

На правах рукописи

Кириллов Александр Александрович

АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ЭКЗОТИЧЕСКИХ
МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ОБЪЕКТОВ ГАЛО ГАЛАКТИКИ

01.04.16 — «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор



Москва — 2013

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Хлопов Максим Юрьевич

Официальные оппоненты:

Герштейн Семен Соломонович, академик РАН, доктор физико-математических наук, ГНЦ РФ «Институт физики высоких энергий», главный научный сотрудник

Докучаев Вячеслав Иванович, доктор физико-математических наук, Институт ядерных исследований РАН, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз

Защита состоится «20» июня 2013 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 при НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан « » мая 2013 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



С. Е. Улин

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В астрофизике и космологии существует целый ряд неразрешенных задач, к важнейшим из которых можно отнести проблему скрытой массы (DM) Вселенной. Для объяснения ее природы предложено значительное количество независимых моделей. Их косвенной проверкой может служить анализ астрофизических данных по космическим лучам [1]. Аннигиляция или распад частиц скрытой массы могут приводить к появлению потоков высокоэнергетичных космических лучей, гамма-излучения, потоков нейтрино [2, 3].

Из первичных возмущений плотности частиц скрытой массы в процессе эволюции образуются субструктуры (сгустки) в широком диапазоне масштабов и масс [4, 5]. Повышенная плотность в сгустках и малые относительные скорости частиц приводят к росту темпа аннигиляции, что может привести к проявлению сгустков в виде источников гамма-излучения при существовании соответствующих каналов.

В то же время наблюдательные данные космических лучей и гамма-излучения включают целый ряд необъясненных явлений, природа которых может быть связана с частицами DM. Одной из таких проблем является регистрация значительного количества неидентифицированных точечных гамма-источников (ГИ). Полные обзоры неба, проведенные в экспериментах EGRET и Fermi LAT, привели к обнаружению 170 [6] и 575 неидентифицированных источников [7] соответственно. Стоит при этом отметить, что

LAT подтвердил лишь $\sim 30\text{--}40\%$ источников EGRET, что также составляет определенную проблему.

Происхождение неидентифицированных ГИ может быть связано с другой важной проблемой — проверкой моделей образования первичных черных дыр (ПЧД) во Вселенной. ПЧД являются одной из возможных форм ДМ, связанной с процессами физики высоких энергий, протекающих в очень ранней Вселенной. На данный момент существует несколько механизмов образования ПЧД. Некоторые модели формирования массивных ПЧД в галактических центрах [8] предсказывают также множественное рождение более мелких черных дыр в широком диапазоне масс. При этом пространственное распределение таких ПЧД имеет кластерную структуру. Характерное время жизни такого объекта превосходит возраст современной Вселенной. Рассмотрение астрофизических проявлений отдельного кластера позволяет сделать вывод о возможности его регистрации в виде точечного гамма-источника. Гамма-излучение рождается за счет механизма испарения Хоукинга [9], интенсивность которого становится достаточно велика для ЧД малых масс, которые присутствуют в кластере.

Кроме того, предложения по проверке моделей происхождения неидентифицированных ГИ с помощью будущих гамма-телескопов приобретают особую важность в период подготовки научной и технической программы нового гамма-эксперимента ГАММА-400.

Цель работы

Целью работы является развитие метода поиска астрофизических проявлений сгустков скрытой массы и кластеров первичных черных дыр, образующихся в ранней Вселенной, с помощью наблюдательных данных по неидентифицированным точечным источникам гамма-излучения.

Научная новизна работы

1. Впервые на основе данных о неотожествленных гамма-источниках получены допустимые области значений параметров сечения аннигиляции частиц скрытой массы, степенным образом зависящего от относительной скорости и учитывающего возможность наличия дополнительного взаимодействия кулоновского типа.
2. Впервые предложен кандидат на роль субдоминантной компоненты скрытой массы Вселенной — тяжелое стабильное нейтрино с массой ≈ 47 ГэВ и дополнительным взаимодействием кулоновского типа, сгустки которого в Галактике могут проявляться в виде неидентифицированных источников гамма-излучения.
3. Впервые указана возможность проявления кластеров первичных черных дыр в виде источников гамма-излучения.
4. Предложен новый кандидат (кластеры ПЧД) на объяснение гамма-источников неизвестного происхождения, обнаруженных в эксперименте Fermi LAT.

