

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

УДК 539.12

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
СМЕЩЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ НЕИДЕНТИФИЦИРОВАННЫХ
ГАММА-ИСТОЧНИКОВ КАК НАБЛЮДАТЕЛЬНОЕ
ПРОЯВЛЕНИЕ СГУСТКОВ СКРЫТОЙ МАССЫ

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доц.

_____ А. А. Кириллов

Выполнила

_____ В. В. Верзакова

Москва 2023

Содержание	1
1 Введение	2
1.1 Эксперимент EGRET	4
1.2 Fermi-LAT	5
1.3 Смещенные источники	6
2 Функция распределения смещенных источников	7
3 Отбор кандидатов	10
4 Анализ распределения	12
5 Заключение	13
	15

: Оценка эффекта смещения мелкомасштабных астрофизических объектов новой физики, например, сгустков скрытой массы, и анализ возможности выведения кандидатов в сгустки среди наблюдательных данных по неидентифицированным гамма-источникам.

1

Присутствие темной материи (ТМ) предполагается множеством астрофизических и космологических измерений, однако ее глубинная природа пока неизвестна. Среди наиболее перспективных кандидатов — слабо взаимодействующие массивные частицы (WIMPs¹): частицы, рожденные в ранней Вселенной, как правило, с массами, превышающими 100 ГэВ и на уровне ниже электрослабого. [1].

В рамках парадигмы Λ CDM, в нашей Вселенной существует по меньшей мере в шесть раз больше темной материи, чем барионной: $\Omega_c = 0.265$, $\Omega_b = 0.0493$ [2]. Понимание природы темной материи является одной из самых важных задач современной фундаментальной физики. В поисках темной материи существуют три различных подхода: прямое рождение в коллайдерных экспериментах, прямое обнаружение через рассеяние на обычной материи и косвенное обнаружение, основанное на поиске вторичных частиц, образующихся в результате аннигиляции или распада частиц темной материи. Существует множество теорий, предлагающих кандидатуры частиц темной материи, которые могут аннигилировать в фотоны γ -излучения [3].

Субгало ТМ являются перспективными объектами для косвенного обнаружения ТМ. Согласно стандартной теории формирования иерархической структуры, частицы темной материи накапливаются, превращаясь в небольшие гало, а затем многократно сливаются, образуя более крупные гало. Некоторые из гало, если они выживают после приливного разрушения и вириализации, становятся субгало главного гало. Моделирование N -тел в масштабе гало Млечного Пути показывает, что субгало гораздо больше, чем спутников, наблюдаемых на оптической длине волны, что указывает на то, что большинство из них содержат мало звезд или газа [4]. Субгало ТМ, либо достаточно массивные, либо достаточно близкие к Земле, могут быть видны в гамма-диапазоне. Из-за отсутствия звезд и газа субгало ТМ могут быть обнаружены посредством регистрации гамма-излучения или же превышения доли античастиц в космических лучах, а также за счет гравитационных эффектов. В данной работе рассматривается эффект, основанный за

¹WIMP Weakly Interactive Massive Particle

счет сигналов γ -излучения. Ожидается, что субгало ТМ являются источниками гамма-излучения, которые не связаны с источниками, обнаруженными в других диапазонах длин волн при более низких энергиях [5].

В данной работе рассматривается непосредственно метод косвенного обнаружения. Он заключается в регистрации не самих частиц ТМ а продуктов их потенциальной аннигиляции или распада: заряженных частиц и античастицы космических лучей (эксперименты PAMELA, AMS-2, ATIC, IACTs, Fermi-LAT, Auger), гамма-излучения (эксперименты Fermi-LAT, HESS-II, MAGIC, VERITAS, HAWC), нейтрино (эксперименты IceCube/DeepCore/PINGU, ANTARES/KM3NET, BAIKAL-GVD, SuperKamiokande/HyperKamiokande).

EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope) был высокоэнергетическим гамма-телескопом на Комптоновской обсерватории гамма-лучей (CGRO), функционировавшим с 1991 по 1999 гг. Телескоп работал в диапазоне энергий от 30 МэВ до более 20 ГэВ. Он имел большое поле зрения, около 80° в диаметре, хотя эффективная площадь значительно ухудшается за пределами 30° вне оси. Эффективная площадь по оси составляла более 1000 см^2 в диапазоне от 100 МэВ до 3 ГэВ [6]. Угловое разрешение сильно зависит от энергии, при 67%-м угле конфайнмента 5.5° при энергии 100 МэВ уменьшается до 0.5° при энергии 5 ГэВ по оси. Яркие источники гамма-излучения могут быть локализованы с точностью почти $10'$. Энергетическое разрешение EGRET составляет 20–25% в большей части диапазона чувствительности. Время прихода фотонов регистрировалось с точностью 50 мкс.

