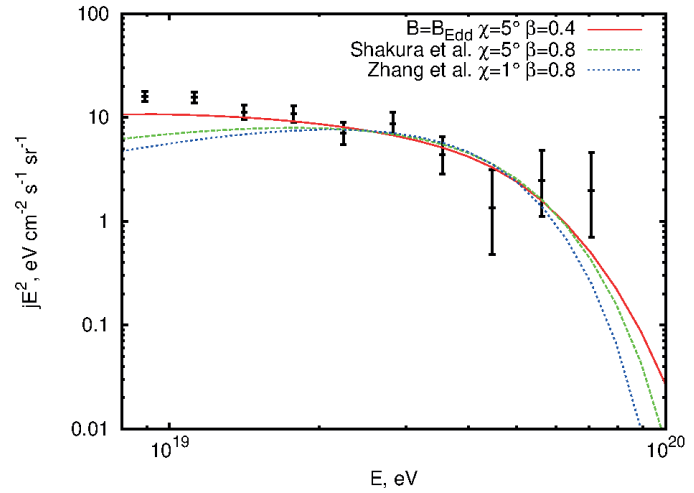


Рис. 1: Предсказываемый моделью поток космических лучей для трех различных предположений о магнитном поле сверхмассивной черной дыры и данные эксперимента Auger [23].

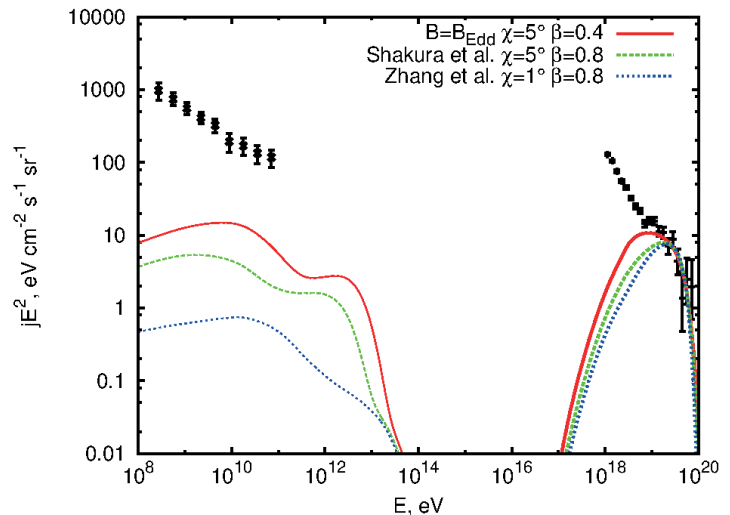


Рис. 2: Спектр гамма-излучения, предсказанный теми же моделями, что и на Рис. 1

ющего ускорению гамма-излучения источников не слишком велика, а полное гамма-излучение от всех источников не превышает диффузного гамма-фона. Спектр сопутствующего гамма-излучения от популяции источников представлен на Рис. 2.

В разделе 1.4 обсуждаются результаты и формулируются выводы.

**Вторая глава** посвящена изучению ускорения частиц в вакуумном зазоре в заполненной плазмой бессиловой магнитосфере сверхмассивной черной дыры и исследованию возможных проявлений модели в спектре излучения лацертид и слабых радиогалактик в гамма-диапазоне. Предполагается, что всюду вне зазора плазма полностью экранирует ускоряющую компоненту электрического поля. Следуя [7], предполагается, что вакуумные зазоры формируются вблизи поверхности, разделяющей области с противоположным знаком плотности заряда плазмы, заполняющей магнитосферу черной дыры, Рис.3. Черная дыра погружена в радиационно-неэффективный аккреционный поток [5], создающий фоновое излучение в окрестностях черной дыры. Определяются параметры зазора, вычисляются спектры излучения ускоренных в зазоре электронов и энергии ускоренных протонов для широкого диапазона параметров источников. Получены качественные оценки и проведено численное Монте-Карло моделирование движения электронов и протонов