Результаты, выносимые на защиту

1. Разработка нового метода поиска астрофизических проявлений сгустков скрытой массы как точечных гамма-источников.
2. Ограничения на параметры сечения аннигиляции частиц скрытой массы на основе данных Fermi LAT о точечных гамма-источниках.
3. Согласованность модели аннигилирующих массивных нейтрино 4-го поколения (с дополнительным взаимодействием кулоновского типа и массой ≈ 47 ГэВ) с данными Fermi LAT о неидентифицированных источниках гамма-излучения.
4. Разработка нового метода поиска астрофизических проявлений кластеров первичных черных дыр как точечных гамма-источников.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в том, что выполненные исследования позволяют понять возможную природу неидентифицированных источников Fermi LAT и физику «реликтов» ранней Вселенной, способных формировать компактные экзотические объекты в Галактике. Полученные результаты также могут найти применение в будущих астрофизических экспериментах в области гамма-излучения.

Вклад автора

Личный вклад автора состоит в:

- определении областей параметров сечения аннигиляции частиц скрытой массы на основе данных эксперимента Fermi LAT о неидентифицированных ГИ;
- предсказании возможности наблюдения гамма-источников, меняющих свое положение на небесной сфере;
- формулировке и обосновании идеи о возможном проявлении кластеров первичных черных дыр в виде точечных гамма-источников;
- выполнении расчетов спектров излучения кластеров ПЧД, оценке возможного количества наблюдаемых гипотетических объектов;
- подготовке публикаций по выполненной работе и апробации результатов исследований.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены на:

- Сессиях-конференциях секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», г. Москва, Россия, 2011, 2012 гг.
- Всероссийской астрономической конференции, Нижний Архыз, Россия, 2010 г.
- 31-й Всероссийской конференции по космическим лучам, г. Москва, Россия, 2010 г.
- Международной конференции «Современные проблемы гравитации, космологии и релятивистской астрофизики», г. Москва, Россия, 2010 г.

- Российском семинаре «Нелинейные поля в теории гравитации и космологии», г. Казань, Россия, 2010 г.
- Курчатовских молодежных научных школах, г. Москва, Россия, 2009, 2012 гг.
- Баксанской молодежной школе ЭТФ, Приэльбрусье, Россия, 2008 г.
- Научных сессиях МИФИ, г. Москва, Россия, 2008, 2009, 2010, 2013 гг.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 3 в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из аннотации, введения, двух глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 89 страниц, 15 рисунков, 1 таблицу и список литературы из 149 наименований.

Содержание работы

В диссертационной работе изучаются возможные астрофизические проявления экзотических мелкомасштабных объектов гало Галактики в виде точечных источников гамма-излучения. Рассмотрены 2 типа экзотических объектов, природа которых связана с «новой физикой» сверххранной Вселенной: сгустки скрытой массы и кластеры первичных черных дыр.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цель, выносимые на защиту результаты, отмечены практическое значение и новизна полученных результатов.

В главе 1 рассматривается проблема поиска наблюдательных сигналов от сгустков скрытой массы. Холодная скрытая масса не образует такой плотной структуры, как барионное вещество (галактический диск, звезды и др.). Несмотря на это в ней возможно существование неоднородностей, представляющих области повышенной плотности, которые возникают за счет гравитационного сгущивания (сгустки). Частицы скрытой массы формируют структуры в широком диапазоне масс (от мелкомасштабных с характерными массами $10^{-12} - 10^{-6} M_{\odot}$ до крупномасштабных с массами от $10^{11} M_{\odot}$) [4, 5]. Аннигиляция частиц внутри этих структур может приводить к появлению потоков высокоэнергетичных космических лучей, гамма-излучения, нейтрино [2, 3]. Темп аннигиляции может усиливаться благодаря повышенной плотности частиц скрытой массы и малым относительным скоростям частиц. Оба условия могут реализоваться внутри сгустков [5, 10]. В работе показано, что при определенных параметрах частиц и сгустков последние могут проявляться как источники гамма-излучения.