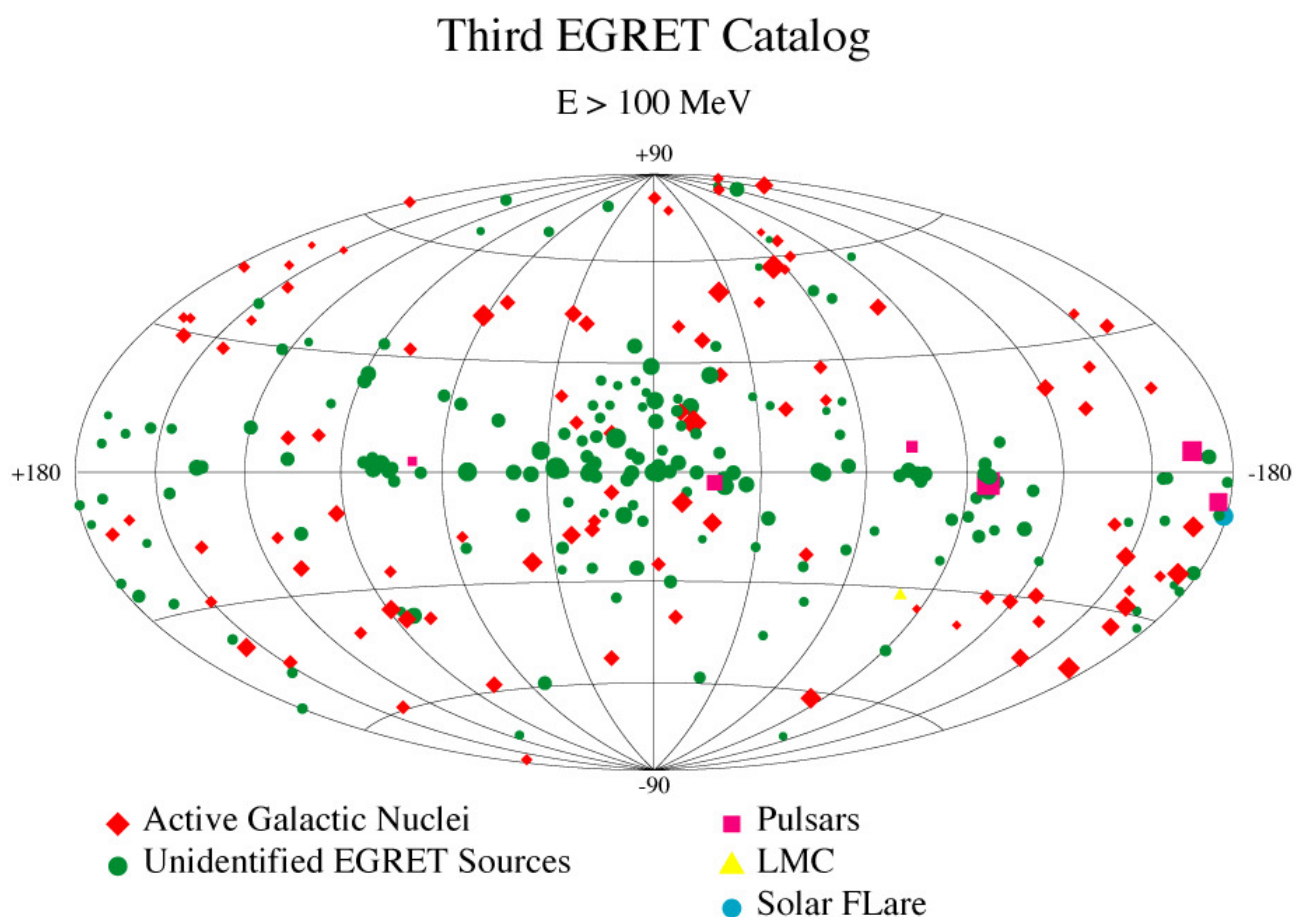


Рисунок 1 — Распределение источников в каталоге 3EG

Каталоги 1EG и 2EG содержат 31 и 129 событий, соответственно. События в 3EG основаны на данных, полученных телескопом EGRET на борту в период с 22 апреля 1991 по 3 октября 1995 [7]. В каталоге собран 271 источник гамма-излучения, 170 из них неидентифицированы (рис. 1).

1.2 Fermi-LAT

Fermi-LAT — эксперимент, пришедший на смену EGRET. Начал свою работу в 2008 году, действующий по настоящее время. Large Area Telescope (LAT) обнаруживает γ -лучи в диапазоне энергий от 20 МэВ до более чем 1 ТэВ, измеряя время их прихода, энергию и направление. Поле зрения LAT составляет $\sim 2.7^\circ$ при энергии 1 ГэВ и выше. Угловое разрешение на один фотон составляет $\sim 5^\circ$ при энергии 100 МэВ, улучшается до 0.8° при энергии 1 ГэВ, меняется с энергией приблизительно как $E^{-0.8}$ и асимптотически увеличивается до $\sim 0,1^\circ$ выше 20 ГэВ. Секция слежения LAT имеет 36 слоев кремниевых полосковых детекторов,