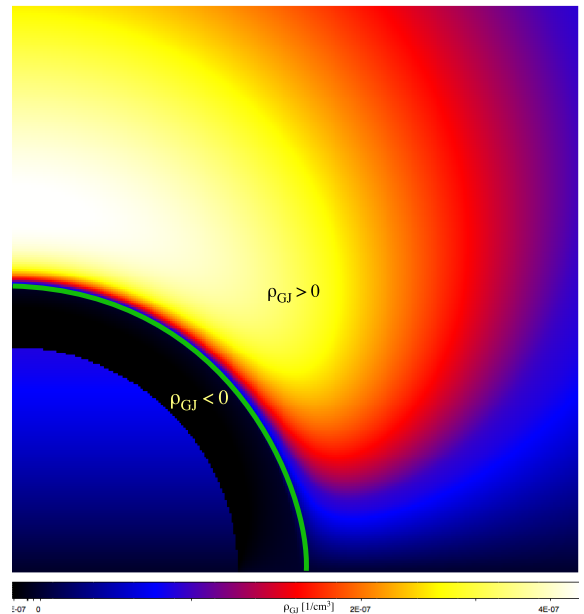


Рис. 3: Распределение плотности заряда (плотности Гольдрайха-Джулиана) в квазимонополярной бессиловой магнитосфере. Угловой момент черной дыры  $a = 0.1M$ . Горизонт черной дыры соответствует границе синего круга в левом нижнем углу. Зелёная линия изображает положение поверхности  $\rho_{GJ} = 0$  - положение вакуумного зазора. Знаки плотности заряда меняются на противоположные при соответствующем изменении направления углового момента черной дыры.

в магнитосфере черной дыры с учетом структуры электрического и магнитного полей в магнитосфере, свойств аккреционного потока, потерь энергии на синхротронное/изгибное излучение и взаимодействие с фоновым излучением аккреционного потока. Вычисления проводятся в приближении “узкого” зазора  $H < R_{\text{hor}}$ , где  $H$  – поперечный размер (высота) зазора,  $R_{\text{hor}}$  – радиус горизонта черной дыры.

В разделе 2.1 рассматриваются режимы ускорения в вакуумном зазоре и приведены качественные оценки параметров зазора, энергий электронов, протонов в зазоре и гамма-излучения. Границы зазора определяются началом рождения электрон-позитронных пар при взаимодействии обратно-комптоновских фотонов ускоренных в зазоре электронов и позитронов с излучением аккреционного потока.

На Рис. 4 приведены характерные значения размера зазора в режимах низкой и высокой светимости синхротронной компоненты спектра аккреционного потока для различных масс черных дыр.

Раздел 2.2 посвящен численному моделированию. Рассматривается случай квазимонопольного магнитного поля медленно вращающейся черной дыры  $a = 0.1M$ . Магнитное поле вблизи горизонта черной дыры  $B$  и светимость синхротронной компоненты аккреционного потока  $L$  рассматриваются как независимые параметры.

Заряженные частицы (электроны и протоны) инжектируют-

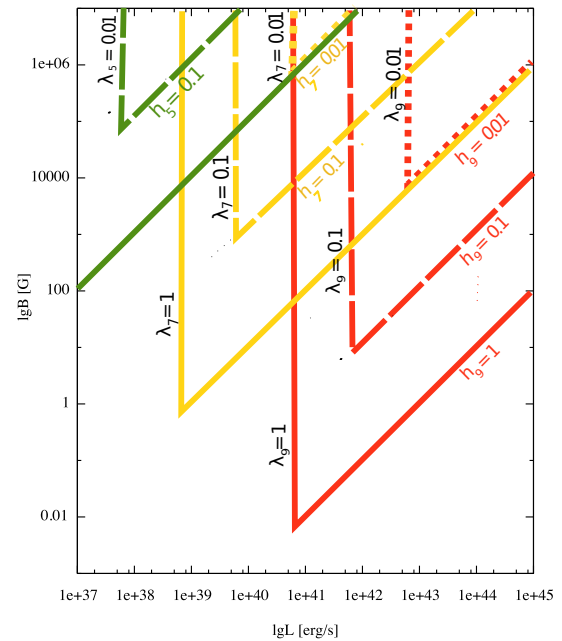


Рис. 4: Высота зазора как функция светимости аккреционного потока  $L$  и магнитного поля  $B$  у черной дыры для следующих значений массы черной дыры (слева направо):  $M = 3 \times 10^5 M_{\odot}$  (зеленые линии),  $M = 3 \times 10^7 M_{\odot}$  (желтые линии) и  $M = 3 \times 10^9 M_{\odot}$  (красные линии). Высота зазора  $h$  и длина свободного пробега  $\lambda_{\gamma\gamma}$  указаны в единицах горизонта черной дыры.

ся в разных точках вакуумного зазора.