На данный момент нет единого мнения относительно формирующегося профиля плотности внутри сгустка (например, [11]). В работе проведено сравнение различных профилей и показана значительная чувствительность предсказаний в зависимости от выбора профиля.

Уменьшение относительных скоростей v частиц скрытой массы, сосредоточенных в сгустках, сильно влияет на темп аннигиляции, если соответствующее сечение σ_{ann} зависит от скорости v (например, [12]). В работе

предложен вид параметризации сечения аннигиляции, включающий в себя широкий класс моделей частиц:

$$\sigma_{\text{ann}} = \frac{\sigma_0}{v^\beta} \times C(v, \alpha),$$

где β — свободный параметр. В работе рассматривается случай многокомпонентной скрытой массы, когда вклад в относительную плотность компоненты аннигилирующих частиц $\Omega < \Omega_{\text{CDM}}$ определяется параметром σ_0 , где $\Omega_{\text{CDM}} \approx 0.2$ — относительная плотность холодной скрытой массы во Вселенной. Фактор $C(v, \alpha)$ используется для учета возможности включения взаимодействия кулоновского типа (y -взаимодействия) частиц ДМ. Этот фактор приводит к усилению сечения аннигиляции при уменьшении v и имеет следующий вид [13]:

$$C(v, \alpha) = \frac{2\pi\alpha/v}{1 - \exp(-2\pi\alpha/v)},$$

где α является аналогом постоянной тонкой структуры для дополнительного взаимодействия кулоновского типа. Указанное взаимодействие может немного уменьшать реликтовую плотность и значительно усиливать аннигиляцию в современной Вселенной, где скорости частиц малы [14]. Аннигиляционные эффекты становятся значительны даже для субдоминантной компоненты скрытой массы $\Omega \ll \Omega_{\text{CDM}}$, как это имеет место в случае тяжелых нейтрино [15].

В работе определены значения параметров сечения аннигиляции, при которых сгустки скрытой массы могут проявлять себя как неидентифи-

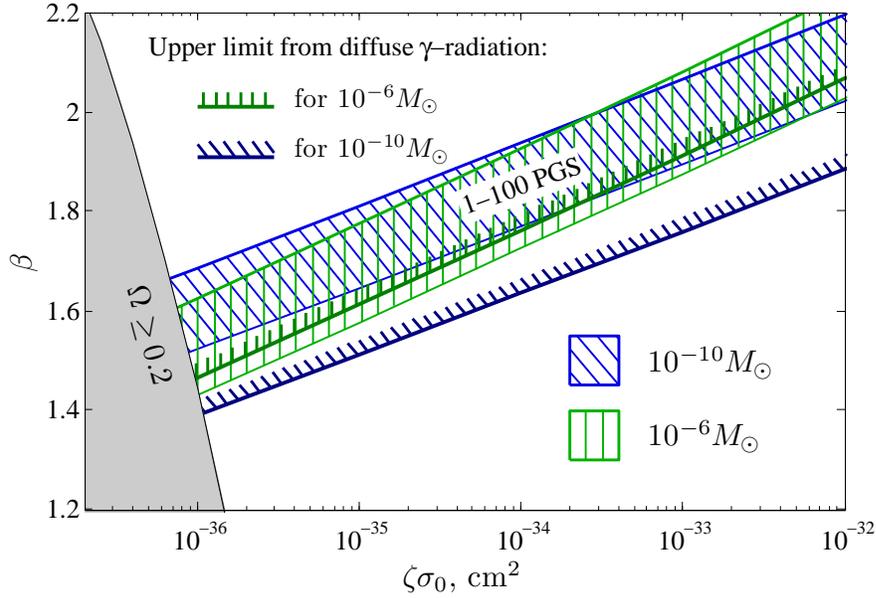


Рис. 1. Разрешенные и запрещенные области параметров β и σ_0 для случая без дополнительного взаимодействия кулоновского типа. Представлены 2 значения минимальных масс сгустков.

