

ВОЗМОЖНОСТИ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СУБГАЛО ИЗ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ ТЕЛЕСКОПОМ ГАММА-400

© 2018 г. А. Е. Егоров^{1,*}, А. М. Гальпер^{1,2}, Н. П. Топчиев¹, А. А. Леонов^{1,2}, С. И. Сучков¹, М. Д. Хеймиц², Ю. Т. Юркин²

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Россия

E-mail: eae14@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.11.2017 г.

Изучены возможности детектирования галактических субгало из аннигилирующей темной материи в диапазоне масс 10^6 – $10^9 M_\odot$ проектируемым гамма-телескопом ГАММА-400. Внутренняя структура и распределение субгало в Галактике получены на базе соответствующих теоретических моделей. Показано, что ожидаемый поток гамма-квантов от таких субгало сильно зависит от массы частицы темной материи и степени концентрации темной материи внутри субгало и менее сильно зависит от массы субгало. В оптимистичном случае можно ожидать поток в 10–100 фот./год от самых близких и массивных субгало в диапазоне энергий от 100 МэВ, что делает их принципиально детектируемыми источниками для ГАММА-400. Что касается разрешения внутренней структуры субгало, это, по-видимому, может быть реалистично только в случае совместного анализа будущих данных ГАММА-400 и других телескопов вследствие малости потоков. Также в рамках нашей модели мы рассмотрели недавние кандидаты в темные субгало 3FGL J2212.5+0703 и J1924.8–1034. Сделан вывод о низкой вероятности принадлежности данных источников к популяции субгало.

DOI: 10.7868/S0044002718030108

1. ВВЕДЕНИЕ И МОТИВАЦИЯ

Физическая природа темной материи (ТМ), открытой уже более 80 лет назад, продолжает оставаться одной из главных нерешенных проблем современной астрофизики. Существует множество кандидатов на роль ТМ. Самым вероятным и естественным из них на сегодняшний день продолжает оставаться WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) в форме нейтралитно (см., например, [1]). Как известно, данные суперсимметричные частицы могут аннигилировать друг с другом с образованием высокоэнергичных частиц стандартной модели – фотонов, электронов, протонов и т.д. [1]. Такой процесс активно происходит в областях высокой концентрации ТМ и может быть косвенно обнаружен по излучению продуктов аннигиляции. Это является весьма перспективным подходом к открытию WIMP и ее физических параметров либо, по крайней мере, к ограничению последних. Такие не прямые поиски ТМ активно ведутся во всех объектах Вселенной, потенциально содержащих ТМ, от Солнца до скоплений галактик. Одними из таких объектов, представляющих значительный интерес, являются субгало из ТМ в темном гало нашей Галактики. N -частичное моделирование гало из ТМ уверенно предсказывает наличие

иерархической субструктуры внутри родительского гало в виде популяции субгало в широчайшем интервале масс вплоть до $\sim 10^{-6} M_\odot$ [1]. Так, современные N -частичные модели (например, [2]) позволяют выделить десятки тысяч субгало внутри гало, подобного гало Млечного пути (МП). Ожидается, что самые массивные субгало представляют собой известные карликовые спутники МП. Моделирование также показывает [3], что менее массивные субгало с массами менее 10^7 – $10^8 M_\odot$ не имеют какого-либо светящегося газа или звезд. Однако такие субгало могут быть расположены достаточно близко и являться яркими гамма-источниками вследствие аннигиляции ТМ. В то же время $\sim 1/3$ гамма-источников в 3FGL-каталоге Fermi-LAT остаются не отождествленными с какими-либо источниками в других диапазонах спектра [4]. Эти неоттождествленные источники вполне могут являться темными субгало. В целом, можно ожидать следующие ценные свойства субгало, позволяющие однозначно идентифицировать излучение от них как гамма-кванты от аннигилирующей ТМ: они почти не имеют какого-либо другого излучения; вообще не имеют переменности данного гамма-излучения; имеют одинаковый предсказуемый спектр; распределены на небе почти изотропно; могут быть разрешены как протяженные

источники (!), что исключено для многих астрофизических источников, таких, как блазары.

