

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
«БЕГУЩИЕ» КОСМИЧЕСКИЕ
ИСТОЧНИКИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Научный руководитель

доцент кафедры №40, к.ф.-м.н.

_____ А.А. Кириллов

Студент

_____ Е. В. Васильева

Москва 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Функция распределения источников	8
1.1 Расчет расстояния до источника	8
1.2 Предположение о природе гамма-источников	9
1.3 Вывод функции распределения	10
2 Отбор источников — кандидатов в смещение	13
3 Заключение	18
Список использованных источников	19

ВВЕДЕНИЕ

Исследование высокоэнергетических гамма-источников (ГИ) представляет собой относительно новое направление в астрофизике. Долгое время идентификация таких объектов оставалась крайне сложной задачей: например, из 25 источников, зафиксированных во втором каталоге COS-B (1981 г.), лишь четыре были соотнесены с известными астрономическими объектами, а в третьем каталоге EGRET (1999 г.) свыше половины из 271 гамма-излучателя не нашли аналогов в других спектральных диапазонах [1]. На рисунке 1 можно наглядно увидеть разницу между каталогами SAS-2 (1972 г.), COS-B, EGRET и Fermi-LAT.

С момента запуска космического телескопа Fermi в 2008 году коллаборация Fermi-LAT выпустила несколько каталогов источников гамма-излучения, охватывающих различные энергетические диапазоны и периоды наблюдений.

Таблица 1 — Основные каталоги, опубликованные коллаборацией FERMI-LAT

Название каталога	Время наблюдения	Количество источников	Из них неидентифицированы	В процентном соотношении
0FGL	3 месяца	205	38	19%
1FGL	11 месяцев	1451	630	43%
2FGL	2 года	1873	576	31%
3FGL	4 года	3033	1010	33%
4FGL	8 лет	5064	1336	26%
4FGL-DR2	10 лет	5788	1658	29%
4FGL-DR3	12 лет	6658	2155	32%
4FGL-DR4	14 лет	7194	2577	36%

