

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 2022

# Содержание

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 Заключение . . . . .	13
<b>Список использованных источников</b>	<b>15</b>

**Цель работы:** 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 Введение

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

В рамках парадигмы  $\Lambda$ 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  $\gamma$ -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

---

<sup>1</sup>WIMP —Weakly Interactive Massive Particle

счет сигналов  $\gamma$ -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).

## 1.1 Эксперимент EGRET

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  $80^\circ$  в диаметре, хотя эффективная площадь значительно ухудшается за пределами  $30^\circ$  вне оси. Эффективная площадь по оси составляла более  $1000 \text{ см}^2$  в диапазоне от 100 МэВ до 3 ГэВ [6]. Угловое разрешение сильно зависит от энергии, при 67%-м угле конфайнмента  $5.5^\circ$  при энергии 100 МэВ уменьшается до  $0.5^\circ$  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.

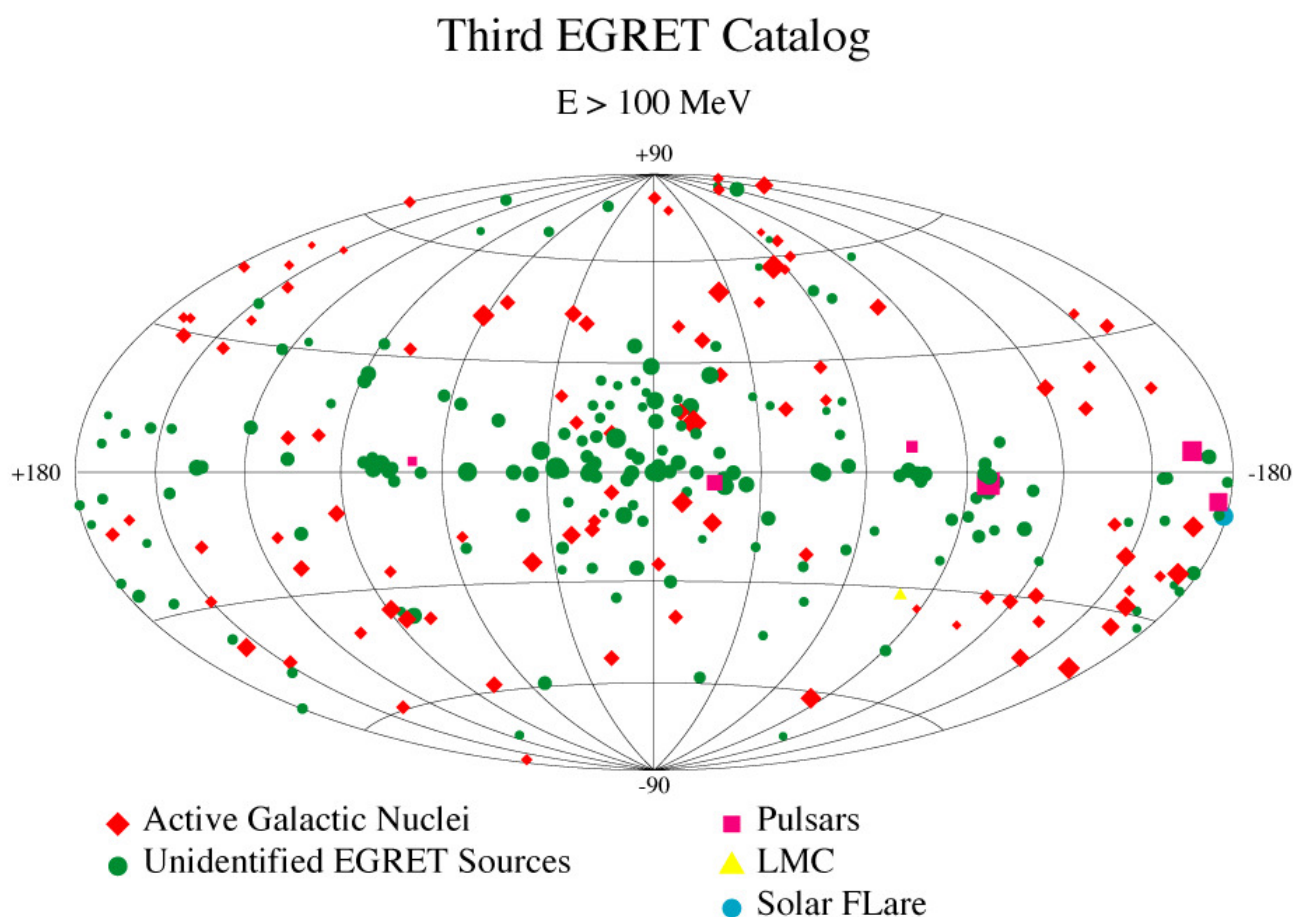


Рисунок 1 — Распределение источников в каталоге 3EG

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  $\gamma$ -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  $0.8^\circ$  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,