Для вычисления траекторий частиц внутри и вне зазора решаются уравнения движения на фоне электрического, магнитного и гравитационного полей, следуя методу, представленному в работе [21]. Потери энергии на обратно-комptonовское рассеяние вычисляются с учетом реалистичного мягкого фонового спектра излучения - синхротронной компоненты излучения радиационно-неэффективного аккреционного потока. При вычислении спектра излучения от движущихся заряженных частиц учитывается доплеровское и гравитационное красное смещение. Размер зазора вычисляется самосогласованным образом как граница области рождения пар. Результаты вычисления высоты зазора представлены на Рис. 5. Для каждой данной массы черной дыры весь диапазон светимостей аккреционного потока разбивается на режимы “низкой”, “средней” и “высокой” светимостей. Все три режима имеют отличные друг от друга наблюдательные проявления в спектрах гамма-излучения ускоренных в зазоре электронов. Полученные спектры представлены на Рис. 6. Детали и форма спектра определяются деталями формы синхротронной компоненты спектра излучения аккреционного потока.

Максимальные энергии ускоренных в зазорах протонов приведены на Рис.7. В приближении “узких” зазоров протоны достигают энергий порядка  $E_p \sim 10^{18}$  эВ в случае аккреционных потоков

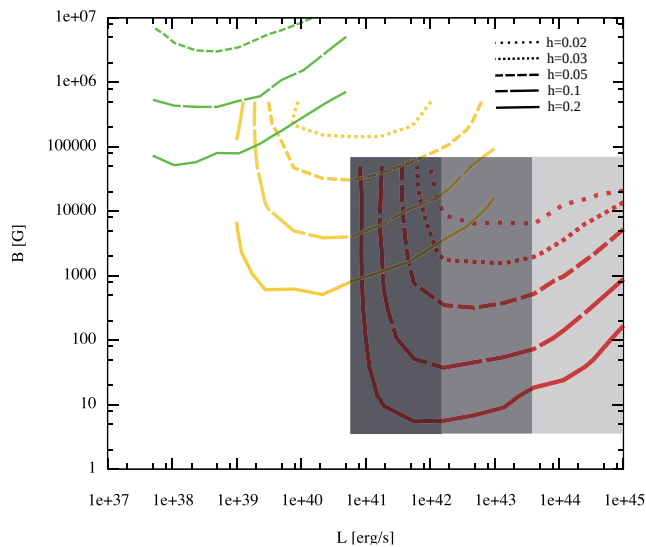


Рис. 5: Высота зазора как функция светимости  $L$  аккреционного потока и магнитного поля  $B$  у горизонта черной дыры для следующих значений массы черной дыры (слева направо):  $M = 3 \times 10^5 M_\odot$  (зеленые линии),  $M = 3 \times 10^7 M_\odot$  (желтые линии) и  $M = 3 \times 10^9 M_\odot$  (красные линии). Темно-серая, серая и светло-серая области соответствуют режимам низкой, средней и высокой светимостей аккреционного потока для черной дыры массы  $M = 3 \times 10^9 M_\odot$ .