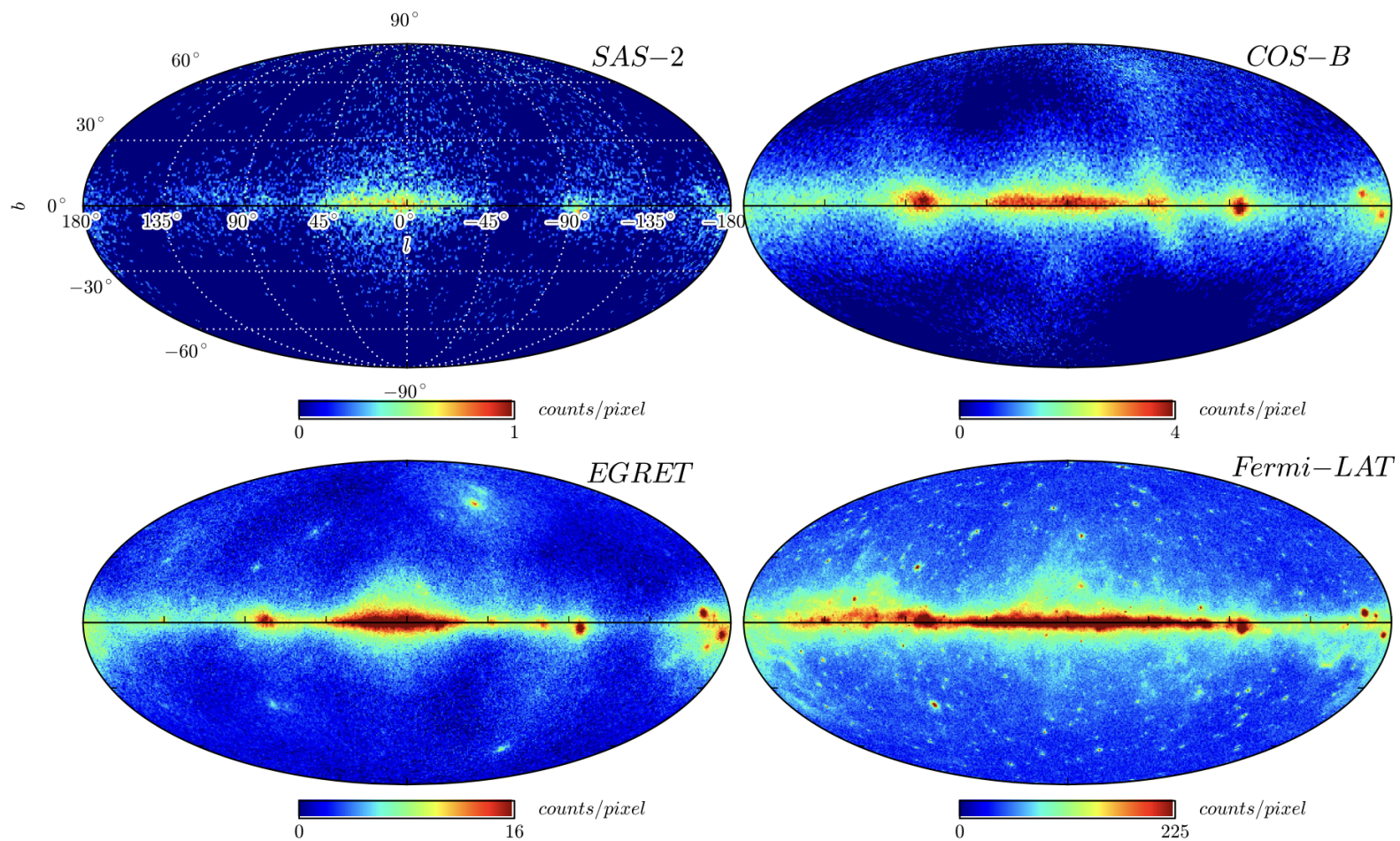


Рисунок 1 — Карты небесной сферы источников гамма-излучения, полученные SAS-2, COS-B, EGRET (энергии выше 50 МэВ) и Fermi-LAT (энергии выше 360 МэВ, 4 года наблюдений)[2]

Также были представлены каталоги, включающие информацию о высокоэнергетических источниках (1FHL, 2FHL, 3FHL). Все эти каталоги предоставляют обширную информацию о тысячах гамма-источников.

Хотя Fermi-LAT значительно продвинул исследования ГИ, многие зарегистрированные источники до сих пор остаются неидентифицированными.

Одной из основных характеристик источников гамма-излучения является спектральный индекс. На рисунке 2 можно увидеть спектр в дважды логарифмическом масштабе.

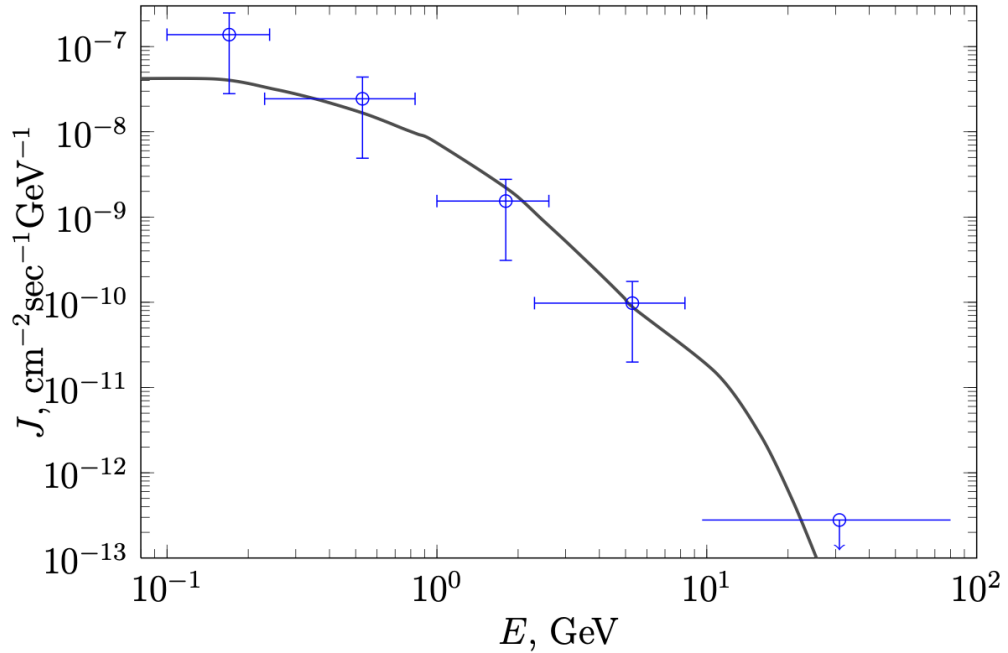


Рисунок 2 — Наблюдаемый спектр неидентифицированного источника 2FGL J1653.6-0159 [3]

Этот спектр имеет вид $I = I_0 E^{-\gamma}$, где γ — спектральный индекс.

Интересно отметить, что некоторые из неидентифицированных источников рассматриваются как потенциальные кандидаты на тёмную материю. Исследования показывают, что около трети точечных источников в каталогах Fermi-LAT остаются неидентифицированными, и существует возможность,

что некоторые из них могут быть источниками гамма-излучения, вызванного аннигиляцией частиц тёмной материи [4].