цированные точечные источники гамма-излучения (PGS). Сравнение с наблюдательными данными по неидентифицированным источникам (эксперименты EGRET (1991—2000 гг.) [6] и Fermi LAT (2008—н.в.) [7]) позволяет получить ограничения на возможные значения пространства параметров (рис. 1, 2). Показано, что сгустки тяжелого стабильного нейтрино 4-го поколения ν_4 с дополнительным взаимодействием кулоновского типа при массе частиц $m \approx 47$ ГэВ способны объяснить часть неидентифицированных источников Fermi LAT.

В работе предсказано, что случае близкого расположения сгустков скрытой массы к наблюдателю возможны эффекты смещения гамма-источника на небесной сфере. Это предсказание может частично объяснять несоответствие между данными каталогов экспериментов EGRET и LAT (источники, регистрируемые EGRET и не подтвержденные LAT).

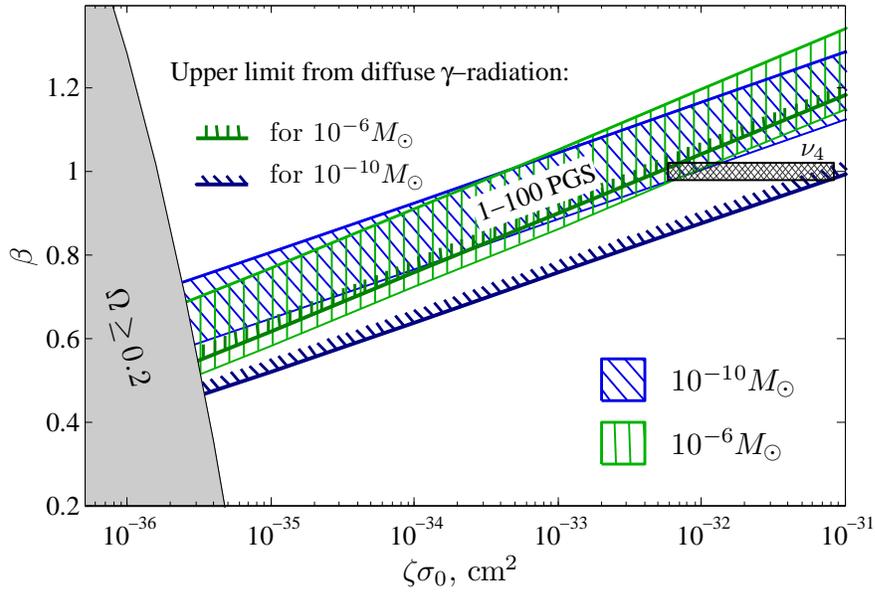


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для случая с дополнительным взаимодействием. ν_4 на рисунке соответствует случаю тяжелого нейтрино с массой $m \approx 47$ ГэВ.

Показано, что сгустки могут наблюдаться в виде пространственно протяженных ГИ. Сделаны предсказания, доступные экспериментальной проверке в будущем эксперименте ГАММА-400 (рис. 3).

Глава 2 посвящена исследованию возможности астрофизического проявления кластеров первичных черных дыр (ПЧД). В рамках инфляционных сценариев рождения ПЧД, основанных на последовательности фазовых переходов с образованием доменных стенок, возможно формирование не одиночных черных дыр, а их кластеров с широким массовым спектром. Такие сценарии предсказывают появление сверхмассивных черных дыр в галактических ядрах, а также существование черных дыр малых масс с характерной структурой кластера в галактических гало на больших расстояниях от их центров [16].