Таким образом, темные субгало представляют очень интересный объект для поисков ТМ. К настоящему моменту проведено достаточно глубокое изучение вопроса детектируемости субгало при помощи гамма-телескопов, в частности, Fermi-LAT [3]. Однако авторы указанной работы пришли к не оптимистичным прогнозам: Fermi-LAT способен в принципе зарегистрировать ~ 1 субгало на всем небе и разрешить < 1 субгало как протяженный объект. В то же время ряд научных групп уже изучали каталоги точечных источников гамма-излучения на предмет наличия в них кандидатов в субгало (например, [5]). В результате в 3FGL-каталоге Fermi-LAT удалось найти по крайней мере два достаточно интересных кандидата J2212.5+0703 и J1924.8–1034 [5–7]. Их точная природа пока остается предметом дискуссий. Этому посвящен раздел 4 данной статьи.

Также представляется очень актуальным и своевременным оценить потенциал будущих гамма-телескопов в аспекте детектирования темных субгало (например, [8]). Главной целью настоящей работы является исследование детектируемости субгало новым гамма-телескопом ГАММА-400, который находится в разработке и планируется к запуску около 2025 г. [9, 10]. Этот телескоп будет обладать уникальными энергетическим и угловым разрешениями. Они ожидаются на уровне $\sim 1\%$ и $\sim 0.01^\circ$ соответственно при энергии ~ 100 ГэВ, что существенно лучше, чем у Fermi-LAT. Таким образом, ГАММА-400, возможно, будет обладать высоким потенциалом детектирования и разрешения субгало как протяженных объектов, что, в свою очередь, может приблизить нас к пониманию природы ТМ. Также можно ожидать интересных результатов от совместного анализа данных ГАММА-400 вместе с данными других телескопов – Fermi-LAT, планируемого e-ASTROGAM [11] и др. В настоящей работе мы предполагаем, что вся ТМ состоит из нейтрино.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОПУЛЯЦИИ СУБГАЛО

Мы используем здесь детально развитую модель популяции галактических субгало работы [3], авторы которой провели N -частичное моделирование (симуляцию) гало МП как с холодной ТМ, так и с ТМ вместе с барионным компонентом. Значительных качественных различий между этими двумя случаями авторы не обнаружили. Диапазон масс субгало, которые разрешимы в данной симуляции $\sim 10^6$ – $10^{11} M_\odot$. Мы изучаем здесь субгало в диапазоне 10^6 – $10^9 M_\odot$, поскольку начиная с массы $\sim 10^9 M_\odot$ все субгало имеют звезды [3], являясь так называемыми карликовыми спутниками МП.

Разумеется, граница между субгало и карликами условна – это объекты одной и той же природы. Однако здесь мы не затрагиваем изучение сигналов от карликов, т.е. самых массивных субгало – карлики будут изучены нами отдельно в последующих работах. Что касается субгало с массами 10^6 – $10^9 M_\odot$, работа [3] предсказывает ~ 4000 таких объектов в МП, предполагая типичное распределение по массе $dN/dM \sim M^{-1.9}$.

Теперь представим кратко основные свойства субгало и распределения ТМ в них, выделенные на базе результатов работы [3]. Распределение плотности ТМ внутри субгало описывается функцией Эйнасто:

$$\rho(r) = \rho_s \exp\left[-\frac{2}{\alpha} \left(\left(\frac{r}{r_s}\right)^\alpha - 1\right)\right], \quad (1)$$

где r – расстояние от центра субгало, r_s, ρ_s – характерные шкалы радиуса и плотности субгало, $\alpha = 0.16$. Рисунки 2, 10 в [3] демонстрируют полученную зависимость радиуса r_s от массы субгало. Видно, что радиусы имеют довольно широкий разброс значений для каждой массы. Важно детально изучить эту неопределенность, поскольку, как будет видно ниже, интенсивность сигнала от субгало сильно зависит от величины r_s . В этом контексте мы решили сопоставить результаты симуляции с реальными данными о распределении массы внутри карликовых спутников МП. Для этого мы использовали работы [12, 13], которые воспроизвели распределение массы (т.е. ТМ, так как массой звезд и газа можно пренебречь) в известных карликах по данным наблюдений их кинематики. Такое сопоставление показало, что в целом [3] воспроизводит реальные карлики с разумной точностью. Однако был замечен следующий систематический тренд: карлики в среднем имеют меньшие r_s по сравнению с предсказанием симуляции, и если их нанести на рис. 2 из [3], видно, что они лежат около нижней границы модельного облака точек. В этой ситуации в качестве среднереалистичной зависимости r_s от M_{SH} было решено взять именно ту, которую демонстрируют реальные карлики, – она соответствует минимальным r_s из [3]. Приведем здесь ее аппроксимацию для воспроизводимости наших результатов:

