

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

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

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доц.

А.А. Кириллов

Выполнила:

О.В. Иванова

Москва 2024

Содержание

1	Введение	3
1.1	Эксперимент EGRET	3
1.2	Эксперимент Fermi-LAT	3
2	Статистический анализ	6
2.1	Обновление данных на новый каталог	6
2.2	Поиск новых и альтернативных методов	7
3	Заключение	8

1 Введение

Цель работы: поиск и проверка альтернативных методов статистического анализа вероятности смещения точечных источников космического гамма-излучения.

Последние десятилетия одной из самых важных проблем новой физики остаётся поиск скрытой массы. Существует подтверждение её присутствия [1], однако её природа до сих пор остаётся неясна. Основным кандидатом на роль скрытой массы является WIMPs (Weakly Interacting Massive Particle). Это слабо взаимодействующие массивные частицы, рождённые в ранней Вселенной и имеющие массу более 100 ГэВ [2]. Существуют модели [3], предлагающие кандидаты частиц скрытой массы, которые могут аннигилировать и порождать в том числе и гамма-излучение.

Модель холодной скрытой массы предсказывает как субгало [4], так и сгустки скрытой массы [5, 6]. Субгало представляют собой скопления скрытой массы меньшего масштаба, которые могут быть связаны с отдельными карликовыми галактиками или другими мелкими космическими объектами. Субгало скрытой массы, если они достаточно массивные или достаточно близкие к Земле, могут быть видны в гамма-диапазоне. Они могут быть обнаружены посредством регистрации гамма-излучения.

1.1 Эксперимент EGRET

С 1991 по 1999 гг. в Комптоновской обсерватории гамма-лучей (CGRO) в качестве высокоэнергетического гамма-телескопа функционировал EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope). Диапазон энергии телескопа составлял от 30 МэВ до более 20 ГэВ. Его поле зрения было около 80° в диаметре. EGRET – первый телескоп, который смог воссоздать карту звёздного неба. В 3EG (третий каталог EGRET, данные которого получены в период с 22 апреля 1991 по 3 октября 1995) собран 271 источник гамма-излучения, 170 из них неидентифицированы [7]. Возможными причинами невозможности распознать источники могут быть следующие:

- Нехватка данных. Гамма-излучение очень трудно детектировать и точно анализировать, особенно когда оно исходит от источников, которые расположены далеко или находятся в сложных областях Вселенной, таких как плотные регионы в центре галактик.
- Невозможность точного связывания с оптическими или радиоиндикаторами. Иногда источник гамма-излучения не имеет ярких следов в других частях спектра (например, в оптическом, радио или рентгеновском диапазоне), что затрудняет его идентификацию.
- Новые типы объектов. Возможно, что некоторые неидентифицированные источники — это совершенно новые типы объектов, которые мы ещё не открыли или не полностью поняли. Например, могут быть новые типы активных галактик, сверхмассивных чёрных дыр.
- Сложность в классификации. Некоторые источники гамма-излучения могут проявлять странные или необычные характеристики, которые не вписываются в существующие теории или классификации известных астрономических объектов.

1.2 Эксперимент Fermi-LAT

После эксперимента EGRET на смену ему пришёл Fermi-LAT. Large Area Telescope (LAT) начал свою работу в 2008 году и продолжается по настоящее время. Его работа заключается также в обнаружении γ -лучей, но уже в диапазоне энергий от 20 МэВ до более чем 1 ТэВ, измеряя время их прихода, энергию