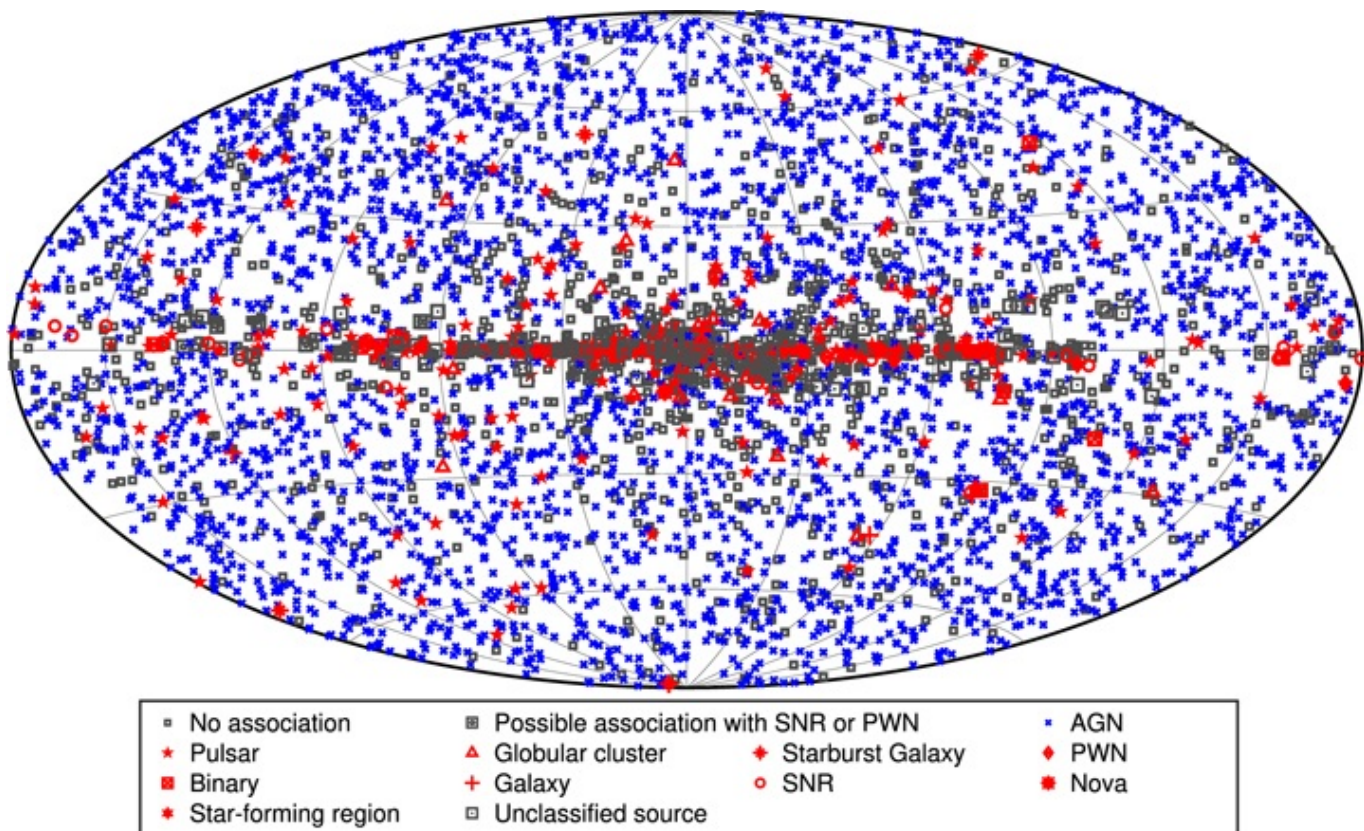


Рисунок 2 — Распределение источников в каталоге 4FGL Fermi-LAT

чередующихся с 16 слоями вольфрамовой фольги (12 тонких слоев, 0.03 радиационной длины, в верхней или передней части прибора, затем 4 толстых слоя, 0.18 радиационной длины, в задней части). Кремниевые полоски отслеживают заряженные частицы, а вольфрамовая фольга способствует преобразованию γ -лучей

в пары позитрон-электрон. Под трекером находится калориметр, состоящий из 8-слойного массива кристаллов CsI для определения энергии γ -лучей [8].

Каталог 4FGL собран за первые восемь лет работы миссии и включает 5064 источников, для 1336 источников не имеется правдоподобных аналогов на других длинах волн (рис. 2).

1.3

В свою очередь наблюдательные данные космических лучей и гамма-излучения имеют целый ряд необъясненных явлений, в частности в экспериментах Fermi-LAT и EGRET было зарегистрировано большое количество неидентифицированных гамма-источников (ГИ). При том за время работы Fermi не был обнаружен ряд ГИ, находящихся в каталоге EGRET.

В данной работе оценивается возможность смещения таковых ГИ по небесной сфере за время работы данных коллабораций. Природа таких ГИ может быть связана с компактными объектами новой физики, к которым относятся сгустки скрытой массы или кластеры первичных черных дыр [9].

Данная работа также актуальна для последующих экспериментов, регистрирующих гамма-сигналы, таких как GAMMA-400.

Будущий космический гамма-телескоп GAMMA-400 будет работать на борту российской астрофизической обсерватории на высокоэллиптической орбите в течение 7 лет для наблюдения галактической плоскости, центра Галактики, пузырей Ферми, Краба, Велы, Сигнуса X, Геминги, Солнца и других регионов и измерения потоков гамма- и космического излучения [10].