В диссертации предложен метод обнаружения подобных кластеров чер-

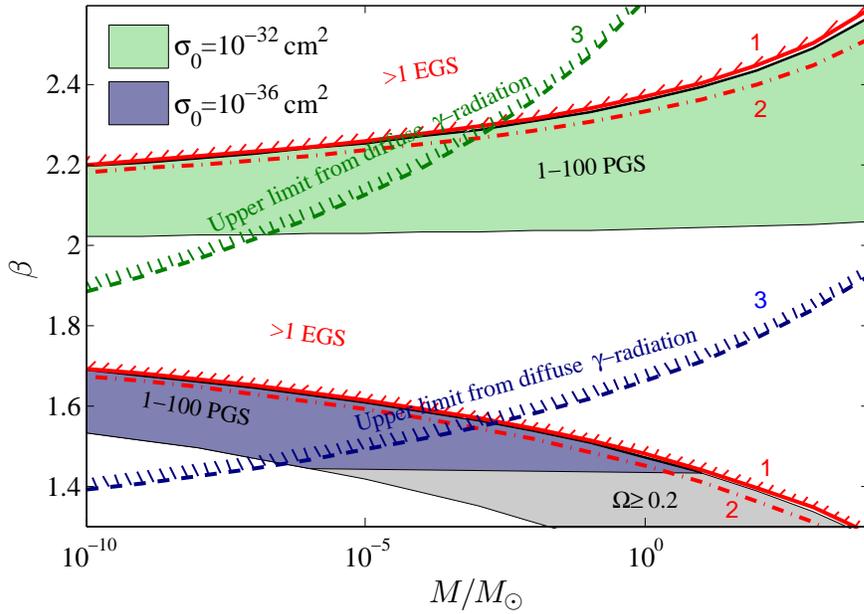


Рис. 3. Показаны разрешенные и запрещенные области параметров β и M для случая частиц без y -взаимодействия для двух типичных значений σ_0 . Сплошная (1) и штрих-пунктирная (2) линии соответствуют наблюдению одного неточечного источника для Fermi LAT и ГАММА-400 соответственно. При фиксированной массе M количество неточечных источников растет с увеличением β .

ных дыр с помощью хукинговского излучения [9]. Для одиночных малых ПЧД данный способ эффективен только для ПЧД вблизи Земли. Однако в кластерах количество малых черных дыр (с массами $M < M_* \sim 10^{15}$ г), которые дают вклад в гамма-излучение, может быть достаточно большим, чтобы интегральное излучение всего кластера было зарегистрировано как ГИ на Земле с большого расстояния. Это дает возможность альтернативного объяснения природы точечных неидентифицированных источников Fermi LAT.

В сценарии формирования массивных ПЧД предсказание современного массового распределения ПЧД в кластерах сильно зависит от начальных условий в период инфляции и параметров лагранжиана скалярного поля,

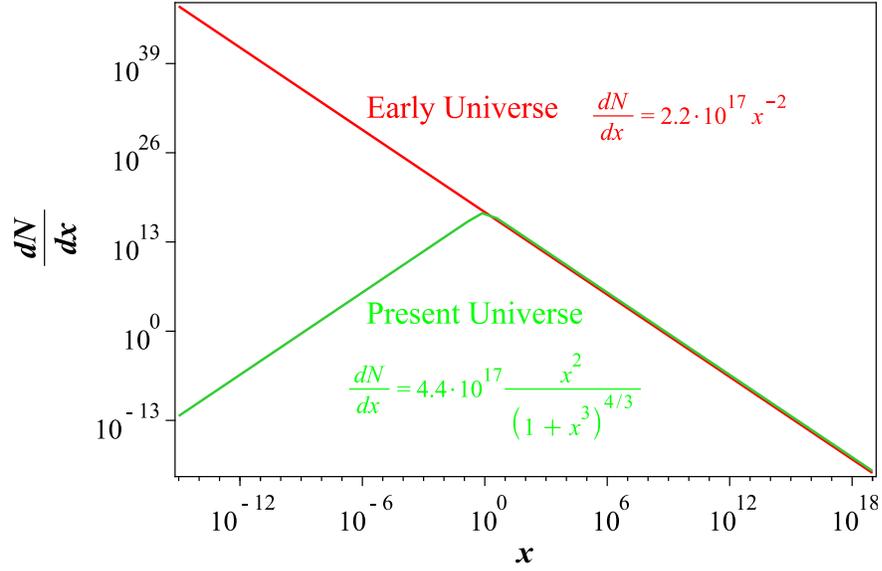


Рис. 4. Массовое распределение черных дыр в кластере, $x = M/M_*$.