Кроме проблемы невозможности ассоциировать источники с известными, существует проблема, связанная с «потерей» ранее обнаруженных источников в последующих каталогах. Одна из основных причин несоответствий между каталогами — использование различных моделей фонового излучения. С течением времени модели этого фонового излучения совершенствовались, что влияло на результаты анализа. Например, в 4FGL была внедрена новая модель галактического диффузного излучения, что позволило более точно различать реальные источники и фоновые флуктуации [5]. В частности, была обновлена кривая вращения галактики, а также значительно усовершенствована методика разделения H_I и молекулярного водорода H_2 . Это было достигнуто путём декомпозиции спектров на индивидуальные профили линий, что предотвращает «размазывание» излучения массивных межзвёздных облаков вдоль луча зрения из-за их широкой дисперсии скоростей [2]. Так, например, обнаруженные ранее точечные источники могли оказаться газовыми структурами. Уточнение их центра приводит к смещению источника и, следовательно, к его «потере» в более новых каталогах [6].

Ещё одним фактором, влияющим на «потерю» источников, являются предположения о их движении. Например, сравнивая небесные карты источников из двух разнесенных по времени каталогов, можно обнаружить источники, обладающими одним спектральным индексом, находящимися в непосредственной близости друг от друга, однако выходящими за пределы 95% эллипса ошибок, что сама коллаборация при анализе считает «потерей» источника.

Таким образом, **цель** данной работы: оценка эффекта смещения неидентифицированных гамма-источников на основе данных каталогов FERMI-LAT 1FGL [7] и 4FGL [8].

Задачи:

- Оценка максимального возможного расстояния до источника, чтобы было возможно зарегистрировать эффект смещения;
- Отбор кандидатов в смещение по спектральному индексу, координатам и выходу из 95% эллипса;
- Вывод функции распределения.

1. ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ

1.1 Расчет расстояния до источника

Для расчета расстояния между «наблюдателем» и источником будет использован следующий принцип. За время $\Delta t = 14$ лет, то есть за время, прошедшее между каталогами 1FGL и 4FGL, источник мог сместиться на некоторое расстояние $R_0 = v_0 \Delta t$ в любом направлении, где $v_0 \approx 250 \frac{\text{км}}{\text{с}}$ — средняя скорость движения объектов в Галактике. То есть, $R_0 = 14 \text{ лет} \times 250 \frac{\text{км}}{\text{с}} \approx 0.0036$ пк. Угловое разрешение телескопа FERMI-LAT составляет $< 0.15^\circ$ (при энергиях > 10 ГэВ) [9].

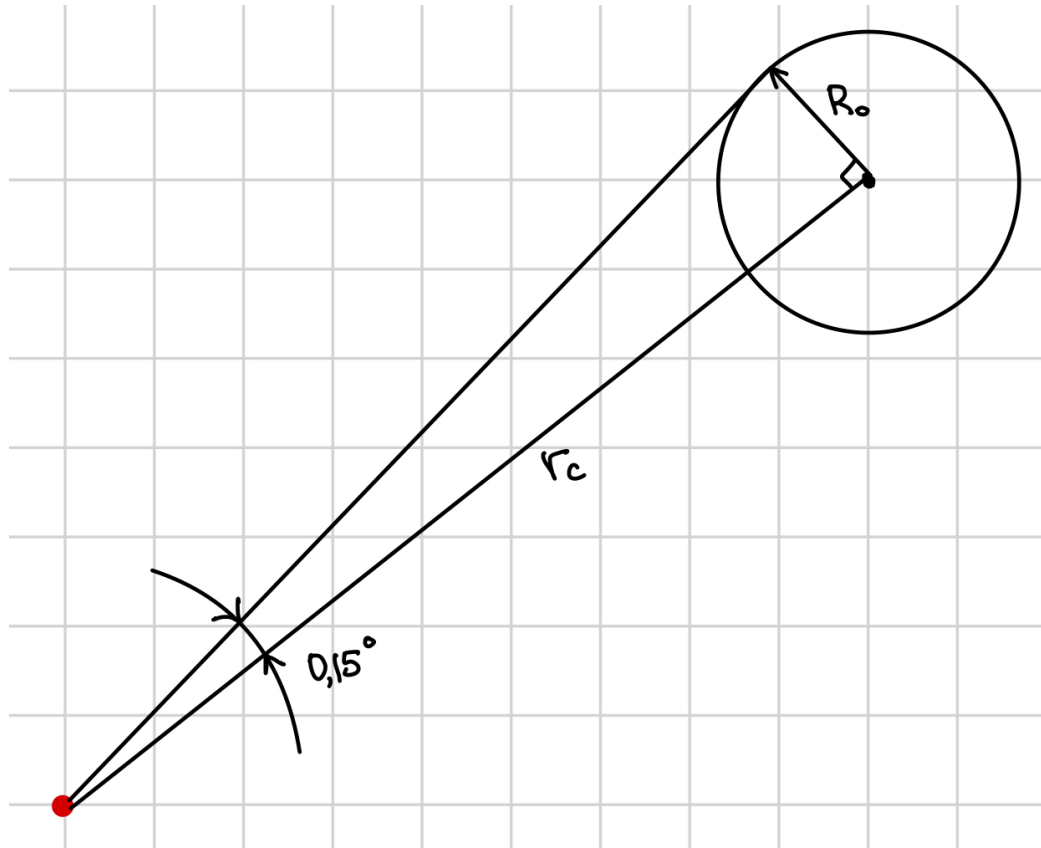


Рисунок 3 — Геометрическая интерпретация смещения источника

Геометрия задачи представлена на рисунке 3. Смещение относительно наблюдателя максимально тогда, когда направление смещения перпендикулярно направлению наблюдения источника. Таким образом, чтобы смещение источника превышало угловое разрешение и тем самым было доступно наблюдению, должно выполняться условие:

$$\operatorname{tg}(0.15^\circ) \leq \frac{R_0}{r}, \quad (1)$$

где r — расстояние до источника.

$$\operatorname{tg}(0.15^\circ) \approx \frac{0.15\pi}{180} = \frac{R_0}{r_c} \Rightarrow r_c = \frac{180R_0}{0.15\pi} \approx 1.4 \text{ пк},$$

где r_c — максимальное (критическое) расстояние, на котором смещение источника будет заметно при его ортогональном смещении по отношению к лучу зрения. Если же источник будет смещаться в любом другом направлении, то наблюдаемое расстояние до него должно быть меньше r_c .

Таким образом, чтобы за время, прошедшее между каталогами, можно было утверждать о смещении источника, его расстояние до телескопа должно составлять не более 1.4 пк (в случае, когда направление смещения перпендикулярно направлению наблюдения источника). Иначе смещение будет незаметно для FERMI-LAT, хотя и может быть доступно для будущих гамма-телескопов нового поколения (например, GAMMA-400).

1.2 Предположение о природе гамма-источников

Предположим, что существуют так называемые сгустки темной материи (ТМ) [3], обладающие концентрацией:

$$n_5 = \frac{\xi \rho_{loc}}{M} \sim 1.6 \frac{10^{-5} M_\odot}{M} \text{ пк}^{-3}, \quad (2)$$

где $\rho_{loc} = 0.3 \text{ ГэВ/см}^3$ — плотность скрытой массы в окрестности Солнечной системы, M — масса сгустка ТМ, $M_\odot$ — масса Солнца, $\xi \approx 0.2\%$ — вероятность выживания сгустков ТМ [10].

Тогда количество таких сгустков, которое могут быть детектированы телескопом FERMI-LAT:

$$N_5 = n_5 \frac{4}{3} \pi r_c^3, \quad (3)$$

так как r_c — максимальное расстояние, на котором может наблюдаться смещение ГИ. Принимая во внимание концентрацию (2), численная оценка количества потенциально наблюдаемых сгустков внутри объема с радиусом r_c дает:

$$N_5 = n_5 \frac{4}{3} \pi r_c^3 = 1.6 \frac{10^{-5} M_\odot}{M} \frac{4}{3} \pi r_c^3 \approx 19 \frac{10^{-5} M_\odot}{M}. \quad (4)$$

Видно, что величина дает разумную оценку количества источников, природа которых может быть связана со скрытой массой.

1.3 Вывод функции распределения

При моделировании динамики звёзд, пульсаров или тёмной материи в Галактике ключевую роль играет распределение их скоростей. Предположение о максвелловском распределении справедливо для систем в динамическом равновесии, где: нет значимых внешних возмущений (например, столкновений с другими галактиками), силы гравитации уравниваются кинетической энергией объектов, движение изотропно (нет выделенного направления).

Построим функцию распределения относительного числа источников в системе, связанной с центром Галактики, считая распределение скоростей максвелловским. Доля источников, имеющих скорости в диапазоне $(\vec{v}, \vec{v} + d\vec{v})$:

$$\frac{dN}{N} = \frac{1}{(v_0 \sqrt{\pi})^3} \exp \left(-\frac{\vec{v}^2}{v_0^2} \right) d^3 v, \quad (5)$$

где N — общее число источников, $v_0 \approx 250$ км/с — средняя скорость движения объектов в Галактике.

Так как все астрономические инструменты находятся в Солнечной системе, наблюдаемое смещение ГИ будет испытывать систематику, связанную

с движением Солнца. Из этого следует необходимость перехода в систему отсчета, движущуюся вместе с Солнцем:

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

где $\vec{v}_\odot$ — скорость Солнца. Если выбрать ось x , сонаправленную с направлением вектора скорости Солнца, получим:

$$\frac{dN}{N} = \frac{1}{(v_0\sqrt{\pi})^3} \exp\left(-\frac{(v_x - v_\odot)^2 + v_y^2 + v_z^2}{v_0^2}\right) dv_x dv_y dv_z. \quad (6)$$

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

$$\vec{v} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{\Delta t},$$

где $\vec{r}_1$ и $\vec{r}_2$ — начальное и конечное положение источника, а Δt — время, прошедшее между измерениями (в данном случае между каталогами 1FGL и 4FGL-DR4 прошло примерно 14 лет). Тогда можем преобразовать выражение (6):

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

Для удобства дальнейшего использования, необходимо получить распределение в галактических координатах. Для этого сперва перейдем к сферическим координатам:

$$\begin{cases} x = r \sin \theta \cos \phi, \\ y = r \sin \theta \sin \phi, \\ z = r \cos \theta. \end{cases}$$

При этом возникнет дополнительный член — якобиан перехода: $J = r^2 \sin \theta$.