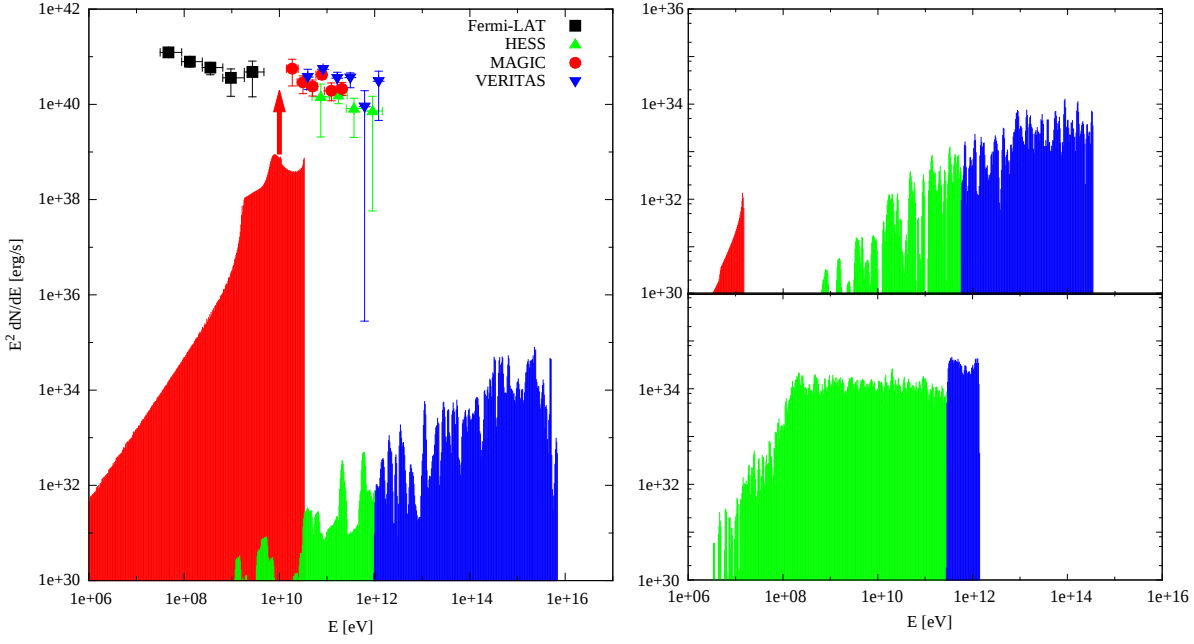


Рис. 6: Спектр излучения электронов в зазоре в квазимонопольной магнитосфере черной дыры массы  $M = 3 \times 10^9 M_\odot$  в режиме радиационно-неэффективного потока низкой светимости  $L = 8 \times 10^{40}$  эрг/с,  $B = 10^3$  Гс (слева), средней светимости  $L = 5 \times 10^{41}$  эрг/с,  $B = 10^3$  Гс (справа сверху) и высокой светимости  $L = 10^{43}$  эрг/с,  $B = 10^2$  Гс (справа внизу). В режиме низкой светимости спектр доминируется синхротронной/изгибной компонентой спектра (красные области), в режимах средней и высокой светимостей доминирует компонента обратного комптоновского излучения (синие и зеленые области), имеющая резкое обрезание на пороге рождения пар на синхротронной компоненте излучения аккреционного потока. Зеленый цвет соответствует покинувшим источник фотонам, синий – поглощенным за счет рождения пар. Красная стрелка соответствует неопределенности в нормировке спектров. Точки соответствуют наблюдениям гамма-излучения M87.

низкой светимости при магнитных полях вплоть до эддингтоновского предела.

В разделах 2.3 и 2.4 проводится обсуждение полученных в главе результатов и сформулированы основные выводы.

Третья глава посвящена анализу ограничений на адронные модели гамма-излучения бла-

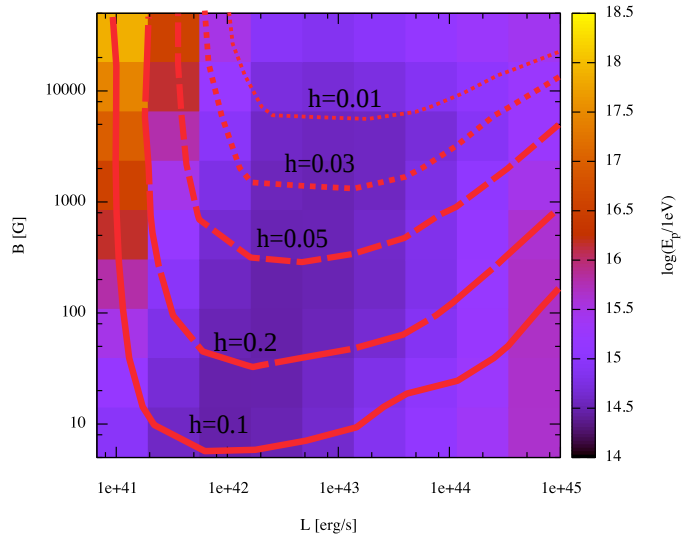


Рис. 7: Максимальные энергии протонов, ускоренных в зазоре. Масса черной дыры  $M = 3 \times 10^9 M_\odot$ .

заров с использованием данных коллаборации IceCube и данных гамма-телескопа Fermi. Анализируется кумулятивный спектр гамма-излучения и нейтрино для большой выборки блазаров Северного полушария. В адронных моделях ожидаемые полные потоки нейтрино и гамма-излучения от источника по порядку величины равны между собой  $F_\nu \sim F_\gamma$ .

В разделе 3.1 описаны преимущества используемого подхода. В разделе 3.2 описан анализ данных. В стековом анализе гамма-излучения блазаров было выбрано  $N = 749$  блазаров на склонениях  $DEC > -5^\circ$  из третьего Fermi/LAT каталога источников [26], использовались открытые данные Fermi/LAT телескопа за период: август 2008 года - июнь 2016 года.

Полученный кумулятивный спектр изображен на Рис. 8.