$$\lg(r_s/\text{кпк}) = 0.441 \lg(M_{200}/M_\odot) - 4.10, \quad (2)$$

где M_{200} – вириальная масса субгало, т.е. масса внутри сферы со средней плотностью $200\rho_{\text{crit}}$. Шкала радиуса r_s задает, по сути, параметр концентрации субгало $c_{200} \approx r_{200}/r_s$, от которого, в свою очередь, сильно зависит интенсивность

гамма-излучения от ТМ всего субгало. Чем выше концентрация, тем выше интенсивность, зависящая от плотности ТМ квадратично. Поэтому важно изучить зависимость потока гамма-излучения от неопределенности модели концентрации. В этом аспекте помимо “средней” модели (2) мы также рассмотрели условные граничные (т.е. экстремальные) случаи: максимально возможные r_s в форме средней (синей) линии на рис. 2 [3], которые в ~ 2 раза больше средних r_s (2); а также минимально возможные: в $\equiv 2$ раза меньше средних. Максимальные r_s аппроксимированы уравнением

$$\lg(r_s/\text{кпк}) = -0.111 \lg^2(M_{200}/M_\odot) + 2.11 \lg(M_{200}/M_\odot) - 10.0. \quad (3)$$

Такой выбор диапазона возможных значений r_s не случаен: данный диапазон примерно соответствует диапазону значений r_s в реальных карликах, допустимому погрешностями измерений согласно [12].

Для расчета потока излучения также нужно задать расстояния до субгало. Ответ на этот вопрос дает рис. 10 из работы, [3]. Естественно, мы рассмотрели самые близкие к наблюдателю субгало – настолько близкие, что их количество на всем небе ~ 1 в каждом интервале масс шириной в один порядок. Мы вывели следующую аппроксимацию расстояния в зависимости от массы для таких субгало:

$$\lg(d_{\min}/\text{кпк}) = 0.0505 \lg^2(M_{200}/M_\odot) - 0.556 \lg(M_{200}/M_\odot) + 2.76. \quad (4)$$

Данная монотонная зависимость дает $d_{\min}(10^6 M_\odot) = 17$ кпк и $d_{\min}(10^9 M_\odot) = 70$ кпк.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ – ПОТОКИ И УГЛОВЫЕ РАЗМЕРЫ СУБГАЛО

Поток гамма-квантов в диапазоне энергий $[E_{\min} \dots E_{\max}]$ в телесном угле $\Delta\Omega$ рассчитывается по следующей известной формуле:

$$F_\gamma(\Delta\Omega) = \frac{1}{4\pi} \frac{\langle\sigma v\rangle}{2m_\chi^2} \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \frac{dN_\gamma}{dE_\gamma} dE_\gamma \times \iint_{\Delta\Omega \text{ l.o.s.}} \rho^2(\mathbf{r}) dl d\Omega', \quad (5)$$

где m_χ – масса нейтрино, $\langle\sigma v\rangle$ – сечение аннигиляции, dN_γ/dE_γ – спектр гамма-квантов, рождающихся в одном акте аннигиляции (рассчитан с помощью [14–16]). Двойной интеграл справа от знака умножения в (5) представляет собой так называемый J -фактор. Спектр рассматриваемого гамма-излучения существенно зависит от канала

Значения сечения аннигиляции, выбранные для расчета потоков от субгало, в соответствии с [18]

m_χ , ГэВ	$\langle\sigma v\rangle(b\bar{b})$, см ³ /с	$\langle\sigma v\rangle(\tau^+\tau^-)$, см ³ /с
10	5×10^{-27}	4×10^{-27}
100	3×10^{-26}	3×10^{-26}
1000	2×10^{-25}	8×10^{-25}

(т.е. первичных продуктов) аннигиляции, который априори неизвестен. В этом аспекте мы следуем стандартной практике и рассматриваем два репрезентативных канала: $\chi\chi \rightarrow b\bar{b}$, $\chi\chi \rightarrow \tau^+\tau^-$. Стоит отметить, что в самом общем случае $\rho(r)$ в (5) должна включать в себя не только “гладкий” компонент (1), но и вклад от субструктуры внутри субгало, т.е. от суб-субструктуры. Однако данный эффект способен увеличить сигнал от субгало не более чем на 10% (см. рис. 7 в [17]), что лежит за пределами точности наших оценок. Поэтому данным эффектом мы пренебрегаем.