Теперь перейдем к галактическим координатам $b = 90^\circ - \theta$, $l = 90^\circ - \phi$:

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

Якобиан перехода в таком случае: $J = r^2 \cos b$.

Таким образом, получим:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{N} &= \frac{r_2^2 \cos b_2}{(v_0 \Delta t \sqrt{\pi})^3} dr_2 db_2 dl_2 \times \\ &\times \exp \left(-\frac{1}{(v_0 \Delta t)^2} [(-r_2 \cos b_2 \sin l_2 + r_1 \cos b_1 \sin l_1 - v_\odot \Delta t)^2 + \right. \\ &\left. + (r_2 \cos b_2 \cos l_2 - r_1 \cos b_1 \cos l_1)^2 + (r_2 \sin b_2 - r_1 \sin b_1)^2] \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Проинтегрируем выражение по всем возможным расстояниям r_2 . В результате остается один неопределенный параметр r_1 , поэтому проведем усреднение интеграла, полученного ранее, по максимальному расстоянию $r_c = 1.4$ пк, при котором источник может быть отмечен, как сместившийся. Также введем замену $R_0 = v_0 \Delta t$, где R_0 — расстояние, на которое мог сместиться источник за время, прошедшее между каталогами.

$$\begin{aligned} \frac{dN}{N} &= \frac{\cos b_2 db_2 dl_2}{r_c (R_0 \sqrt{\pi})^3} \int_0^{r_c} dr_1 \int_0^{r_c} dr_2 \times \\ &\times \exp \left(-\frac{1}{R_0^2} [(-r_2 \cos b_2 \sin l_2 + r_1 \cos b_1 \sin l_1 - R_0)^2 + \right. \\ &\left. + (r_2 \cos b_2 \cos l_2 - r_1 \cos b_1 \cos l_1)^2 + (r_2 \sin b_2 - r_1 \sin b_1)^2] \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Обозначим $df(b_2, l_2) = \frac{dN}{N}$. Перейдем к безразмерным координатам: $\rho_1 = r_1/R_0$ и $\rho_2 = r_2/R_0$. Усреднив по всем возможным положениям источников ρ_1 и ρ_2 , получим плотность вероятности обнаружения источника в

диапазоне координат от (b_2, l_2) до $(b_2 + db_2, l_2 + dl_2)$:

$$P(b_2, l_2) = \frac{df(b_2, l_2)}{db_2 dl_2} = \frac{R_0 \cos b_2}{r_c (\sqrt{\pi})^3} \int_0^{r_c/R_0} d\rho_1 \int_0^{r_c/R_0} d\rho_2 \times$$

$$\times \exp \left[-\frac{1}{R_0^2} \left((-r_2 \cos b_2 \sin l_2 + r_1 \cos b_1 \sin l_1 - 1)^2 + \right. \right. \quad (9)$$

$$\left. \left. + (r_2 \cos b_2 \cos l_2 - r_1 \cos b_1 \cos l_1)^2 + (r_2 \sin b_2 - r_1 \sin b_1)^2 \right) \right].$$

Вероятность найти источник в конкретной области пространства может быть получена в результате интегрирования формулы (9) по b_2 и l_2 .

2. ОТБОР ИСТОЧНИКОВ — КАНДИДАТОВ В СМЕЩЕНИЕ

Для начала среди данных FERMI-LAT — каталогов 1FGL и 4FGL — были отобраны только неидентифицированные источники, путем исключения тех источников, которые уже имеют известный класс и/или ассоциации. Также были отсеяны источники, принадлежащие к диску галактики, для которых $|b| < 15^\circ$.

Для того, чтобы убедиться, что кандидаты в смещение действительно могут оказаться одним и тем же сместившимся источником, а не двумя разными ГИ, по-случайности локализованными рядом на небесной сфере, был произведен отбор по спектральным индексам γ для каждого каталога:

$$|\gamma_i - \gamma_{\text{cat}}| < \delta\gamma,$$

где γ_i — фиксированная константа спектрального индекса и пробегает значения i от 1.5 до 2.5 с шагом 0.5, γ_{cat} — значение спектрального индекса для ГИ из 1FGL и 4FGL, $\delta\gamma$ — погрешность спектрального индекса для ГИ из 1FGL и 4FGL. В результате отбора по указанному критерию число неидентифицированных источников из 1FGL сократилось до 112, а из 4FGL — до 297.