В анализе данных IceCube использовались 29 мюонных событий нейтрино с энергией выше 200 ТэВ [28]. 90% верхний предел числа событий по мюонным нейтрино от блазаров с энергиями выше 200 TeV составляет  $N_{\text{lim}} = 4$ . Для вычисления верхнего предела на поток нейтрино от блазаров для произвольной формы спектра, рассчитывается максимальное возможное значение нормировки  $\kappa$  для нейтринного потока со степенным спектром  $dN_\nu/dE = \kappa (E/E_*)^{-\Gamma}$  (где  $E_*$  - есть нормировка энергии  $E_* = 1$  ПэВ) для различных показателей спек-

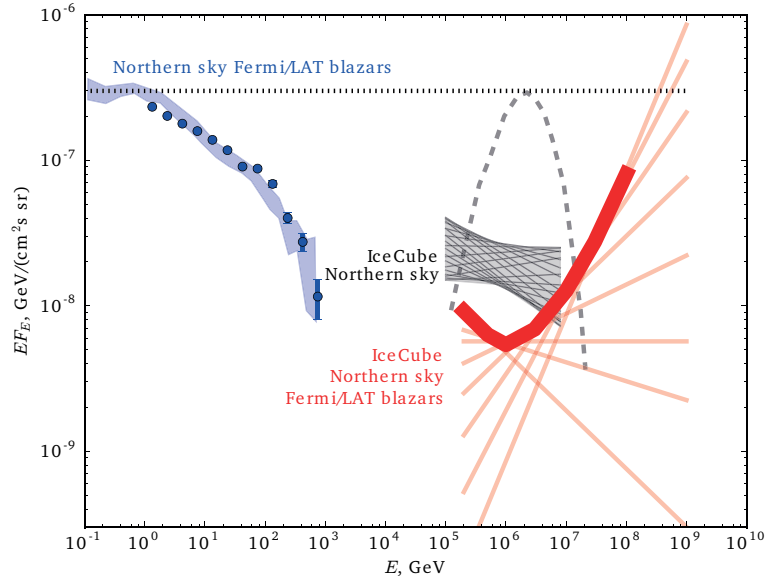


Рис. 8: Кумулятивный (синие точки) спектр гамма-излучения и верхний предел нейтринного потока (красный) для блазаров северного полушария. Серая штрихованная область показывает поток астрофизических мюонных нейтрино IceCube из [28]. Серой пунктирной линией показана модель нейтринного спектра для адронной модели из [20] (спектр протонов  $\Gamma = 2$ ,  $E_{\text{cut}} = 10^{17}$  эВ, взаимодействуют с фотонами аккреционного диска с максимумом спектра при  $\epsilon = 15$  эВ).

тра  $\Gamma$ . Следуя методу [20], вычисляется нормировка  $\kappa$  для различных значений  $\Gamma$  и находится их огибающая. Результат показан красными прямыми линиями на рис. 8. Жирная красная кривая – огибающая – ограничивает область допустимых степенных спектров.

**В разделе 3.3** анализируются ограничения на адронные модели гамма-излучения блазаров, полученные из анализа данных. Исключены адронные модели, в которых ожидается спектр нейтрино с максимумом мощности в ПэВ-ном диапазоне энергий, характерный для случая, когда ускоренные ударными волнами протоны ( $dN/dE_p \propto (E/E_*)^{-\Gamma}$ ,  $\Gamma \approx 2$ ) взаимодействуют с излучением геометрически тонкого аккреционного диска (максимум плотности излучения при энергиях  $\epsilon \approx 10$  эВ), Рис. 8. Исключены модели с ускоренными ударными волнами протонами, взаимодействующими с протонами и ядрами в окружающем веществе. Совместны с ограничениями модели со степенным спектром протонов  $dN/dE_p \propto (E/E_*)^{-\Gamma}$ ,  $\Gamma \approx 2$ , взаимодействующих с фотонами инфракрасного или микроволнового диапазона [29], Рис. 9.