Подставив зависимости (1)–(4) в (5), мы вычислили ожидаемые потоки гамма-излучения для репрезентативных масс и каналов аннигиляции нейтрино – рис. 1 ($E_\gamma > 100$ МэВ). Сечение аннигиляции для каждой массы выбрано максимально возможным в соответствии с актуальными ограничениями, полученными коллаборацией Fermi-LAT по наблюдениям 15 карликовых спутников МП [18], см. таблицу. Также мы рассчитали потоки для различных моделей концентрации субгало, описанных в разд. 2. Из рис. 1 видно, что поток достаточно слабо зависит от массы субгало, убывая с уменьшением массы. Таким образом, наиболее яркими являются самые массивные субгало, несмотря на их наибольшую удаленность. Субгало с массами $<10^6 M_\odot$ (которые невозможно выделить индивидуально в модели [3]) имеют низкую вероятность быть зарегистрированными. Зависимость от концентрации гораздо сильнее, как и ожидалось, – для разных моделей концентрации потоки варьируются примерно на порядок. Масса частицы ТМ также играет большую роль: с ростом массы потоки стремительно падают несмотря на растущее сечение аннигиляции (см. таблицу). Также можно отметить, что тауонный канал обеспечивает существенно меньшие интегральные потоки по сравнению с адронным. В целом, для определенных комбинаций параметров модели поток может достигать 10–100 фот./год (рассматривается нормальное падение фотонов на инструмент), что делает данный класс объектов потенциально детектируемым телескопом ГАММА-400. Ожидаемая эффективная площадь детектора принята равной $A = 4000$ см².