Затем источники из двух каталогов отбирались уже относительно друг друга. Источник считается потерянным, если он выходит за пределы 95%.

Введем переменные:

- l_s, b_s — координаты источник (долгота и широта),
- b_s, l_e — координаты центра эллипса (долгота и широта),
- a — большая полуось эллипса,
- b — малая полуось эллипса,
- θ — позиционный угол (в радианах).

Преобразуем координаты в локальную прямоугольную систему:

$$\Delta l = (l_s - l_e) \cdot \cos(b_e), \quad \Delta b = b_s - b_e.$$

Выполним поворот координат на угол θ :

$$\begin{cases} x' = \Delta l \cdot \cos(\theta) + \Delta b \cdot \sin(\theta), \\ y' = -\Delta l \cdot \sin(\theta) + \Delta b \cdot \cos(\theta) \end{cases} \quad (10)$$

Точка (l_s, b_s) лежит **вне эллипса**, если выполняется неравенство:

$$\left(\frac{x'}{a}\right)^2 + \left(\frac{y'}{b}\right)^2 > 1 \quad (11)$$

Подставляя выражения для x' и y' (10) в неравенство эллипса (11), получаем:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{(l_s - l_e) \cos(b_e) \cos(\theta) + (b_s - b_e) \sin(\theta)}{a} \right)^2 + \\ & + \left(\frac{-(l_s - l_e) \cos(b_e) \sin(\theta) + (b_s - b_e) \cos(\theta)}{b} \right)^2 > 1 \end{aligned} \quad (12)$$

Но кроме выхода из 95% эллипса ошибок, также необходимо ограничить расстояние d , на которое источники отнесены друг от друга:

$$d = (l_{4\text{FGL}} - l_{1\text{FGL}})^2 + (b_{4\text{FGL}} - b_{1\text{FGL}})^2 \quad (13)$$

Таким образом, можно получить пары кандидатов в смещение, задав следующие параметры отбора:

- Максимальное расстояние между источниками равно $d = 5^\circ$.
- Спектральный индекс $\gamma = 2$.
- Плоскость галактики считаем $|b| < 15^\circ$.

Пары кандидатов в смещение, полученные в результате данного отбора, представлены на рисунке 4.

На рисунках 4, 5 наблюдается сильная зависимость количества пар источников от максимального расстояния d между ними. При одном и том же значении спектрального индекса $\gamma = 2$, для $d = 5^\circ$ наблюдается 42 пары гамма-источников, а для $d = 1^\circ$ источников становится в разы меньше — всего 5 пар.

На рисунках 4, 6, 7 можно наблюдать изменение количества источников в зависимости от изменения спектрального индекса γ . Для $\gamma = 2.5$ обнаружено 29 пар кандидатов в смещение, для $\gamma = 2$ — 42 пары, для $\gamma = 1.5$ — всего одна пара. Для значений $1.5 < \gamma < 2.5$ ГИ, подходящих, как кандидаты в смещение, не было обнаружено.

Также видно, что при $\gamma = 2$ распределение по небесной сфере равномерно. При $\gamma = 2.5$ определяется определенная анизотропия: в области галактического центра таких пар источников не наблюдается. В рамках гипотезы, рассматриваемой выше, ожидается однородное распределение источников, чему больше соответствует распределение с $\gamma = 2$.

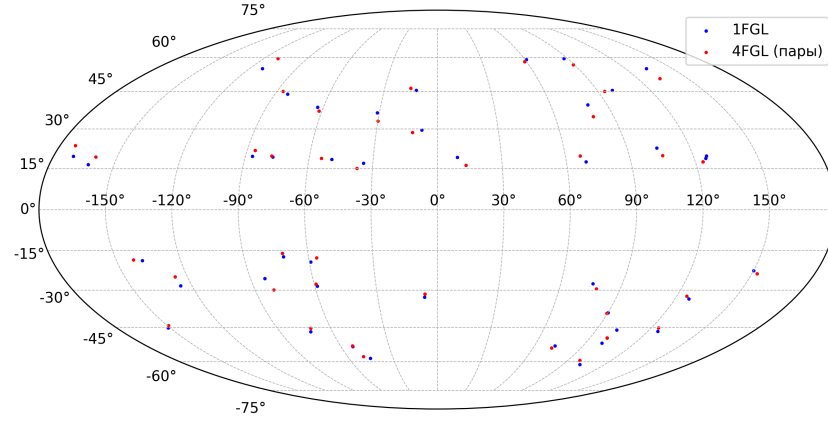


Рисунок 4 — Карта небесной сферы кандидатов в смещение по результатам отбора из каталогов 1FGL и 4FGL по результатам отбора при $\gamma = 2$ и $d = 5^\circ$, получено 42 пары