Другим типом адронных моделей являются модели, в которых

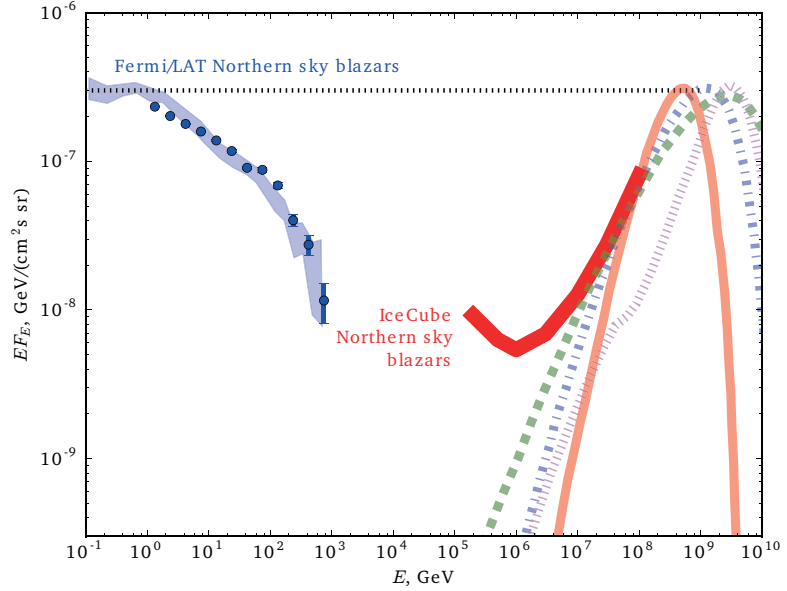


Рис. 9: Сравнение верхнего предела на поток нейтрино по данным IceCube с предсказаниями адронных моделей гамма-излучения блазаров: протоны спектра  $E^{-2} \exp(E/E_{\text{cut}})$ ,  $E_{\text{cut}} = 10^{20}$  эВ взаимодействуют с фотонами реликтового излучения и фоновыми внегалактическими фотонами [29] (малиновая пунктирная линия), протоны энергий  $3 \times 10^{19}$  эВ взаимодействуют с фотонами  $\epsilon = 10$  эВ (синяя штрих-пунктирная линия), протоны с энергиями  $10^{19}$  эВ взаимодействуют с фотонами  $\epsilon = 0.1$  эВ (красная сплошная линия), протоны энергий  $2 \times 10^{20}$  эВ взаимодействуют с низкоэнергетичными протонами (пунктирная зеленая линия).

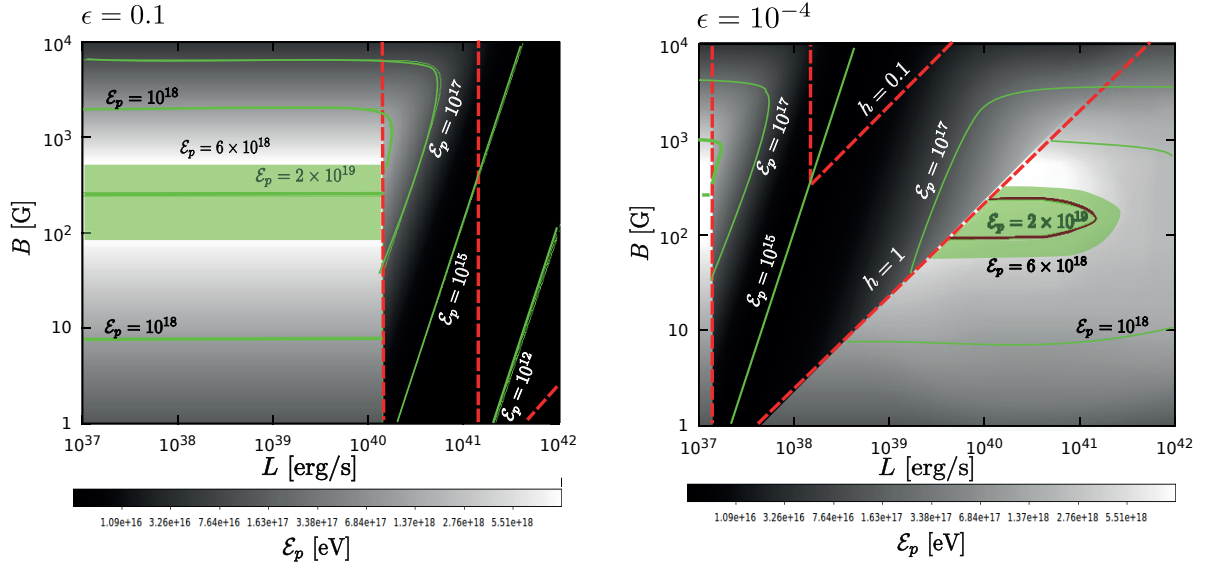


Рис. 10: Энергия протонов, ускоренных в вакуумном зазоре и распространяющихся в радиационно-неэффективном потоке на расстояния порядка длины свободного пробега  $p\gamma$ -взаимодействий с рождением пионов. Масса черной дыры  $M = 5 \times 10^9 M_{\odot}$ , угловой момент  $a = 0.1$ .  $L$  - светимость аккреционного потока,  $B$  - магнитное поле у горизонта черной дыры ( $B \propto r^{-5/4}$ , [5]). Максимум светимости аккреционного потока при энергиях  $\epsilon = 0.1$  eV (слева) и  $\epsilon = 10^{-4}$  eV (справа). Высота зазора  $h$  в единицах гравитационного радиуса черной дыры – красные пунктирные линии. Зеленые линии – энергии протонов. Зеленые закрашенные области – допустимые значения параметров  $L$  и  $B$ , совместные с ограничениями из анализа данных Fermi и IceCube.