благодаря которому осуществляется фазовый переход. В работе был выбран потенциал скалярного поля

$$V(|\phi|, \theta) = \lambda \left(\phi^* \phi - \frac{1}{2} f^2 \right)^2 + \Lambda^4 (1 - \cos \theta).$$

Параметры Λ , f и λ определяют масштаб нарушения симметрии лагранжиана относительно группы $U(1)$. При значениях параметров $f = 10.0$ и $\Lambda = 1.66$ в единицах параметра Хаббла на инфляционной стадии, и практически произвольном λ можно получить структуры кластеров с массовым распределением, представленным на рис. 4, и типичными размерами $R \sim 1$ пк и массами $M \sim 10M_\odot$. Начальные условия выбраны в предположении, что количество сформированных кластеров ПЧД заведомо больше, чем количество неидентифицированных ГИ, зарегистрированных в эксперименте Fermi LAT. При указанных значениях параметров в галактическом гало в ранней Вселенной должно было присутствовать ~ 1400 кластеров.

Оценки показали, что полученная плотность ПЧД в современной Вселенной $\Omega_{\text{ПЧД}} \sim 3 \times 10^{-10}$ и не противоречит существующим ограничениям [17].

Значительные искажения в результирующий массовый спектр в области малых масс ($M \lesssim M_*$) вносятся за счет испарения ЧД (см. рис. 4). При этом неисчезающее значение распределения в данной области поддерживается хоукинговским испарением бóльших черных дыр в пределах того же кластера.

В работе рассчитан спектр гамма-излучения от кластеров ПЧД. Показано, что в области энергий, регистрируемых детектором Fermi LAT ($E_\gamma > 100$ МэВ), интенсивность излучения имеет вид $I = dN/dE dt \propto E^{-3}$. Fermi LAT зарегистрировал 15 источников со спектральным индексом 3 в рамках ошибки 1σ и 93 источника в рамках 3σ . Их распределение на небесной сфере является однородным, а количество находится в согласии с ожидаемым.

На рис. 5 представлен рассчитанный спектр фотонов от кластера ПЧД. Следует отметить, что максимум при $E_\gamma \sim 10$ МэВ в этом спектре соответствует значению $M_\odot \sim 10^{15}$ г в массовом спектре на рис. 4. Из рис. 5 видно, что рентгеновские телескопы не способны регистрировать кластеры ПЧД, поскольку их чувствительность намного меньше, чем пороговое значение, доступное для регистрации.

Таким образом, при определенном наборе параметров моделей сгустки DM и кластеры ПЧД могут проявлять себя в качестве неидентифицированных источников гамма-излучения. Это может объяснять часть данных Fermi LAT. Важным отличительным свойством данных моделей являются их предсказанные спектры. Эти спектры в случае скрытой массы зависят