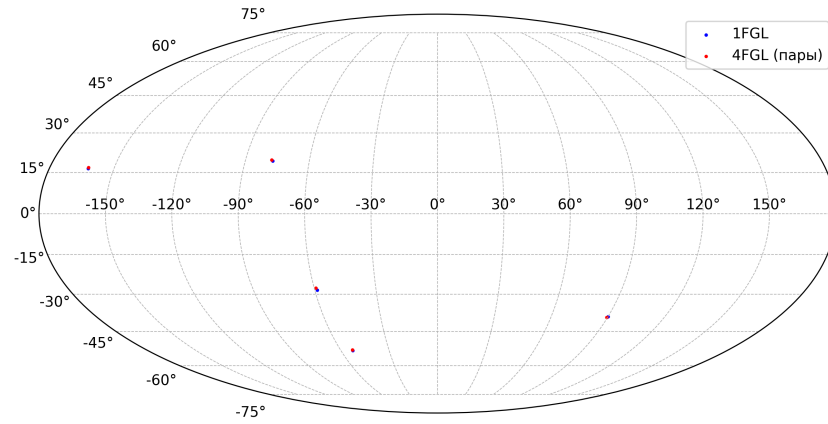


Рисунок 5 — Карта небесной сферы кандидатов в смещение по результатам отбора из каталогов 1FGL и 4FGL по результатам отбора при $\gamma = 2$ и $d = 1^\circ$, получено 5 пар

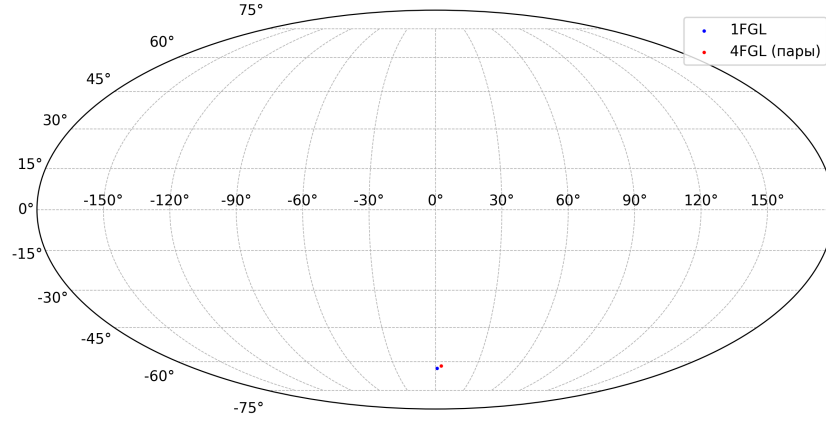


Рисунок 6 — Карта небесной сферы кандидатов в смещение по результатам отбора из каталогов 1FGL и 4FGL по результатам отбора при $\gamma = 1.5$ и $d = 5^\circ$, получена 1 пара

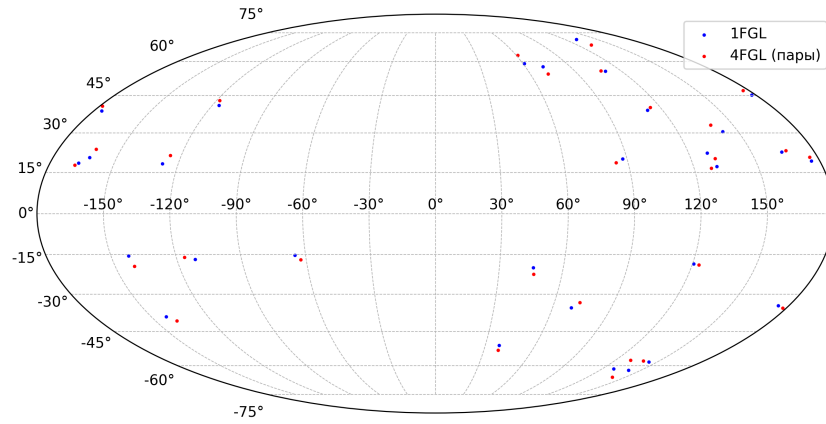


Рисунок 7 — Карта небесной сферы кандидатов в смещение по результатам отбора из каталогов 1FGL и 4FGL по результатам отбора при $\gamma = 2.5$ и $d = 5^\circ$, получено 29 пар

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была произведена оценка эффекта смещения неидентифицированных гамма-источников (ГИ) на основе данных эксперимента FERMI-LAT 1FGL и 4FGL.

Установлено, что при средней скорости движения источников порядка $v_0 \approx 250$, км/с и времени между измерениями $\Delta t = 14$ лет, величина потенциального смещения составляет $R_0 \approx 0.0036$ пк. Сопоставив это значение с угловым разрешением телескопа Fermi-LAT, получено, что смещение может быть обнаружено лишь для источников, находящихся на расстоянии не более $r_c \approx 1.4$ пк от телескопа.

Исходя из предположения, что ГИ могут быть сгустками темной материи с массой $M = 10^{-5} M_\odot$ [10], был проведён расчёт ожидаемого числа таких источников. Полученная оценка количества сгустков: $19 \frac{10^{-5} M_\odot}{M}$. Эта величина дает разумную оценку количества источников, природа которых может быть связана со скрытой массой.