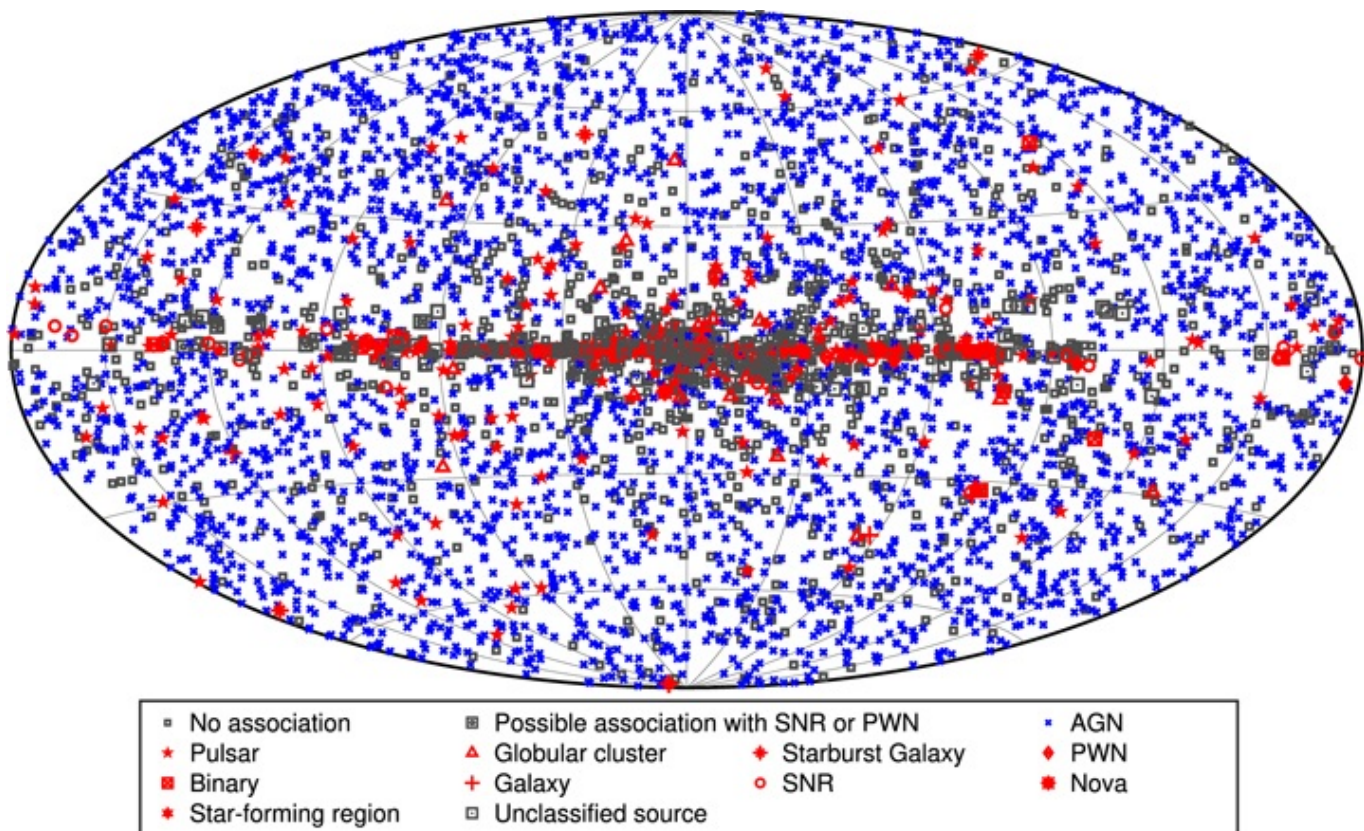


Рисунок 2 — Распределение источников в каталоге 4FGL Fermi-LAT

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  $\gamma$ -лучей

в пары позитрон-электрон. Под трекером находится калориметр, состоящий из 8-слойного массива кристаллов CsI для определения энергии  $\gamma$ -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 Смещенные источники

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.