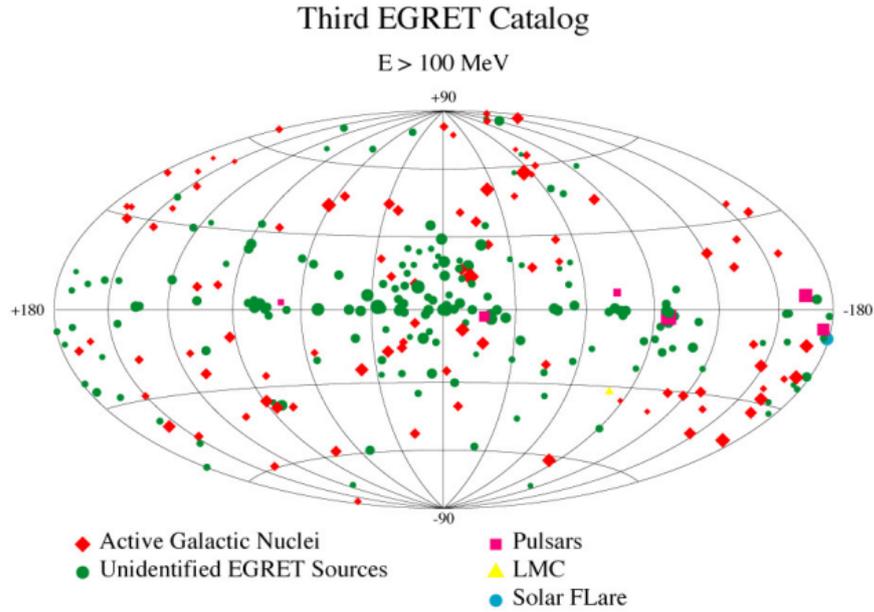


Рис. 1: Распределение источников в каталоге EGRET.

и направление. Поле зрения LAT составляет $\sim 2.7^\circ$ при энергии 1 ГэВ и выше. За счёт более высокой точности измерения данные Fermi-LAT достовернее, чем данные, полученные при эксперименте EGRET.

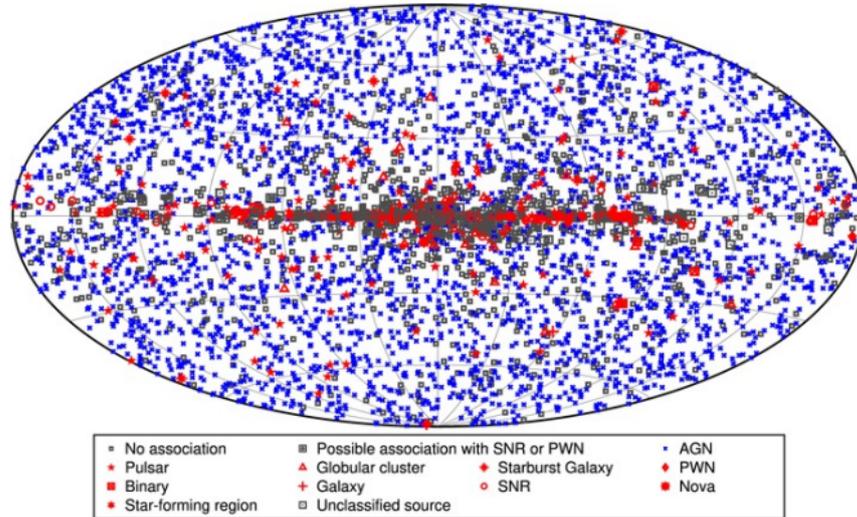


Рис. 2: Распределение источников в каталоге 4FGL Fermi-LAT.

Последней версией каталога Fermi-LAT является каталог 4FGL, собранный за 14 лет работы. Этот каталог содержит 7194 гамма-источника. По сравнению с предыдущей версией за ещё 2 года работы было добавлено 546 источников. Некоторые параметры для всех источников были обновлены, 14 источников было удалено, у 10 изменены координаты, 32 являются новыми связанными, 11 ассоциаций изменены и 3 отброшены [8].

Важной особенностью результатов обоих телескопов является тот факт, что данные из каталога Fermi-LAT не соответствуют полностью результатам EGRET. Ряд гамма-источников (порядка 60–70%), най-

денных EGRET, не был обнаружен во время работы Fermi-LAT [9]. Одним из возможных объяснений данного явления может быть смещение гамма-источников. Этот момент требует тщательного рассмотрения и изучения.