Также была выведена аналитическая форма функции распределения смещённых источников, основанная на предположении о максвелловском распределении скоростей и переходе к системе координат, связанной с движением Солнца. Полученное выражение позволяет количественно оценить плотность вероятности обнаружения источника в диапазоне координат от (b_2, l_2) до $(b_2 + db_2, l_2 + dl_2)$ обнаружения смещённого источника в различных направлениях на небесной сфере. Вероятность же найти источник в конкретной области пространства может быть найдена в результате интегрирования плотности вероятности по b_2 и l_2 .

Был произведен отбор источников — подходящих кандидатов в смещение — из 1FGL и 4FGL. Сперва были отсеяны источники, принадлежащие к плоскости Галактики ($|b| < 15^\circ$). Затем проводился отбор по спектральному

индексу γ , а также по расстоянию относительно друг друга d и выходу источника, принадлежащего к более позднему каталогу, из 95% эллипса ошибок источника из более раннего каталога. При изменении γ и d были получены различные наборы пар-кандидатов в смещение:

- Для $\gamma = 2$ и $d = 5^\circ$ получено 42 пары.
- Для $\gamma = 2$ и $d = 1^\circ$ получено 5 пар.
- Для $\gamma = 1.5$ и $d = 5^\circ$ получена 1 пара.
- Для $\gamma = 2.5$ и $d = 5^\circ$ получено 29 пар.

Результаты работы подтверждают, что анализ смещения источников в различных каталогах гамма-излучения может представлять интерес с точки зрения выявления новых астрофизических объектов, в том числе гипотетических сгустков тёмной материи. Будущие миссии с улучшенным угловым разрешением, такие как GAMMA-400, будут обладать существенно более высокой чувствительностью к таким смещениям и могут внести существенный вклад в решение проблемы природы неидентифицированных ГИ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Salvetti D.* Classifying Unidentified Gamma-ray Sources : PhD thesis / Salvetti David. — Pavia U., 2014. — arXiv: 1603.00231 [astro-ph.HE].
2. Development of the Model of Galactic Interstellar Emission for Standard Point-source Analysis of Fermi Large Area Telescope Data / F. Acero [et al.] // *Astrophys. J. Suppl.* — 2016. — Apr. — Vol. 223, no. 2. — P. 26. — DOI: 10.3847/0067-0049/223/2/26. — arXiv: 1602.07246 [astro-ph.HE].
3. *Belotsky K., Kirillov A., Khlopov M.* Gamma-ray evidence for dark matter clumps // *Gravitation and Cosmology.* — 2014. — Jan. — Vol. 20, no. 1. — P. 47–54. — DOI: 10.1134/S0202289314010022. — arXiv: 1212.6087 [astro-ph.HE].
4. A search for dark matter among Fermi-LAT unidentified sources with systematic features in machine learning / V. Gammaldi [et al.] // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* — 2023. — Jan. — Vol. 520, no. 1. — P. 1348–1361. — ISSN 1365-2966. — DOI: 10.1093/mnras/stad066.
5. Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog / S. Abdollahi [et al.] // *The Astrophysical Journal Supplement Series.* — 2020. — Mar. — Vol. 247, no. 1. — P. 33. — ISSN 1538-4365. — DOI: 10.3847/1538-4365/ab6bcb.
6. Fermi Large Area Telescope Third Source Catalog / F. Acero [et al.] // *Astrophys. J. Suppl.* — 2015. — June. — Vol. 218, no. 2. — P. 23. — DOI: 10.1088/0067-0049/218/2/23. — arXiv: 1501.02003 [astro-ph.HE].

7. FERMI LARGE AREA TELESCOPE FIRST SOURCE CATALOG /
A. A. Abdo [et al.] // The Astrophysical Journal Supplement Series. —
2010. — May. — Vol. 188, no. 2. — P. 405–436. — ISSN 1538-4365. —
DOI: 10.1088/0067-0049/188/2/405.
8. Fermi Large Area Telescope Fourth Source Catalog Data Release 4 (4FGL-
DR4) / J. Ballet [et al.] // arXiv e-prints. — 2023. — July. — arXiv:2307.12546. —
DOI: 10.48550/arXiv.2307.12546. — arXiv: 2307.12546 [astro-ph.HE].
9. The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mis-
sion / W. B. Atwood [et al.] // Astrophys. J. — 2009. — June. — Vol.
697, no. 2. — P. 1071–1102. — DOI: 10.1088/0004-637X/697/2/
1071. — arXiv: 0902.1089 [astro-ph.IM].
10. *Berezinsky V. S., Gurevich A. V., Zybin K. P.* Distribution of dark mat-
ter in the galaxy and the lower limits for the masses of supersymmetric
particles. — 10/1992.