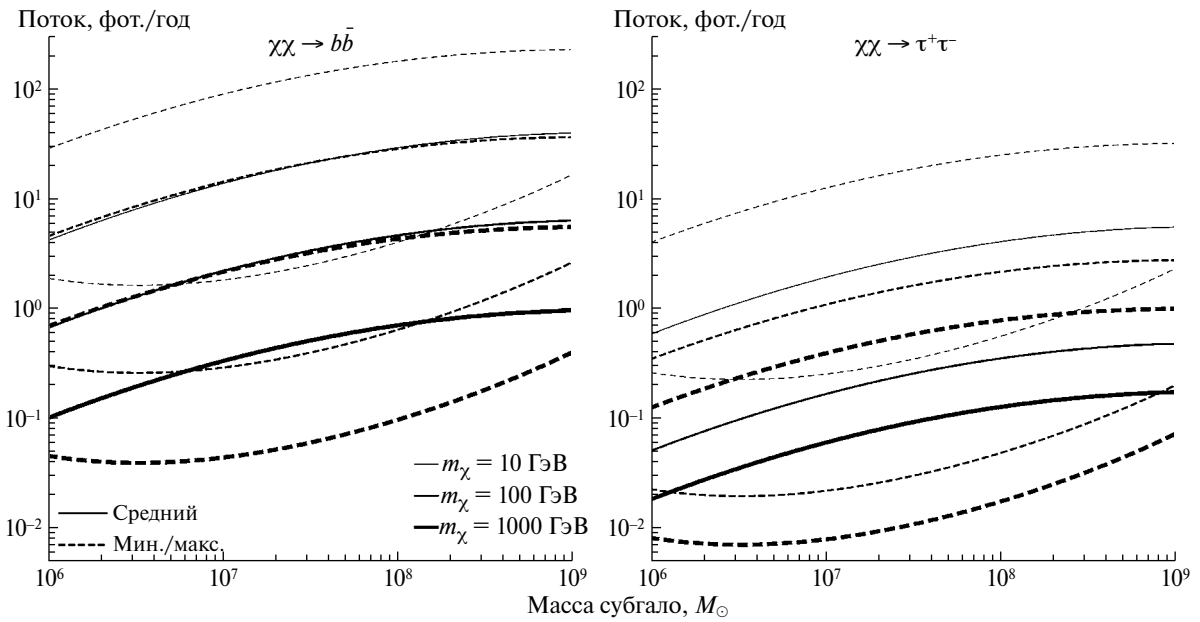


Рис. 1. Зависимость потока гамма-квантов с энергией выше 100 МэВ от ближайших субгало от их массы для двух репрезентативных каналов аннигиляции. Кривые разной толщины отображают различные массы нейтрино: 10, 100 и 1000 ГэВ. Сплошные кривые – средняя реалистичная модель концентрации субгало, штриховые – крайние случаи минимально и максимально возможной концентрации. Сечение аннигиляции для каждой массы взято с максимально допустимыми ограничениями Fermi-LAT по наблюдениям карликов [18] (см. таблицу). Эффективная площадь приемника – 4000 см². Более детально см. в разд. 2, 3.

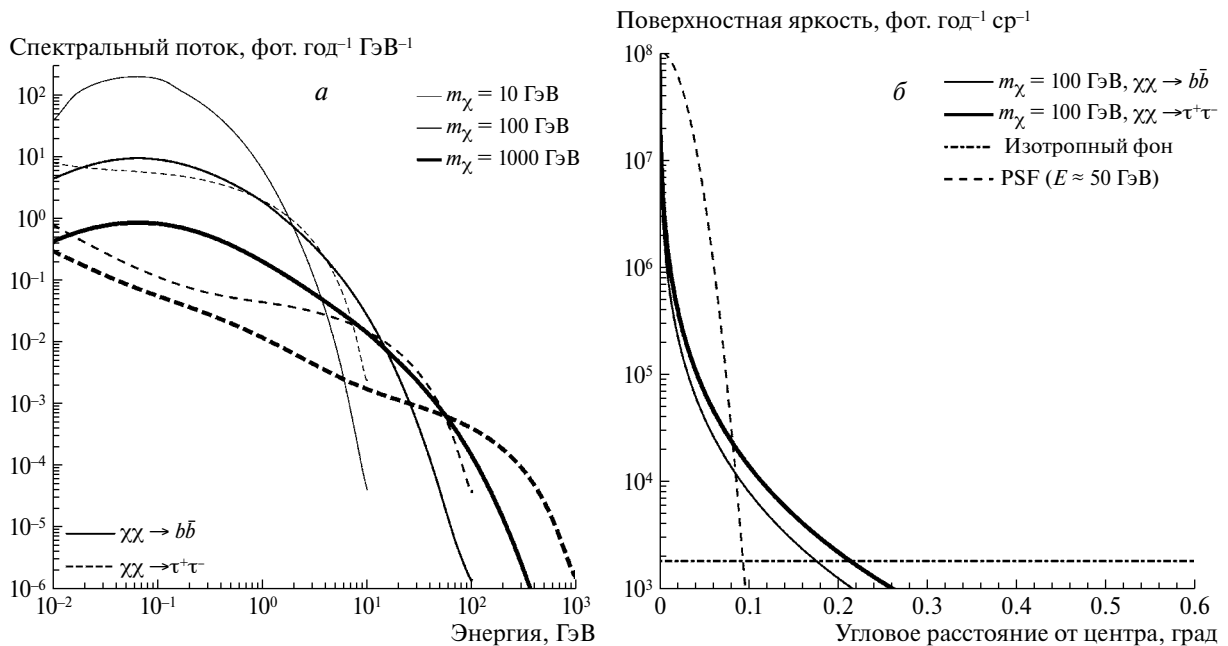


Рис. 2. *a* – Спектры близкого субгало с массой $10^9 M_{\odot}$ для различных масс нейтрино и каналов аннигиляции. Сечение аннигиляции выбрано аналогично рис. 1, модель концентрации темного субгало – средняя (реалистичная); *b* – Пример распределения поверхностной яркости для случая близкого субгало с массой $10^9 M_{\odot}$ в диапазоне энергий 10–100 ГэВ. Выбрана модель с высокой концентрацией субгало. Такая модель обеспечивает поток ~ 1 фот./год в указанном диапазоне энергий. Штриховая кривая – примерная функция рассеяния точки телескопа, горизонтальная линия – яркость изотропного фона неба по данным Fermi-LAT [19]. Правая граница графика ($\approx 0.6^\circ$) соответствует расстоянию $r = r_s$ для данного субгало.