GAMMA-400 обещает лучшие характеристики, чем у Fermi, а значит данные по гамма от будущего эксперимента смогут пролить свет на природу кандидатов в смещенные источники.

Построим функцию распределения относительного числа источников в системе, связанной с центром Галактики, считая распределение скоростей максвелловским. Тогда доля источников $\frac{dN}{N}$, имеющих скорости в диапазоне $(\vec{v}; \vec{v} + d\vec{v})$ будет задаваться следующим образом:

$$\frac{dN}{N} = \frac{1}{(v_0\sqrt{\pi})^3} \exp\left(-\frac{\vec{v}^2}{v_0^2}\right) d^3v, \quad (1)$$

где N — число источников. Переходя в систему, связанную с Солнцем, получим:

$$\frac{dN}{N} = \frac{1}{(v_0\sqrt{\pi})^3} \exp\left(-\frac{(\vec{v} - \vec{v}_\odot)^2}{v_0^2}\right) d^3v,$$

где v_\odot — скорость Солнца. Выберем ось x сонаправленной скорости Солнца, тогда:

$$\frac{dN}{N} = \frac{1}{(v_0\sqrt{\pi})^3} \exp\left(-\frac{(v_x - v_\odot)^2 + v_y^2 + v_z^2}{v_0^2}\right) dv_x dv_y dv_z \quad (2)$$

Будем считать, что в окрестности Солнца скорость источника остается приблизительно постоянной и задается следующим соотношением:

$$\vec{v} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{t}, \quad (3)$$

где \vec{r}_1, \vec{r}_2 — начальное и конечное положения источника. Тогда выражение 2 преобразуется следующим образом:

$$\frac{dN}{N} = \frac{1}{(v_0 t \sqrt{\pi})^3} \exp\left(-\frac{(x_2 - x_1 - v_\odot t)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}{(v_0 t)^2}\right) dx dy dz$$

Требуется получить распределение в галактических координатах, для чего удобно предварительно перейти к сферическим, а затем от них, путем простого преобразования, перейти к галактическим.

Переход к сферическим координатам будет осуществляться следующим об-

разом:

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \cos \varphi \\ y = r \sin \theta \sin \varphi \\ z = r \cos \theta \end{cases}$$

Якобиан преобразования:

$$J = r^2 \sin \theta \quad (4)$$

Имеем:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{N} = \frac{r_2^2 \sin \theta_2}{(v_0 t \sqrt{\pi})^3} \exp \left[-\frac{1}{(v_0 t)^2} \left((r_2 \sin \theta_2 \cos \varphi_2 - r_1 \sin \theta_1 \cos \varphi_1 - v_{\odot} t)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + (r_2 \sin \theta_2 \sin \varphi_2 - r_1 \sin \theta_1 \sin \varphi_1)^2 + (r_2 \cos \theta_2 - r_1 \cos \theta_1)^2 \right) \right] dr_2 d\theta_2 d\varphi_2 \end{aligned} \quad (5)$$

Перейдем теперь в галактические координаты $b = 90^\circ - \theta$, $l = 90^\circ - \varphi$:

$$\begin{cases} x = -r \cos b \sin l \\ y = r \cos b \cos l \\ z = r \sin b \end{cases}$$

Получим:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{N} = \frac{r_2^2 \cos b_2}{(v_0 t \sqrt{\pi})^3} dr_2 db_2 dl_2 \times \\ \times \exp \left[-\frac{1}{(v_0 t)^2} \left((-r_2 \cos b_2 \sin l_2 + r_1 \cos b_1 \sin l_1 - v_{\odot} t)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + (r_2 \cos b_2 \cos l_2 - r_1 \cos b_1 \cos l_1)^2 + (r_2 \sin b_2 - r_1 \sin b_1)^2 \right) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Так как мы рассматриваем источники вблизи Солнечной системы, будем считать $v_0 = v_{\odot}$. Проинтегрируем выражение 6 по всем возможным расстояниям r_2 . В результате остается один неопределенный параметр r_1 , поэтому проведем усреднение интеграла, полученного ранее, по максимальному расстоянию $r_0 = 10$ пк, при котором сгусток может быть зарегистрирован как гамма-источник

[11].

$$\begin{aligned} \frac{dN}{N} &= \frac{\cos b_2 db_2 dl_2}{r_0 (R_0 \sqrt{\pi})^3} \int_0^{r_0} dr_1 \int_0^{r_0} dr_2 \times \\ &\times r_2^2 \exp \left[- \frac{1}{R_0^2} \left((-r_2 \cos b_2 \sin l_2 + r_1 \cos b_1 \sin l_1 - R_0)^2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (r_2 \cos b_2 \cos l_2 - r_1 \cos b_1 \cos l_1)^2 + (r_2 \sin b_2 - r_1 \sin l_1)^2 \right) \right]. \end{aligned}$$