2 Статистический анализ

2.1 Обновление данных на новый каталог

Перед нами стояла цель исследовать альтернативные методы анализа возможности смещение гамма-источников. В связи с этим первоначальной задачей была обработка обновлённых данных из последней версии каталога Fermi с последующим анализом результатов. Для этого был проведён отбор точечных гамма-источников из каталогов Fermi-LAT и EGRET. Отбор проводился по совпадению спектральных индексов в соответствии с формулой

$$|I_{\text{LAT}} - I_{\text{EGRET}}| \leq \sqrt{(\Delta I_{\text{LAT}})^2 + (\Delta I_{\text{EGRET}})^2} \quad (1)$$

В результате осталось 74 источника EGRET. На каждый источник EGRET приходится множество источников из каталогов Fermi. Построим функцию распределения источников в галактических координатах, где b и l - галактическая широта и галактическая долгота соответственно:

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

Для проведения анализа линии уровня функции плотности были разбиты на области с заданным шагом (значение вероятности $\sim 10\%$).

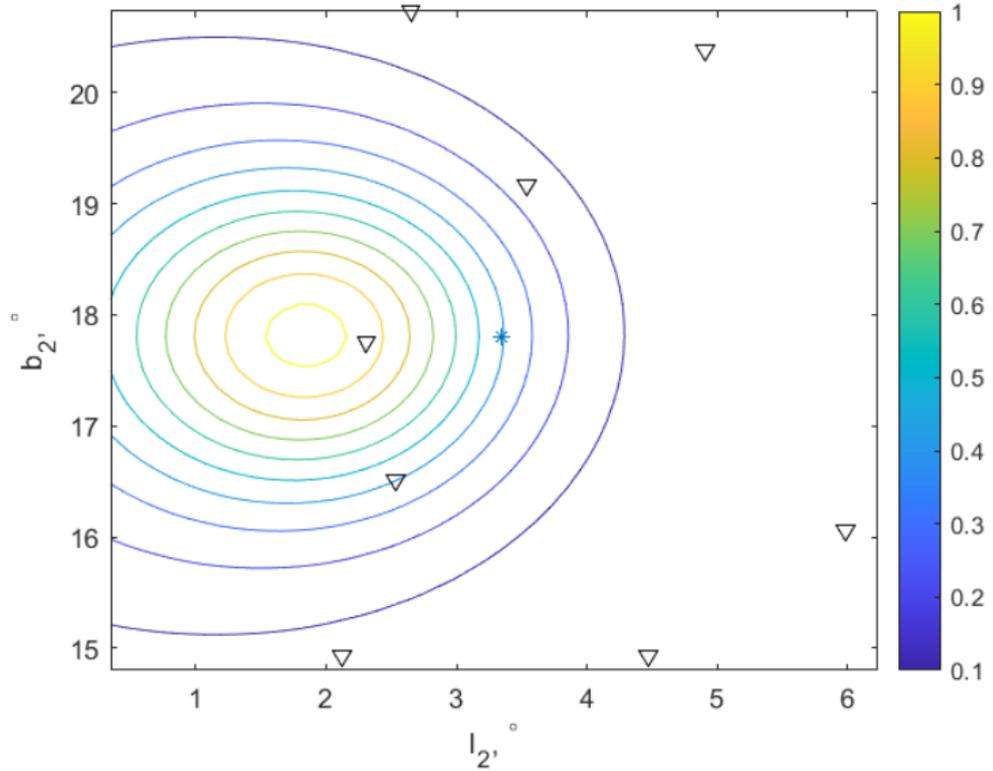


Рис. 3: Линии уровня плотности вероятности смещённого источника. (*) обозначено начальное положение источника из 3EG, (∇) — положения источников 4FGL.

Это было необходимо для проверки двух гипотез: H_0 — “фоновая гипотеза”, согласно которой гамма-источники попали в область случайно, H_1 — “сигнальная гипотеза”, согласно которой среди выделенных событий имеются “сигнальные”, отвечающие за смещение источников. На каждый источник EGRET с номером a может наблюдаться лишь одно сигнальное событие, тогда распределение источников, попавших в каждую i -ю область, будет отличаться от “фонового”. Ожидаемое количество источников в каждом кольце в рамках гипотезы H_1 :

$$N_i^a = (N_{tot}^a - \theta) \cdot \left(\frac{S_i}{S_{tot}} \right) + 0.1 \cdot \theta \quad (3)$$

Здесь N_i^a — количество источников, попавших в каждый i -й бин распределения, N_{tot}^a — количество кандидатов в смещённые источники из каталога Fermi для a -го источника из каталога EGRET, S_i — площадь i -й области, ограниченной линией уровня, S_{tot} — суммарная площадь всех колец. Для проверки гипотезы смещения к полученной функции распределения добавляется параметр θ с границами $0 \leq \theta \leq 1$. Если $\theta = 0$, получаем “фоновую гипотезу” и отсутствие “сигнальных событий”, тогда как при $\theta = 1$ получаем, что каждое отобранное событие является сигнальным. При некотором промежуточном значении имеем долю источников, которые содержат сигнал.