Рисунок 2а показывает спектр гамма-излучения массивного субгало для разных масс частиц ТМ и каналов аннигиляции. Можно отметить, что при низких энергиях $b\bar{b}$ -канал доминирует над $\tau^+\tau^-$, а при высоких ($E_\gamma \gtrsim 0.1m_\chi$) — наоборот. Рисунок 2б показывает оптимальный для детектирования пример распределения поверхностной яркости субгало в диапазоне 10–100 ГэВ вместе с соответствующей функцией рассеяния точки (PSF) телескопа. Видно, что кривая яркости уверенно успева­ет “вынырнуть” из-под PSF до слияния с изотропным фоном неба (допустим здесь удобный случай субгало на высоких галактических широтах). Таким образом, свертка распределения яркости с PSF будет существенно отличаться от таковой для точечного источника, позволяя, в принципе, разрешить внутреннюю структуру субгало, тем самым надежно дифференцировав его от объекта другого класса. Однако поток фотонов от всего субгало в указанном диапазоне энергий составляет всего лишь ~ 1 фот./год, что не позволит накопить достаточную статистику фотонов. Изменение энергетического диапазона также непродуктивно вследствие резкого падения углового разрешения ГАММА-400 с уменьшением энергии [10]. Возможным решением тут может быть объединение будущих данных ГАММА-400 с данными других телескопов — Fermi-LAT, e-ASTROGAM и др. — и осуществление совместного анализа. Это может позволить синтезировать изображение субгало.

4. КАНДИДАТЫ В ТЕМНЫЕ СУБГАЛО 3FGL J2212.5+0703 И J1924.8–1034

Как уже упоминалось в разд. 1, работы [5–7] уверенно заявили о двух кандидатах в субгало в каталоге источников 3FGL — J2212.5+0703 и J1924.8–1034. Утверждается, что данные объекты с высокой вероятностью являются протяженными с характерным угловым радиусом $\sim 0.1^\circ$. Их спектр хорошо описывается аннигиляцией ТМ по каналу $\chi\chi \rightarrow b\bar{b}$ с массой нейтралино $m_\chi \approx 20\text{--}40$ ГэВ. Авторы [6, 7] предположили тепловое сечение аннигиляции $\langle\sigma v\rangle \approx 3 \times 10^{-26}$ см³/с при фитировании спектра кандидатов. Мы хотели бы отметить, что такое значение сечения слишком велико для указанных масс частицы ТМ — ограничения Fermi-LAT [18] допускают сечения в несколько раз меньше. Мы пересчитали требуемые значения J -факторов, которые воспроизводят измеренные потоки от этих объектов, используя реалистичные значения сечения аннигиляции, и получили $J \geq 5 \times 10^{20}$ ГэВ² см⁻⁵. Все известные карликовые спутники имеют $J \lesssim 10^{20}$ ГэВ² см⁻⁵ [20]. Таким образом, мы видим, что кандидаты

в субгало требуют аномально больших значений J . Кажется очень маловероятным, что такие объекты не содержали бы существенного звездного населения. Единственная возможность для этого — это легкие субгало, расположенные очень близко к наблюдателю. Мы оценили расстояния до таких субгало, требуемые для обеспечения измеренного потока гамма-излучения. При этом мы взяли два репрезентативных значения массы субгало — $10^6 M_\odot$ и $10^9 M_\odot$. Для этих значений мы получили расстояния ~ 1 кпк и ~ 10 кпк соответственно (примерно одинаковые для обоих объектов). Эти значения сильно противоречат зависимости (4). Также более наглядно это противоречие видно из рис. 10 в [3]: ни одно субгало из 100 модельных ре­ализаций МП не было обнаружено на расстояниях менее ≈ 12 кпк. Таким образом, обсуждаемые кандидаты не проходят обе простые проверки — по J -фактору и расстоянию до них. На основе этого мы склонны считать, что данные кандидаты представляют собой типичные астрофизические источники, каждый из которых состоит из двух источников на очень близких лучах зрения. Эта возможность также вполне допускается в [5–7]. Одним из косвенных ее подтверждений является небольшая эллиптичность изображений объектов, выявленная при анализе наблюдательных данных.

5. ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе мы оценили детектируемость галактических субгало из ТМ проектируемым телескопом ГАММА-400. С этой целью сначала мы построили модель распределений ТМ внутри субгало и субгало в Галактике на базе результатов работы [3] в диапазоне масс субгало $10^6\text{--}10^9 M_\odot$. Это позволило рассчитать потоки и морфологию субгало в зависимости от различных параметров ТМ и субгало (рис. 1, 2). Можно сформулировать следующие краткие выводы. 1) Интегральный поток гамма-излучения от субгало достаточно слабо зависит от их массы, но существенно зависит от концентрации и массы частицы ТМ. Самыми яркими являются самые массивные субгало. 2) Для случая наиболее актуальной на сегодняшний день массы нейтралино ~ 100 ГэВ (и теплового сечения аннигиляции) мы можем ожидать несколько объектов на всем небе с потоком ~ 10 фот./год, что делает субгало принципиально детектируемыми для ГАММА-400 даже в случае достаточно тяжелых частиц ТМ. 3) Разрешить внутреннюю структуру субгало достаточно проблематично вследствие малости потоков, но это может быть преодолено путем объединения и совместной обработки будущих данных ГАММА-400 и данных других телескопов.

4) Кандидаты в темные субгало 3FGL J2212.5+0703 и J1924.8–1034, на наш взгляд, являются, скорее всего, двойными классическими астрофизическими источниками.