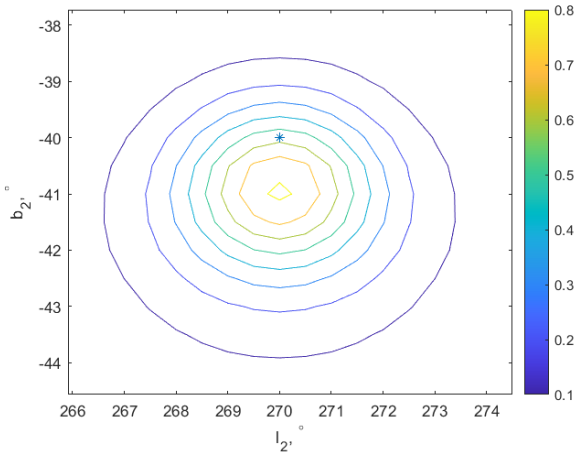
Перейдем к безразмерным координатам $\rho_i = r_i/R_0$, $i = \overline{1, 2}$. После усреднения получим дифференциальную вероятность обнаружения источника в диапазоне координат от $(b_2; l_2)$ до $(b_2 + db_2; l_2 + dl_2)$, обозначив $df(b_2, l_2) = \frac{dN}{N}$.

При этом $P = \frac{df(b_2, l_2)}{db_2 dl_2}$. Окончательно имеем:

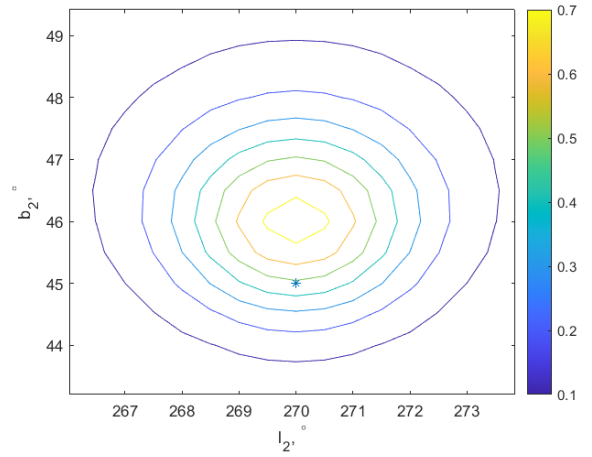
$$\begin{aligned} P &= \frac{R_0 \cos b_2}{r_0 (\sqrt{\pi})^3} \int_0^{r_0/R_0} d\rho_1 \int_0^{r_0/R_0} d\rho_2 \times \\ &\times \rho_2^2 \exp \left[- \left((-\rho_2 \cos b_2 \sin l_2 + \rho_1 \cos b_1 \sin b_1 - 1)^2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (\rho_2 \cos b_2 \cos l_2 - \rho_1 \cos b_1 \cos l_1)^2 + (\rho_2 \sin b_2 - \rho_1 \sin b_1)^2 \right) \right]. \end{aligned} \tag{7}$$

Возьмем численно полученный интеграл и построим графики полученной функции распределения. Распределения для пробных координат представлены на рисунках 3 и 4.

В качестве простой проверки полученного распределения проводилась оценка смещения плотности в зависимости от движения Солнца.

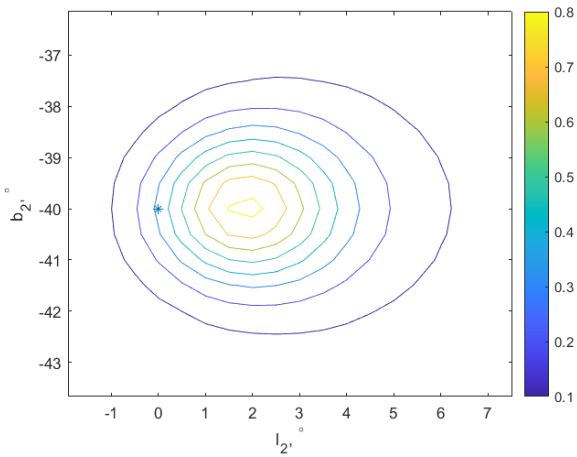


(a)

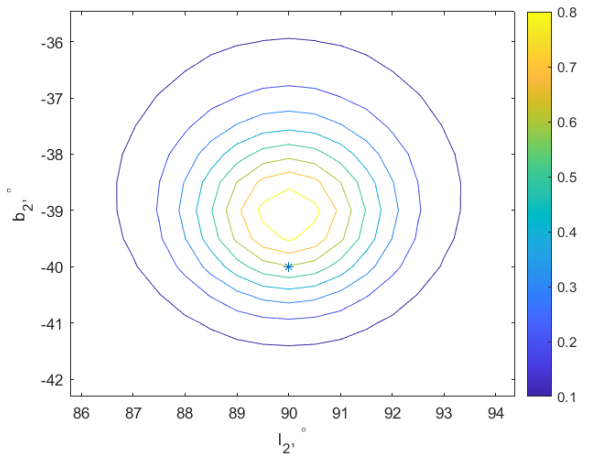


(b)

Рисунок 3 — Распределение вероятности сместившегося источника, вероятность между соседними линиями уровней 0.05: (a) соответствует начальному положению ГИ ($l_1 = 270^\circ, b_1 = -40^\circ$), (b) соответствует ($l_1 = 270^\circ, b_1 = 40^\circ$). (*) обозначено начальное положение источника.