## 2 Функция распределения смещенных источников

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].

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

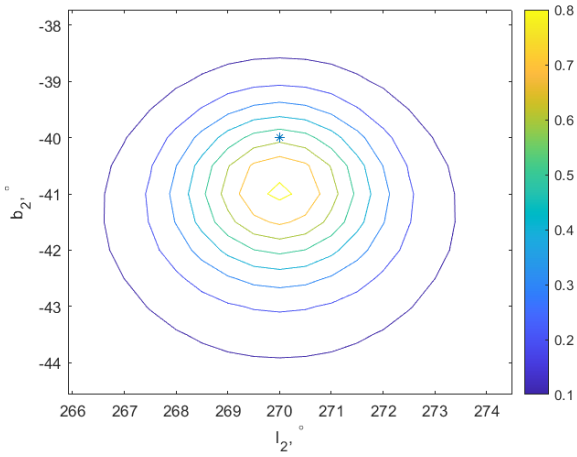
Перейдем к безразмерным координатам  $\rho_i = r_i/R_0$ ,  $i = \overline{1, 2}$ . После усреднения получим дифференциальную вероятность обнаружения источника в диапазоне координат от  $(b_2; l_2)$  до  $(b_2 + db_2; l_2 + dl_2)$ , обозначив  $df(b_2, l_2) = \frac{dN}{N}$ .

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

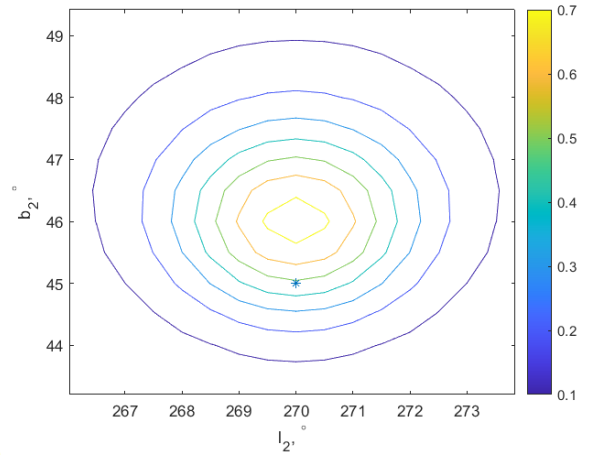
$$\begin{aligned} P &= \frac{R_0 \cos b_2}{r_0 (\sqrt{\pi})^3} \int_0^{r_0/R_0} d\rho_1 \int_0^{r_0/R_0} d\rho_2 \times \\ &\times \rho_2^2 \exp \left[ - \left( (-\rho_2 \cos b_2 \sin l_2 + \rho_1 \cos b_1 \sin b_1 - 1)^2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (\rho_2 \cos b_2 \cos l_2 - \rho_1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

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.

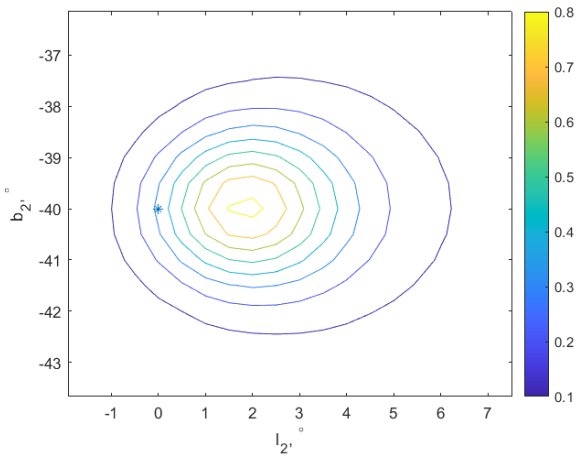


(a)

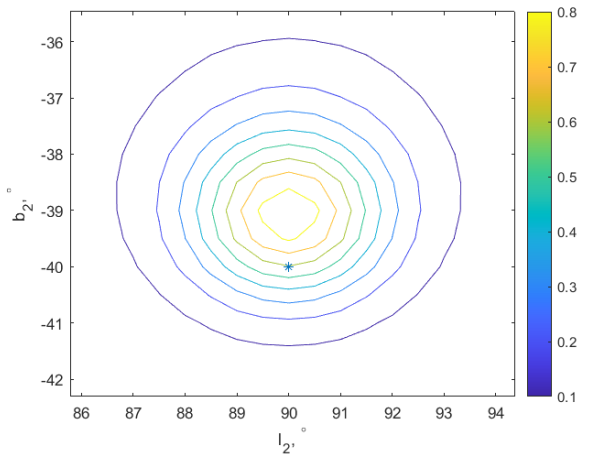


(b)

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 Отбор кандидатов

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  $3^\circ$ . Такое расстояние было выбрано в связи с невозможностью смещения источника на большие расстояния за выбранный промежуток исследования.