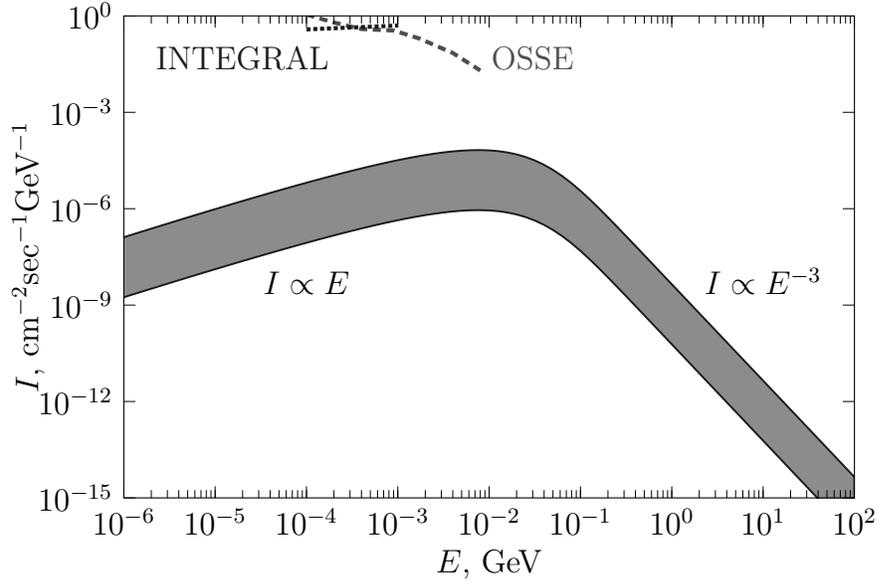


Рис. 5. Показан ожидаемый фотонный спектр от кластера ПЧД (закрашенная область). Под этой областью поток ожидается ниже интегральной чувствительности LAT ($r > R_{\max}$). Также показана дифференциальная чувствительность рентгеновских детекторов INTEGRAL и OSSE.

от выбранной модели частиц, например, для тяжелого нейтрино, которое может объяснять данные Fermi LAT, спектр получается более жестким (E^{-2} при $E > 100$ МэВ).

Также в диссертации показано, что заметное смещение на небесной сфере и наличие протяженных гамма-источников возможны только для сгустков скрытой массы.

В заключении перечислены основные результаты:

1. На основе данных Fermi LAT о неидентифицированных точечных ГИ определены разрешенные и запрещенные области параметров сечения аннигиляции частиц скрытой массы.
2. Данные Fermi LAT по неидентифицированным источникам согласуются с гипотезой об аннигиляции массивных нейтрино 4-го поколения

с массой ≈ 47 ГэВ и дополнительным взаимодействием кулоновского типа.

3. Показано, что сгустки скрытой массы могут проявляться как пространственно протяженные и меняющие свое положение на небесной сфере источники гамма-излучения.
4. Разработана новая модель поиска астрофизических проявлений кластеров первичных черных дыр как точечных гамма-источников.

Основное содержание диссертации было опубликовано в следующих работах

1. К.М. Belotsky, A.V. Berkov, A.A. Kirillov, S.G. Rubin «Black hole clusters within our galaxy», *Gravitation & Cosmology*, 17 (1), 27–30, 2011;
2. К.М. Belotsky, A.V. Berkov, A.A. Kirillov, S.G. Rubin «Clusters of Black Holes as Point-Like Gamma-ray Sources», *Astroparticle Physics*, 35 28–32, 2011, arXiv: astro-ph.HE/1212.2524;
3. Белоцкий К.М., Кириллов А.А., Хлопов М.Ю. «Астрофизические проявления сгустков холодной скрытой массы», *Ядерная физика*, 76 (4), 506–512, 2013;
К.М. Belotsky, A.A. Kirillov, M.Yu. Khlopov «Astrophysical Manifestations of Clumps of Cold Dark Matter», *Physics of Atomic Nuclei*, 76 (4), 469–475, 2013;

4. K. M. Belotsky, A. A. Kirillov, M. Yu. Khlopov «Gamma-ray evidences of the dark matter clumps», arXiv: astro-ph.HE/1212.6087;
5. Белоцкий К.М., Кириллов А.А., Хлопов М.Ю. «Точечные гамма-источники как свидетельство скрытой массы», Труды 31-й Всероссийской конференции по космическим лучам, — М.: МГУ, 2010;
6. Белоцкий К.М., Кириллов А.А., Рубин С.Г. «О возможности обнаружения кластеров первичных черных дыр», Труды российского семинара «Нелинейные поля в теории гравитации и космологии», — Казань: Фолиантъ, 2010, стр. 146–147;
7. Кириллов А.А., Белоцкий К.М., Хлопов М.Ю. «Исследование возможности обнаружения сгустков скрытой массы как точечных источников гамма-излучения», Сборник научных трудов Научной сессии МИФИ — М.: МИФИ, 2008, стр. 29–30;
8. Белоцкий К.М., Кириллов А.А., Хлопов М.Ю. «Исследование природы скрытой массы с помощью данных EGRET/FERMI о точечных гамма-источниках», Труды научной сессии НИЯУ МИФИ, — М.: МИФИ, 2010, стр. 29–32;
9. Белоцкий К.М., Кириллов А.А., Хлопов М.Ю. «Исследование возможности обнаружения сгустков скрытой массы как точечных источников гамма-излучения», Труды 9-й Баксанской молодежной школы экспериментальной и теоретической физики, — М.: МИФИ, 2009, стр. 21–30.