Таким образом, темные субгало являются интересным объектом для поиска ТМ с помощью телескопа ГАММА-400. Предполагается дальнейшее рассмотрение данного класса объектов, а также изучение возможностей детектирования и ограничения свойств ТМ в карликовых спутниках Млечного пути. Работа выполняется при поддержке Совета РАН по космосу и Роскосмоса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Particle Dark Matter: Observations, Models and Searches*, Ed. by G. Bertone (Cambridge University Press, 2010).
2. E. Charles, M. Sánchez-Conde, B. Anderson, R. Caputo, A. Cuoco, M. Di Mauro, A. Drlica-Wagner, G. A. Gomez-Vargas, M. Meyer, L. Tibaldo, M. Wood, G. Zaharijas, S. Zimmer, M. Ajello, A. Albert, L. Baldini, *et al.*, *Phys. Rept.* **636**, 1 (2016), 1605.02016.
3. F. Calore, V. De Romeri, M. Di Mauro, F. Donato, and F. Marinacci, *Phys. Rev. D* **96**, 063009 (2017), 1611.03503.
4. F. Acero, M. Ackermann, M. Ajello, A. Albert, W. B. Atwood, M. Axelsson, L. Baldini, J. Ballet, G. Barbiellini, D. Bastieri, A. Belfiore, R. Bellazzini, E. Bissaldi, R. D. Blandford, E. D. Bloom, J. R. Bogart, *et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **218**, 23 (2015), 1501.02003.
5. B. Bertoni, D. Hooper, and T. Linden, *J. Cosmology Astropart. Phys.* **5**, 049 (2016), 1602.07303.
6. Y.-P. Wang, K.-K. Duan, P.-X. Ma, Y.-F. Liang, Z.-Q. Shen, S. Li, C. Yue, Q. Yuan, J.-J. Zang, Y.-Z. Fan, and J. Chang, *Phys. Rev. D* **94**, 123002 (2016), 1611.05135.
7. Z.-Q. Xia, K.-K. Duan, S. Li, Y.-F. Liang, Z.-Q. Shen, C. Yue, Y.-P. Wang, Q. Yuan, Y.-Z. Fan, J. Wu, and J. Chang, *Phys. Rev. D* **95**, 102001 (2017), 1611.05565.
8. T.-L. Chou, D. Tanoglidis, and D. Hooper, 1709.08562.
9. A. M. Galper, O. Adriani, R. L. Aptekar, I. V. Arkhangel'skaja, A. I. Arkhangel'skiy, M. Boezio, V. Bonvicini, K. A. Boyarchuk, Yu. V. Gusakov, M. O. Farber, M. I. Fradkin, V. A. Kachanov, V. A. Kaplin, M. D. Kheymits, A. A. Leonov, F. Longo, *et al.*, *Adv. Space Res.* **51**, 297 (2013), 1201.2490.
10. N. P. Topchiev, A. M. Galper, V. Bonvicini, O. Adriani, I. V. Arkhangel'skaja, A. I. Arkhangel'skiy, A. V. Bakaldin, S. G. Bobkov, M. Boezio, O. D. Dalkarov, A. E. Egorov, M. S. Gorbunov, Y. V. Gusakov, B. I. Hnatyk, V. V. Kadil'in, V. A. Kaplin, *et al.*, *EPJ Web. Conf.* **145**, 06001 (2017).
11. A. De Angelis, V. Tatischeff, M. Tavani, U. Oberlack, I. Grenier, L. Hanlon, R. Walter, A. Argan, P. von Ballmoos, A. Bulgarelli, I. Donnarumma, M. Hernanz, I. Kuvvetli, M. Pearce, A. Zdziarski, A. Aboudan, *et al.*, *Exp. Astron.* **44**, 25 (2017), 1611.02232.
12. G. D. Martinez, *MNRAS* **451**, 2524 (2015), 1309.2641.
13. A. Geringer-Sameth, S. M. Koushiappas, and M. Walker, *Astrophys. J.* **801**, 74 (2015), 1408.0002.
14. <http://www.marcocirelli.net/PPPC4DMID.html>
15. M. Cirelli, G. Corcella, A. Hektor, G. Hütsi, M. Kadastik, P. Panci, M. Raidal, F. Sala, and A. Strumia, *J. Cosmology Astropart. Phys.* **3**, 051 (2011), 1012.4515.
16. P. Ciafaloni, D. Comelli, A. Riotto, F. Sala, A. Strumia, and A. Urbano, *J. Cosmology Astropart. Phys.* **3**, 019 (2011), 1009.0224.
17. A. Moliné, M. A. Sánchez-Conde, S. Palomares-Ruiz, and F. Prada, *MNRAS* **466**, 4974 (2017), 1603.04057.
18. M. Ackermann, A. Albert, B. Anderson, W. B. Atwood, L. Baldini, G. Barbiellini, D. Bastieri, K. Bechtol, R. Bellazzini, E. Bissaldi, R. D. Blandford, E. D. Bloom, R. Bonino, E. Bottacini, T. J. Brandt, J. Bregeon, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 231301 (2015), 1503.02641.
19. <https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/>
20. A. Albert, B. Anderson, K. Bechtol, A. Drlica-Wagner, M. Meyer, M. Sánchez-Conde, L. Strigari, M. Wood, T. M. C. Abbott, F. B. Abdalla, A. Benoit-Lévy, G. M. Bernstein, R. A. Bernstein, E. Bertin, D. Brooks, D. L. Burke, *et al.*, *Astrophys. J.* **834**, 110 (2017), 1611.03184.

DETECTION OF DARK MATTER SUBHALOS BY THE GAMMA-400 TELESCOPE

A. E. Egorov, A. M. Galper, N. P. Topchiev, A. A. Leonov,
S. I. Suchkov, M. D. Kheymits, Yu. T. Yurkin

We investigated the detectability of Galactic subhalos with masses 10^6 – $10^9 M_\odot$ formed by annihilating WIMP dark matter by the planned GAMMA-400 gamma-ray telescope. The inner structure of dark matter subhalos and their distribution in the Galaxy were taken from corresponding simulations. We showed that the expected gamma-ray flux from subhalos strongly depends on WIMP mass and subhalo concentration, but less strongly depends on the subhalo mass. In an optimistic case we may expect the flux of 10–100 ph/year above 100 MeV from the closest and most massive subhalos, which would be detectable sources for GAMMA-400. However, resolving the inner structure of subhalos might be possible only by the joint analysis of the future GAMMA-400 data and data from other telescopes due to smallness of fluxes. Also we considered the recent subhalo candidates 3FGL J2212.5+0703 and J1924.8–1034 within the framework of our model. We concluded that it is very unlikely that these sources belong to the subhalo population.