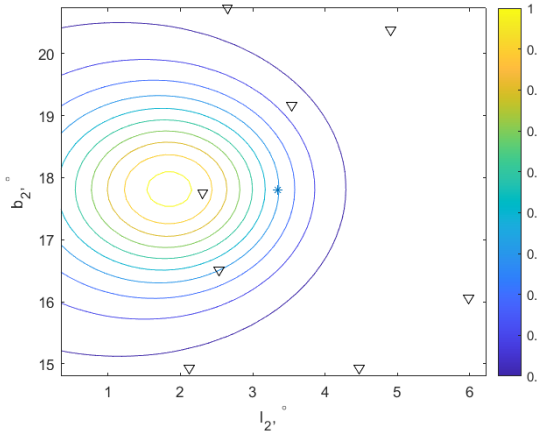
name	lii	bii	spect_index	spect_index_error	fermi_name	fermi_lii	fermi_bii	fermi_spect_index	fermi_sigm
3EG J1726-0807	15.52	14.77	2.34	0.19	4FGL J0056.8+1626	14.2020	16.4360	2.264282	0.147184
3EG J1824+3441	62.49	20.14	2.03	0.50	4FGL J0401.7+2112	60.4496	21.2007	2.400032	0.047850
3EG J1824-1514	16.37	-1.16	2.19	0.18	4FGL J0108.6+0134	17.1695	1.5819	2.357842	0.008153
3EG J1837-0423	27.44	1.06	2.71	0.44	4FGL J0158.8+0101	29.7040	1.0247	2.449147	0.096289
3EG J1850+5903	88.92	23.18	2.58	0.41	4FGL J0550.9+2552c	87.7457	25.8710	2.404278	0.132866
3EG J1850+5903	88.92	23.18	2.58	0.41	4FGL J0603.9+2159	90.9815	21.9848	2.436355	0.096071
3EG J2034-3110	12.25	-34.64	3.43	0.78	4FGL J0059.5-3338	14.8869	-33.6407	2.850328	0.151295
3EG J2035+4441	83.17	2.50	2.08	0.26	4FGL J0537.6+0400	84.4213	4.0029	2.106474	0.175057
3EG J2035+4441	83.17	2.50	2.08	0.26	4FGL J0538.6+0443	84.6630	4.7262	1.867955	0.185051
3EG J2035+4441	83.17	2.50	2.08	0.26	4FGL J0521.6+0103	80.4106	1.0533	1.987900	0.113496
3EG J2219-7941	310.64	-35.06	2.50	0.29	4FGL J2039.4-3616	309.8557	-36.2714	2.325266	0.062220
3EG J2241-6736	319.81	-45.02	2.39	0.36	4FGL J2126.3-4605	321.5948	-46.0978	2.530512	0.040111
3EG J2241-6736	319.81	-45.02	2.39	0.36	4FGL J2130.4-4241	322.6012	-42.6904	2.471418	0.121635
3EG J2241-6736	319.81	-45.02	2.39	0.36	4FGL J2119.5-4541	319.8817	-45.6947	2.495660	0.202470
3EG J2255-5012	338.75	-58.12	2.79	0.53	4FGL J2239.2-5657	339.8073	-56.9510	2.372610	0.160883

Рисунок 5 — Отобранные пары источников из двух каталогов

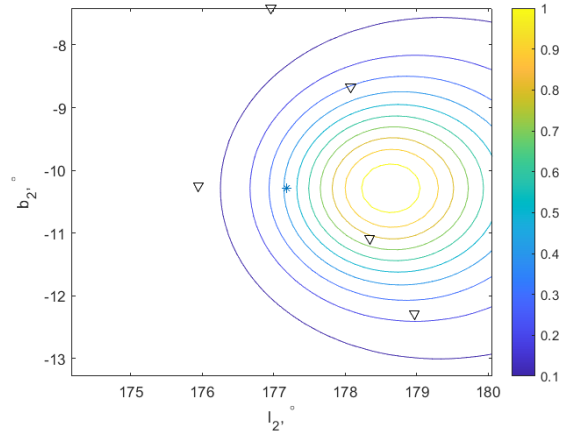
Таким образом, было отобрано 96 пар источников (рис. 7).