Список цитируемой литературы

1. Y. B. Zeldovich *et al.*, “Astrophysical restrictions of the Heavy Stable Neutral Leptons Mass,” *Yad. Fiz.* **31** (1980) 1286–1294.
2. L. Bergström, “Non-baryonic dark matter: observational evidence and detection methods,” *Rep. Prog. Phys.* **63** (2000) 793–841, [arXiv:hep-ph/0002126](#).
3. G. Bertone, D. Hooper, and J. Silk, “Particle dark matter: evidence, candidates and constraints,” *Phys. Rep.* **405** (2005) 279–390, [arXiv:hep-ph/0404175](#).
4. A. V. Gurevich and K. P. Zybin, “Large-scale structure of the Universe. Analytic theory,” *Sov. Phys. Usp.* **38** (1995) 687–722.
5. A. V. Gurevich, K. P. Zybin, and V. A. Sirota, “Small-scale structure of dark matter and microlensing,” *Sov. Phys. Usp.* **40** (1997) 869–898.
6. R. C. Hartman *et al.*, “The Third EGRET Catalog of High-Energy Gamma-Ray Sources,” *Astrophys. J. Suppl.* **123** (1999) 79–202.
7. P. L. Nolan *et al.*, “Fermi Large Area Telescope Second Source Catalog,” *Astrophys. J. Suppl.* **199** (2012) 31, [arXiv:1108.1435 \[astro-ph.HE\]](#).
8. S. G. Rubin, A. S. Sakharov, and M. Y. Khlopov, “The Formation of Primary Galactic Nuclei during Phase Transitions in the Early Universe,” *Sov. Phys. JETP* **92** (2001) 921–929, [arXiv:hep-ph/0106187](#).
9. S. W. Hawking, “Particle creation by black holes,” *Comm. Math. Phys.* **43** (1975) 199–220.
10. V. Berezhinsky, V. Dokuchaev, and Y. Eroshenko, “Small-scale clumps in the galactic halo and dark matter annihilation,” *Phys. Rev. D* **68** (2003) 103003, [arXiv:astro-ph/0301551](#).
11. D. Merritt *et al.*, “Empirical Models for Dark Matter Halos. I. Nonparametric Construction of Density Profiles and Comparison with Parametric Models,” *Astron. J.* **132** (2006) 2685–2700, [arXiv:astro-ph/0509417](#).
12. J. Hisano *et al.*, “Cosmological constraints on dark matter models with velocity-dependent annihilation cross section,” *Phys. Rev. D* **83** (2011) 123511, [arXiv:1102.4658 \[hep-ph\]](#).
13. A. D. Sakharov, “Interaction of the electron and positron in pair production,” *Zh. Ehksp. Teor. Fiz.* **18** (1948) 631–635.
14. K. M. Belotsky *et al.*, “Effects of a new long-range interaction: Recombination of relic heavy neutrinos and antineutrinos,” *Grav. & Cosm.* **11** (2005) 27–33, [arXiv:astro-ph/0504621](#).

15. K. M. Belotsky *et al.*, “May heavy neutrinos solve underground and cosmic-ray puzzles?,” *Phys. of Atom. Nucl.* **71** (2008) 147–161, [arXiv:hep-ph/0411093](#).
16. M. Y. Khlopov, S. G. Rubin, and A. S. Sakharov, “Primordial structure of massive black hole clusters,” *Astropart. Phys.* **23** (2005) 265–277, [arXiv:astro-ph/0401532](#).
17. B. J. Carr, K. Kohri, Y. Sendouda, and J. Yokoyama, “New cosmological constraints on primordial black holes,” *Phys. Rev. D* **81** (2010) 104019, [arXiv:0912.5297 \[astro-ph.CO\]](#).