спектр высокоэнергетичных протонов имеет резкий максимум ( $\Gamma \ll 2$ ), характерный для ускорения крупномасштабными электрическими полями, в областях магнитного пересоединения или в вакуумных зазорах в магнитосферах черных дыр. Если такие ускоренные протоны взаимодействуют с излучением оптически тонкого диска, совместными с ограничениями являются модели со спектрами протонов, имеющими резкое обрезание при энергиях ниже энергии в максимуме спектра  $E_{p, \max} \gtrsim 2 \times 10^{19}$  эВ. В случае радиационно-неэффективного потока ( $\epsilon \lesssim 0.1$  эВ) совместными с ограничениями являются модели со спектрами протонов, имеющими максимум при  $E_{p, \max} \gtrsim 0.6 \times 10^{19}$  эВ. При взаимодействии высокоэнергетичных протонов с низкоэнергетичными протонами из аккреционного потока не исключены модели со спектром протонов с максимумом спектра при  $E_{p, \max} \gtrsim 1 \times 10^{20}$  эВ, Рис. 9.

На Рис. 10 изображены области параметров модели ускорения

в вакуумных зазорах в магнитосферах черных дыр, соответствующих нетринному и электромагнитному излучениям, согласующимися с данными IceCube и Fermi.

В **разделе 3.4** сформулированы основные выводы главы 3.

В **заключении** перечислены основные результаты диссертации и обсуждаются перспективы дальнейших исследований. Также в заключении выражены благодарности.

## Список литературы

- [1] Aharonian F. et al. An exceptional very high energy Gamma-Ray flare of PKS 2155–304 //The Astrophysical Journal Letters. – 2007. – V. 664. – №. 2. – P. L71.
- [2] Aleksic J. et al. Black hole lightning due to particle acceleration at subhorizon scales //Science. – 2014. – V. 346. – №. 6213. – P. 1080-1084.
- [3] Neronov A., Vovk I., Malyshev D. Central engine of a gamma-ray blazar resolved through the magnifying glass of gravitational microlensing //Nature Physics. – 2015. – V. 11. – №. 8. – P. 664-667.
- [4] Vovk I., Neronov A. Microlensing constraints on the size of the gamma-ray emission region in blazar B0218+ 357 //Astronomy and Astrophysics. – 2016. – V. 586. – P. A150.
- [5] Yuan F., Narayan R. Hot accretion flows around black holes //Annual Review of Astronomy and Astrophysics. – 2014. – V. 52. – P. 529-588.
- [6] Blandford R. D., Znajek R. L. Electromagnetic extraction of energy from Kerr black holes //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1977. – V. 179. – №. 3. – P. 433-456.
- [7] Beskin V. S., Istomin Y. N., Parev V. I. Filling the magnetosphere of a supermassive black-hole with plasma //Soviet Astronomy. – 1992. – V. 36. – P. 642.

- [8] Hirotani K., Okamoto I. Pair plasma production in a force-free magnetosphere around a supermassive black hole //The Astrophysical Journal. – 1998. – V. 497. – №. 2. – P. 563.
- [9] Levinson A. Particle acceleration and curvature TeV emission by rotating, supermassive black holes //Physical Review Letters. – 2000. – V. 85. – №. 5. – P. 912.
- [10] Levinson A., Rieger F. Variable TeV emission as a manifestation of jet formation in M87? //The Astrophysical Journal. – 2011. – V. 730. – №. 2. – P. 123.
- [11] Blandford R. D. Lighthouses of the Universe, ed. M. Gilfanov, R. Sunyaev et al. – 2001.
- [12] Dermer C. D., Schlickeiser R. Model for the high-energy emission from blazars //The Astrophysical Journal. – 1993. – V. 416. – P. 458.
- [13] Neronov A., Aharonian F. A. Production of TeV gamma radiation in the vicinity of the supermassive black hole in the giant radio galaxy M87 //The Astrophysical Journal. – 2007. – V. 671. – №. 1. – P. 85.
- [14] Hirotani K., Pu H. Y. Energetic Gamma Radiation from Rapidly Rotating Black Holes //The Astrophysical Journal. – 2016. – V. 818. – №. 1. – P. 50.
- [15] Hirotani K. et al. Lepton acceleration in the vicinity of the event horizon: High-energy and Very-high-energy emissions from rotating black holes with various masses //The Astrophysical Journal. – 2016. – V. 833. – №. 2. – P. 142.
- [16] Neronov A. Y., Semikoz D. V. Which blazars are neutrino loud? //Physical Review D. – 2002. – V. 66. – №. 12. – P. 123003.
- [17] Neronov A., Ribordy M. IceCube sensitivity for neutrino flux from Fermi blazars in quiescent states //Physical Review D. – 2009. – V. 80. – №. 8. – P. 083008.