В таблицах на рисунках 8-11 представлены положения источников (координаты  $b$  и  $l$ ), а также их спектральные индексы для распределений 6(a) - 6(d). Левая колонка соответствует данным из ЗЕГ, правая - кандидатам его смещенный источник из LAT.

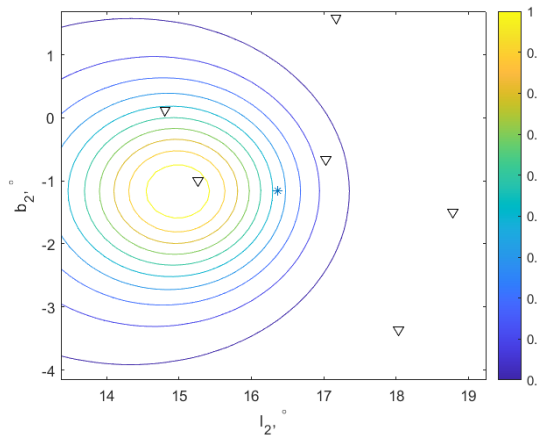
На этапе анализа возможности смещения источника и нахождения его в новых координатах, возникли сложности, связанные с тем, что несколько ГИ (LAT) с одинаковым спектральным индексом оказываются вблизи одного ГИ (EGRET) (рис. 3).



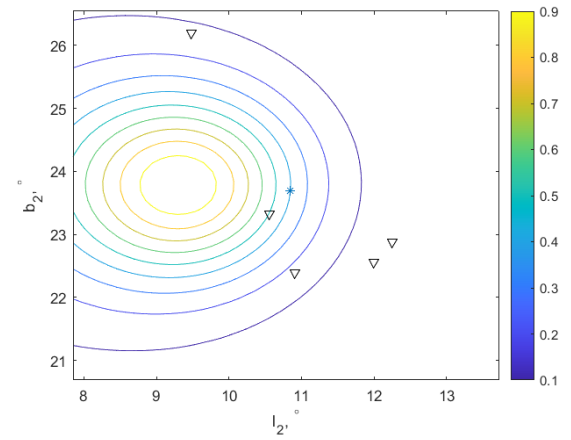
(a)



(b)



(c)



(d)

Рисунок 6 — Распределение вероятности сместившегося источника. Звездочкой обозначено начальное положение источника из ЗЕГ, треугольником - положения источников 4FGL.

name	lii	bii	spect_index	spect_index_error	index	fermi_name	fermi_lii	fermi_bii	fermi_spect_index	fermi_sigm
3EG J1649-1611	3.35	17.8	2.31	0.27	58	4FGL J0010.6+2043	2.6502	20.7332	2.390064	0.157232
3EG J1649-1611	3.35	17.8	2.31	0.27	43	4FGL J0008.4+1455	2.1246	14.9232	2.078870	0.063789
3EG J1649-1611	3.35	17.8	2.31	0.27	56	4FGL J0010.1+1631	2.5346	16.5182	2.061511	0.201626
3EG J1649-1611	3.35	17.8	2.31	0.27	48	4FGL J0009.2+1745	2.3077	17.7544	2.491071	0.118955
3EG J1649-1611	3.35	17.8	2.31	0.27	87	4FGL J0017.8+1455	4.4711	14.9228	2.246659	0.109313
3EG J1649-1611	3.35	17.8	2.31	0.27	94	4FGL J0019.6+2022	4.9070	20.3755	2.182743	0.081890
3EG J1649-1611	3.35	17.8	2.31	0.27	109	4FGL J0023.9+1603	5.9819	16.0639	2.102896	0.103909
3EG J1649-1611	3.35	17.8	2.31	0.27	71	4FGL J0014.1+1910	3.5368	19.1713	2.384697	0.096979