(a)



(b)

Рисунок 4 — Распределение вероятности сместившегося источника, вероятность между соседними линиями уровней 0.05: (a) соответствует начальному положению ГИ ($l_1 = 0^\circ, b_1 = -40^\circ$), (b) соответствует ($l_1 = 90^\circ, b_1 = -40^\circ$). (*) обозначено начальное положение источника.

3

В качестве данных были использованы точечные ГИ из каталогов 4FGL (LAT) [12] и 3EG (EGRET) [13]. Отбор пар смещенных источников (источник LAT - источник EGRET) производился по совпадению спектральных индексов в

соответствии с формулой 8,

$$|I_{LAT} - I_{EGRET}| \leq \sqrt{(\Delta I_{LAT})^2 + (\Delta I_{EGRET})^2} \quad (8)$$

и по угловому расстоянию между источниками не более 8° . Такое расстояние было выбрано в связи с невозможностью смещения источника на большие расстояния за выбранный промежуток исследования (20 лет).

Было отобрано 96 пар источников [14]. Из дальнейшего анализа были исключены источники, лежащие в плоскости Галактики ($|b| \leq 10^\circ$), в связи с тем, что они имеют, в основном, галактическое происхождение. Таким образом, остается 67 пар источников (ГИ Fermi - ГИ EGRET).

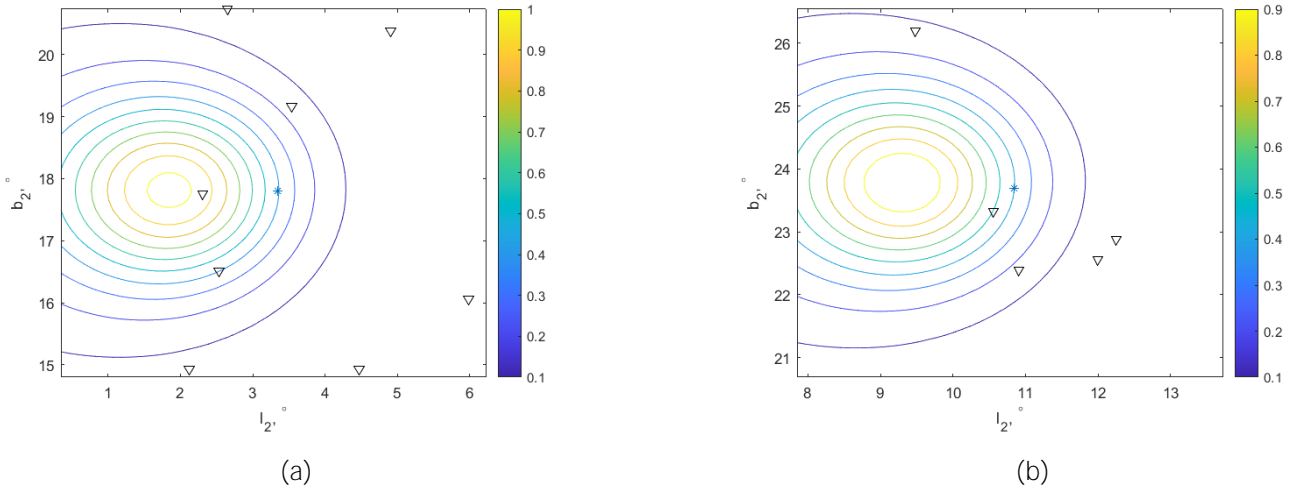


Рисунок 5 — Распределение вероятности сместившегося источника. Звездочкой обозначено начальное положение источника из ЗЕГ, треугольником - положения источников 4FGL.

На рисунке 3 представлены пробные распределения для 2 источников EGRET. Данные линии уровня плотности распределения носят случайный характер, поэтому технической задачей было определить такие линии уровня, вероятность между которыми примерно равна, что и было сделано ниже.

В таблице [14] представлены положения источников (координаты b и l), а также их спектральные индексы для распределений 6(a) - 6(d) и других источников. Левая колонка соответствует данным из ЗЕГ, правая - кандидату в его смещенный источник из LAT.

На этапе анализа возможности смещения источника и нахождения его в новых координатах, возникли сложности, связанные с тем, что несколько ГИ (LAT)