- [18] IceCube Collaboration et al. Evidence for high-energy extraterrestrial neutrinos at the IceCube detector //Science. – 2013. – V. 342. – №. 6161. – P. 1242856.
- [19] Aartsen M. G. et al. Observation and Characterization of a Cosmic Muon Neutrino Flux from the Northern Hemisphere using six years of IceCube data //The Astrophysical Journal. – 2016. – V. 833. – №. 1. – P. 3.
- [20] Tchernin C. et al. An exploration of hadronic interactions in blazars using IceCube //Astronomy and Astrophysics. – 2013. – V. 555. – P. A70.
- [21] Neronov A. Y., Semikoz D. V., Tkachev I. I. Ultra-high energy cosmic ray production in the polar cap regions of black hole magnetospheres //New Journal of Physics. – 2009. – V. 11. – №. 6. – P. 065015.
- [22] Neronov A., Semikoz D. Particle acceleration and formation of jets in the cores of active galactic nuclei //New Astronomy Reviews. – 2003. – V. 47. – №. 6. – P. 693-696.
- [23] Abreu P. et al. The Pierre Auger Observatory I: The cosmic ray energy spectrum and related measurements //arXiv preprint arXiv:1107.4809. – 2011.
- [24] Li Y. R., Ho L. C., Wang J. M. Cosmological evolution of Supermassive black holes. I. Mass Function at  $0 < z < 2$  //The Astrophysical Journal. – 2011. – V. 742. – №. 1. – P. 33.
- [25] Калашев О.Е., диссертация на соискание степени канд. физ.-мат. наук, ИЯИ РАН, 2003
- [26] Acero F. et al. Fermi large area telescope third source catalog //The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2015. – V. 218. – №. 2. – P. 23.
- [27] Ackermann M. et al. The third catalog of active galactic nuclei detected by the Fermi Large Area Telescope //The Astrophysical Journal. – 2015. – V. 810. – №. 1. – P. 14.

- [28] IceCube Collaboration, Aartsen, M. G., Abraham, K., et al. 2016, ArXiv e-prints [arXiv: 1609.04981]
- [29] Essey W. et al. Role of line-of-sight cosmic-ray interactions in forming the spectra of distant blazars in TeV gamma rays and high-energy neutrinos //The Astrophysical Journal. – 2011. – V. 731. – №. 1. – P. 51.
- [30] Kalashev O. E., Ptitsyna K. V., Troitsky S. V. Towards a model of population of astrophysical sources of ultrahigh-energy cosmic rays //Physical Review D. – 2012. – V. 86. – №. 6. – P. 063005.
- [31] Kalashev O., Ptitsyna K., Troitsky S. Constraints on direct acceleration of UHECRs in astrophysical sources //EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2013. – V. 53. – P. 06003.
- [32] Ptitsyna K., Neronov A. Particle acceleration in the vacuum gaps in black hole magnetospheres //Astronomy and Astrophysics. – 2016. – V. 593. – P. A8.
- [33] Neronov A., Semikoz D. V., Ptitsyna K. Strong constraint on hadronic models of blazar activity from Fermi and IceCube stacking analysis //arXiv preprint arXiv:1611.06338. – 2016.



Научное издание  
Птицына  
Ксения Владимировна

Происхождение космических лучей,  
нейтрино и гамма-излучения  
в окрестностях сверхмассивных черных дыр  
в центрах галактик

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук на тему

Ф-т 60x84/16 Уч.-изд.л. 1,1 Зак. № 22413 Тираж 80 экз. Бесплатно

Печать цифровая

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук  
Издательский отдел

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а