Рисунок 7 — Отобранные пары источников из двух каталогов

name	lii	bii	spect_index	spect_index_error	index	fermi_name	fermi_lii	fermi_bii	fermi_spect_index	fermi_sigm
3EG J1649-1611	3.35	17.8	2.31	0.27	58	4FGL J0010.6+2043	2.6502	20.7332	2.390064	0.157232
3EG J1649-1611	3.35	17.8	2.31	0.27	43	4FGL J0008.4+1455	2.1246	14.9232	2.078870	0.063789
3EG J1649-1611	3.35	17.8	2.31	0.27	56	4FGL J0010.1+1631	2.5346	16.5182	2.061511	0.201626
3EG J1649-1611	3.35	17.8	2.31	0.27	48	4FGL J0009.2+1745	2.3077	17.7544	2.491071	0.118955
3EG J1649-1611	3.35	17.8	2.31	0.27	87	4FGL J0017.8+1455	4.4711	14.9228	2.246659	0.109313
3EG J1649-1611	3.35	17.8	2.31	0.27	94	4FGL J0019.6+2022	4.9070	20.3755	2.182743	0.081890
3EG J1649-1611	3.35	17.8	2.31	0.27	109	4FGL J0023.9+1603	5.9819	16.0639	2.102896	0.103909
3EG J1649-1611	3.35	17.8	2.31	0.27	71	4FGL J0014.1+1910	3.5368	19.1713	2.384697	0.096979

Рисунок 8 — Отобранные пары источников из каталогов EGRET и LAT

name	lii	bii	spect_index	sigm	index	fermi_name	fermi_lii	fermi_bii	fermi_spect_index	fermi_sigm
3EG J0500+2529	177.18	-10.28	2.52	0.32	2860	4FGL J1155.8-1217	178.9688	-12.2848	2.378459	0.150118
3EG J0500+2529	177.18	-10.28	2.52	0.32	2843	4FGL J1153.3-1104	178.3423	-11.0787	2.267366	0.032594
3EG J0500+2529	177.18	-10.28	2.52	0.32	2838	4FGL J1152.3-0839	178.0808	-8.6663	2.393694	0.033086
3EG J0500+2529	177.18	-10.28	2.52	0.32	2814	4FGL J1147.8-0724	176.9608	-7.4144	2.473514	0.048363
3EG J0500+2529	177.18	-10.28	2.52	0.32	2796	4FGL J1143.7-1014	175.9465	-10.2402	2.263697	0.169821

Рисунок 9 — Отобранные пары источников из каталогов EGRET и LAT

name	lii	bii	spect_index	sigm	index	fermi_name	fermi_lii	fermi_bii	fermi_spect_index	fermi_sigm
3EG J1824-1514	16.37	-1.16	2.19	0.18	301	4FGL J0112.1-0321	18.0308	-3.3626	2.442795	0.095793
3EG J1824-1514	16.37	-1.16	2.19	0.18	246	4FGL J0059.2+0006	14.8073	0.1166	2.462402	0.161908
3EG J1824-1514	16.37	-1.16	2.19	0.18	253	4FGL J0101.0-0059	15.2629	-0.9904	2.490636	0.150330
3EG J1824-1514	16.37	-1.16	2.19	0.18	284	4FGL J0108.1-0039	17.0276	-0.6587	2.732779	0.112551
3EG J1824-1514	16.37	-1.16	2.19	0.18	285	4FGL J0108.6+0134	17.1695	1.5819	2.357842	0.008153
3EG J1824-1514	16.37	-1.16	2.19	0.18	313	4FGL J0115.1-0129	18.7859	-1.4962	2.685296	0.085894

Рисунок 10 — Отобранные пары источников из каталогов EGRET и LAT

name	lii	bii	spect_index	sigm	index	fermi_name	fermi_lii	fermi_bii	fermi_spect_index	fermi_sigm
3EG J1646-0704	10.85	23.69	2.39	0.36	207	4FGL J0049.0+2252	12.2520	22.8735	2.264445	0.142157
3EG J1646-0704	10.85	23.69	2.39	0.36	204	4FGL J0047.9+2233	11.9981	22.5632	2.449434	0.088899
3EG J1646-0704	10.85	23.69	2.39	0.36	162	4FGL J0037.9+2612	9.4823	26.2010	2.403915	0.131648
3EG J1646-0704	10.85	23.69	2.39	0.36	181	4FGL J0042.2+2319	10.5581	23.3271	2.284111	0.072844
3EG J1646-0704	10.85	23.69	2.39	0.36	185	4FGL J0043.6+2223	10.9095	22.3864	2.264147	0.178844

Рисунок 11 — Отобранные пары источников из каталогов EGRET и LAT

## 4 Заключение

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.

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](https://arxiv.org/abs/1909.01072) [[astro-ph.HE](#)].
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  $\gamma$ -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](https://arxiv.org/abs/2108.12609)].
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/](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](https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/cossc/egret/3rd_EGRET_Cat.html).