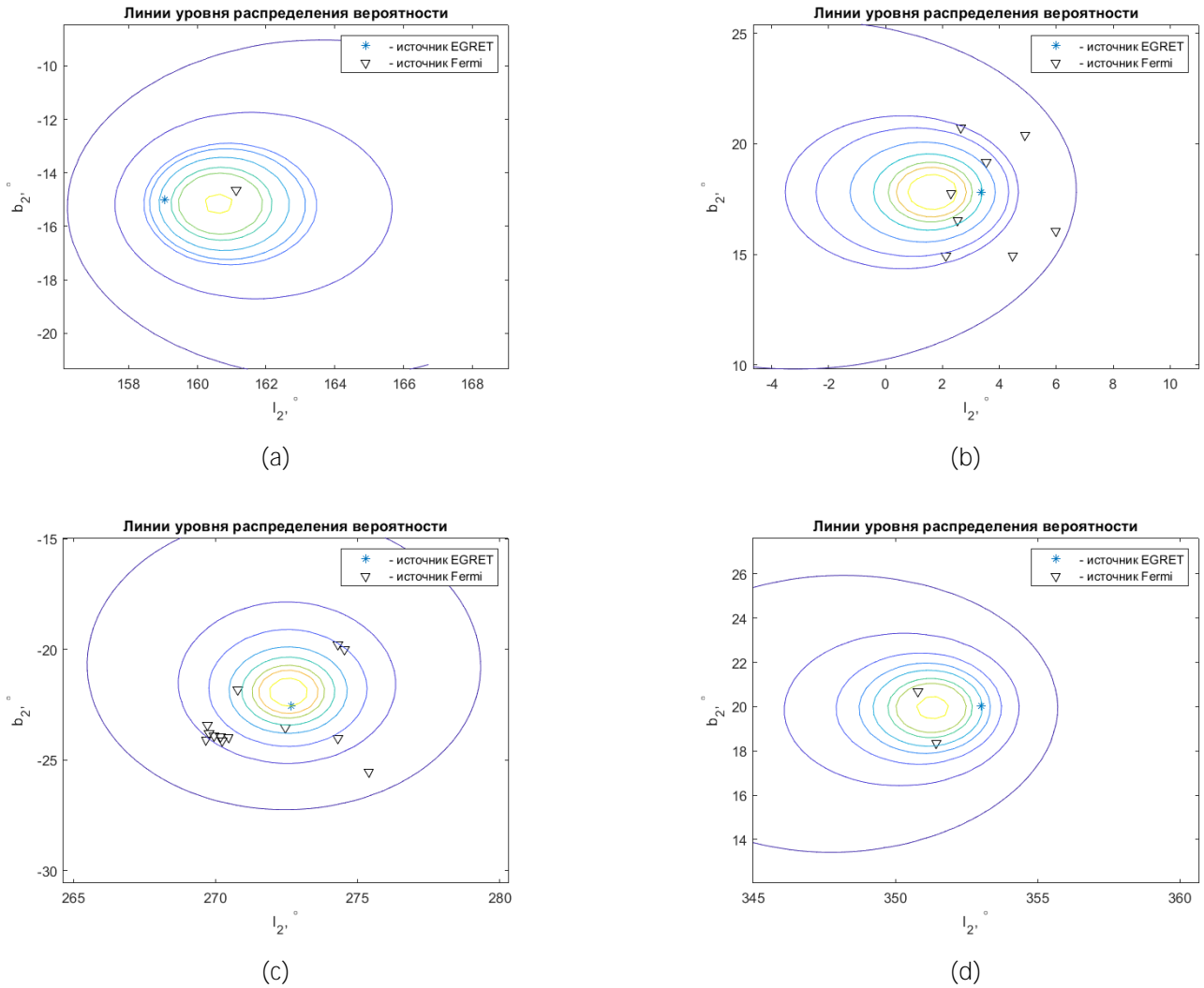


Рисунок 6 — Распределение вероятности сместившегося источника, вероятность между соседними линиями уровней 0.1. (*) обозначено положение источника EGRET, (∇) - положение источников Fermi

с одинаковым спектральным индексом оказываются вблизи одного ГИ (EGRET) (рис. 3).

4

Для анализа полученных распределений, линии уровня функции плотности были разбиты на области с заданным шагом (значение вероятности $\approx 10\%$). Это необходимо для того, чтобы проверить относятся ли распределения к фоновым событиям или же помимо фона в них содержится сигнал. Ожидается, что распределение фоновых событий будет таково, что с ростом области наблюдения, будет увеличиваться число событий. Чтобы получить данное распределение, были рассчитаны площади областей представленных на рисунке 3 и посчитано ожидаемое количество событий в каждой области.

Если же помимо фона будет ожидается и сигнальное событие, то наблюдаемое распределение источников внутри областей, полученных интегрированием функции плотности, не будет соотноситься с фоновым, в рамках статистических критериев.