На основе данной формулы были построены гистограммы распределения кандидатов в смещённые источники из каталога Fermi в зависимости от спектрального индекса (рис. 4). Также на диаграмме представлены: наименьшее значение хи-квадрат, делённое на число степеней свободы, — $n = 8$, значение параметра θ , при котором оно достигается, p-value для рассчитанного значения χ^2 , N_E — количество источников EGRET, N — количество источников из числа N_E , которые могут проявлять смещение.

Для источников со спектральным индексом $I \leq 2.5$ не находятся кандидаты в смещённые среди данных Fermi-LAT. При этом для $I \approx 3$ из 10 кандидатов каталога EGRET смещение могут проявлять 3 источника, такие спектральные индексы являются характерными для небольших кластеров маломассивных чёрных дыр, излучающих за счёт механизма Хокинга [10]. Для остальных групп $I > 2.5$ при критическом значении $\frac{\chi^2}{n} = 15.507$ или же при p-value < 0.05 невозможно принять гипотезу о том, что данные соответствуют “фоновой” гипотезе (то есть, гипотезе о том, что источник попал в область распределения случайно). Это свидетельствует о сложности различения “фонового” источника и “сигнального” источника, поскольку их характеристики, такие как спектральные индексы, существенно пересекаются, что затрудняет точное разделение.

2.2 Поиск новых и альтернативных методов

Основная проблема заключается в том, что источников гамма-излучения мало. На диаграммах видно наложение линий “фоновой” и “сигнальной” гипотез. Это значительно затрудняет анализ полученных результатов, так как при добавлении хотя бы одного нового источника, диаграммы могут значительно поменяться. Главная задача, которая поставлена в работе, заключается в том, как корректно провести статистический анализ при малой выборке. Также важно убедиться, что методы, используемые при анализе, дают правильные результаты.

Для этого искали альтернативные методы статистического анализа. Из найденных методов были такие, как тест Фишера, t-критерий Стьюдента, основанный на распределении Стьюдента, U-критерий Манна — Уитни и Байесовский анализ, использующий теорему Байеса. В результате исследования разных