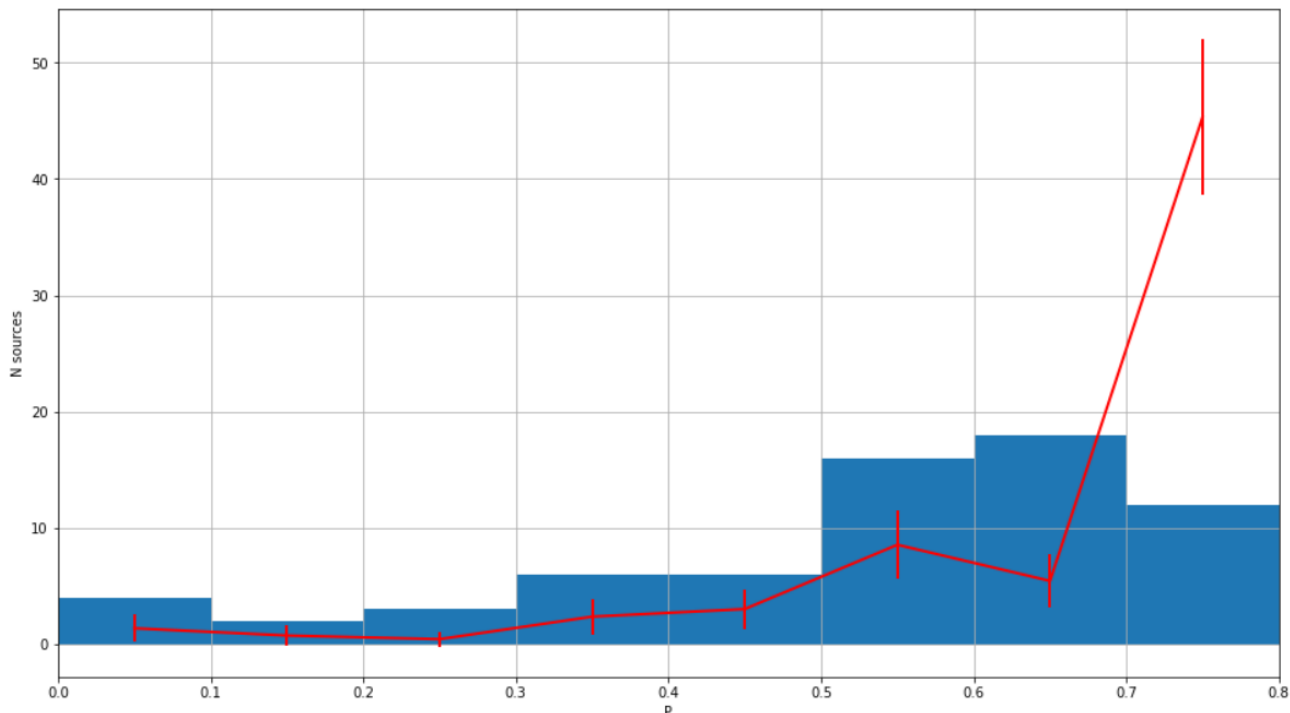


Рисунок 7 — Фоновое распределение (черная линия) и распределение фон+сигнал (гистограмма)

Ожидаемое и наблюдаемые распределения представлены на рисунке 7.

5

В данной работе рассматривалась возможность изучения эффекта смещения близких к Солнцу сгустков темной материи и их последующему проявлению, как точечных гамма-источников гамма излучения.

Для этого была получена функция распределения плотности вероятности для смещенных источников зависимости от галактических координат. И затем построены соответствующие линии уровня, вероятность между соседними линиями составляет $\sim 10\%$.

Был произведен отбор кандидатов в смещенные источники по спектральному индексу, а также по угловому расстоянию между источниками.

Проводится статистический анализ полученного распределения, где проверяется гипотеза о принадлежности данного распределения к фоновым событиям.

В качестве решения планируется использование метода максимально правдоподобия в дальнейшей работе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Collaboration H.* [et al.]. Search for dark matter annihilation signals from unidentified Fermi-LAT objects with H.E.S.S. — 2021.
2. *Zyla P.* [и др.]. Review of Particle Physics // PTEP. — 2020. — Т. 2020, № 8. — С. 083C01.
3. *Glawion D.* [et al.]. Unidentified Fermi Objects in the view of H.E.S.S. – Possible Dark Matter Clumps. — 2019. — arXiv: [1909.01072 \[astro-ph.HE\]](https://arxiv.org/abs/1909.01072).
4. *Wang Y.-P.* [et al.]. Testing the dark matter subhalo hypothesis of the gamma-ray source 3FGL J2212.5+0703 // Physical Review D. — 2016. — Vol. 94, no. 12.
5. *Zechlin H.-S., Horns D.* Unidentified sources in the Fermi-LAT second source catalog: the case for DM subhalos // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2012. — Vol. 2012, no. 11. — P. 050–050.
6. *Lyapin A. R., Arkhangel'skaja I. V., Larin D. S.* Unidentified EGRET sources and their possible Fermi counterparts // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Vol. 798. — P. 012005.
7. *Casandjian J.-M., Grenier I. A.* A revised catalogue of EGRET γ -ray sources // Astronomy & Astrophysics. — 2008. — Vol. 489, no. 2. — P. 849–883.
8. *Abdollahi S.* [et al.]. Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2020. — Vol. 247, no. 1. — P. 33.

9. *Belotsky K.* [et al.]. Clusters of Primordial Black Holes // The European Physical Journal C. — 2019. — Vol. 79.
10. *Topchiev N. P.* [et al.]. Gamma- and Cosmic-Ray Observations with the GAMMA-400 Gamma-Ray Telescope. — 2021. — arXiv: [2108.12609](https://arxiv.org/abs/2108.12609) [[astro-ph.IM](#)].
11. *Belotsky K., Kirillov A., Khlopov M.* Gamma-ray evidence for dark matter clumps // Gravitation and Cosmology. — 2012. — Vol. 20.
12. https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/12yr_catalog/.
13. https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/cossc/egret/3rd_EGRET_Cat.html.
14. <https://plotly.com/~VValery/3/import-pandas-as-pd-sources-pdreads/>.