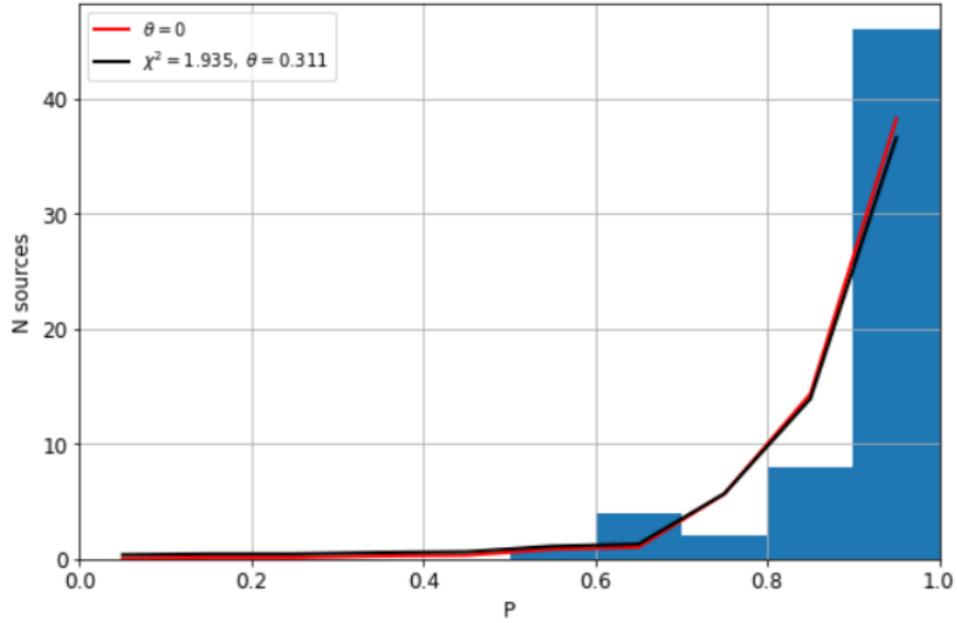


Рис. 4: Распределение кандидатов в смещенные источники из каталога Fermi по областям, ограниченным линиями уровня, для спектрального индекса $I = 3$. Красной линией обозначено «фоновое» распределение, черной — «фон» + «сигнал».

методов решено было подробнее рассмотреть Байесовский подход. Одним из главных достоинств этой статистики является способность обновлять вероятностные оценки по мере появления новых данных, что идеально подходит для динамичных ситуаций, таких как астрономические наблюдения.

Теорема Байеса описывает, как обновлять вероятность гипотезы на основе новых данных. Она имеет следующий вид:

$$P(H | D) = \frac{P(D | H)P(H)}{P(D)} \quad (4)$$

где:

- $P(H | D)$ — апостериорная вероятность гипотезы H , т.е. вероятность гипотезы после получения данных D .
- $P(D | H)$ — правдоподобие данных D , если гипотеза H верна (насколько данные согласуются с гипотезой).
- $P(H)$ — априорная вероятность гипотезы H , то есть вероятность гипотезы до получения данных.
- $P(D)$ — маргинальная вероятность данных, т.е. общая вероятность получения данных, независимо от гипотезы.

В дальнейшем предполагается провести работу с данной статистикой в контексте космических гамма-источников.

3 Заключение

В данной работе рассматривался альтернативный подход к статистическому анализу функции распределения точечных гамма-источников гамма-излучения.

Для этого сначала были построены гистограммы распределения кандидатов в смещённые источники из последней версии каталога Fermi за 14 лет работы с последующим нахождением минимального хи-квадрата. Вследствие того, что источников мало, на гистограмме идёт сильное наложение линий “фоновой” гипотезы и “сигнальной” что сильно затрудняет анализ.

Поэтому далее были исследованы альтернативные методы статистического анализа, пригодные для малой выборки. Дальнейшая работа заключается в подробном рассмотрении одной из статистик, а именно Байесовского метода, для возможного анализа гамма-источников.

Список литературы

- [1] K. Freese. Review of observational evidence for dark matter in the universe and in upcoming searches for dark stars. *EAS Publications Series*, 36:113–126, 2009.
- [2] S. Navas et al. Review of particle physics. *Phys. Rev. D*, 110(3):030001, 2024.
- [3] Dorit Glawion et al. Unidentified fermi objects in the view of h.e.s.s. – possible dark matter clumps, 2019.
- [4] Yuan-Peng Wang et al. Testing the dark matter subhalo hypothesis of the gamma-ray source 3fgl j2212.5+0703. *Physical Review D*, 94(12), December 2016.
- [5] K. Belotsky, A. Kirillov, and M. Khlopov. Gamma-ray evidence for dark matter clumps. *Gravitation and Cosmology*, 20(1):47–54, January 2014.
- [6] V S Berezinsky, V I Dokuchaev, and Yu N Eroshenko. Small-scale clumps of dark matter. *Physics-Uspekhi*, 57(1):1–36, January 2014.
- [7] R. C. Hartman et al. The third egret catalog of high-energy gamma-ray sources. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 123(1):79, jul 1999.
- [8] J. Ballet et al. Fermi large area telescope fourth source catalog data release 4 (4fgl-dr4), 2024.
- [9] J.-M. Casandjian and I. A. Grenier. A revised catalogue of egret γ -ray sources. *Astronomy & Astrophysics*, 489(2):849–883, July 2008.
- [10] K.M. Belotsky, A.V. Berkov, A.A. Kirillov, and S.G. Rubin. Clusters of black holes as point-like gamma-ray sources. *Astroparticle Physics*, 35(1):28–32, August 2011.