

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

УДК 539.121.667

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**Смещение неидентифицированных источников - излучения в результатах наблюдений экспериментов EGRET и FERMI-LAT, являющихся кандидатами на сгустки скрытой массы находящимися в субгало**

Научный руководитель

к.ф.-м.н., доцент

\_\_\_\_\_ А. А. Кириллов

Студент

\_\_\_\_\_ П. А. Бахтин

Москва 2020

# Содержание

Введение	2
Формулирование гипотезы, предполагаемой для наблюдаемых данных	3
Ассоциирование объектов, наблюдаемых в разных экспериментах	6
Заключительный комментарий	9
Список используемых источников	10

# Введение

Поиски Скрытой массы исторически ведутся уже достаточно существенное время, как и наблюдение за небом в широком спектральном диапазоне. Была теоретически построена целая серия моделей скрытой массы, в которых должны возникать объекты, имеющие достаточно небольшой радиус и значимую интенсивность в  $\gamma$ -диапазоне энергий, которые должны быть наблюдаемы в некотором количестве для любой из моделей ещё в эксперименте *EGRET*, а затем и в эксперименте *FERMI – LAT*, а также присутствовать в субгало галактики.

Чтобы ассоциировать наблюдаемый источник и предполагаемый объект, необходимо наложить на него ограничения, которые было бы возможно наблюдать в экспериментальных данных. В случае  $\gamma$ -источников, наблюдаемых *EGRET* и *FERMI – LAT*, таковыми могут быть лишь 3 величины: спектральный индекс (Характеристика спектра), распределение кандидатов в объекты и смещение кандидатов в объекты за время, прошедшее с момента наблюдения источников для каталогов *EGR* и *3FGL*.

Именно последний параметр наиболее удобен для того, чтобы отбирать кандидаты в источники. Предполагается построить гипотетическую диаграмму плотностей вероятностей смещения источников на звёздном небе для источников-кандидатов, затем найти неидентифицированные источники, которые с вероятностью больше  $3\sigma$  будут соответствовать этой гипотезе. Таким способом будут получены источники-кандидаты для дальнейшей проверки их по другим параметрам: характеру спектра, пространственному распределению.

# Формулирование гипотезы, предполагаемой для наблюдаемых данных

При рассмотрении небольшого участка небесной сферы, на который может сместиться сгусток (Не более  $5^\circ$ ), будем считать, что мы наблюдаем лишь проекцию этого распределения на плоскость, нормальную к направлению наблюдения. Тогда получаемое распределение скоростей в этой плоскости в приближении, что мы наблюдаем из точки, примерно совпадающей с центром галактики будет считаться как проекция распределения на эту плоскость, и будет выглядеть аналогичным образом:

$$\rho(v) = \left(\frac{2 \cdot v}{v_{srkv}^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-v^2}{v_{srkv}^2}\right) \cdot \left(1 - \frac{v^2}{v_{srkv}^2}\right) \quad (1)$$

Где

$$v_{srkv} = \sqrt{\frac{G \cdot M_g}{R}} \quad (2)$$

Будем считать время значимого изменения скорости объекта много меньше времени наблюдения за ним. В этом случае, учитывая время наблюдения  $t = 19$  лет, несложно строится функция распределения вероятностей смещения по плоскому радиус-вектору - она попросту совпадает со скоростью, которая произведёт смещение на этот радиус-вектор:

$$\vec{r} = \vec{V} \cdot t \quad (3)$$

$$\rho(r) = \left(\frac{2 \cdot r}{v_{srkv}^2 \cdot t^2}\right) \cdot \exp\left(\frac{-r^2}{v_{srkv}^2 \cdot t^2}\right) \cdot \left(1 - \frac{r^2}{v_{srkv}^2 \cdot t^2}\right) \quad (4)$$

В силу изотропности, функция распределения будет иметь вид концентрических окружностей. Однако, мы наблюдаем не абсолютное смещение, а угловое, которое связано также с распределением по величине ра-

диального удаления от нас  $R$ . Здесь следует заметить, что распределение скоростей взято такое, как будто для сгустков нет взаимодействия даже гравитационного с прочей массой, т.е. это можно назвать в лучшем случае нулевым приближением. Соответственно, в этом случае, совершенно естественно считать, что и по координате искомые объекты распределены равномерно, то есть:

$$\rho(R) = \frac{4 \cdot \pi R^2}{V_{det}} \quad (5)$$

Где

$$V_{det} = \frac{4 \cdot \pi R_{max}^3}{3} \quad (6)$$

а  $R_{max}$  выберем соответствующим модели NFW

$$R_{max} = 60 \text{ ПК} \quad (7)$$

Далее, следует заметить, что искать мы будем функцию плотности распределения вероятности по величине

$$\delta = \frac{r}{R} \quad (8)$$

Согласно определению плотности вероятности и выражению сверху, можно записать следующее выражение для вычисления этой плотности вероятности

$$\rho(\delta) = \int_0^{R_{max}} \rho(\delta \cdot R) \cdot \rho(R) \cdot dR \quad (9)$$

Вычислим это выражение и получим функцию распределения

$$\rho(\delta) = \frac{\delta \cdot R_{max}^3}{G \cdot M_g \cdot t^2} \quad (10)$$

Отсюда остаётся получить первое ограничение - величину максимального углового смещения, заодно дающую область поиска для объекта:

$$\delta_{max} = 0.35^\circ \quad (11)$$

$$F(\delta) = \frac{\delta^2 \cdot R_{max}^3}{2 \cdot G \cdot M_g \cdot t^2} \quad (12)$$

# Ассоциирование объектов, наблюдаемых в разных экспериментах

Эта часть задачи состоит из проверки для предполагаемого распределения меры соответствия экспериментальным данным о смещении точечных источников  $\gamma$ -излучения. Карты источников в самих каталогах выглядят следующим образом:

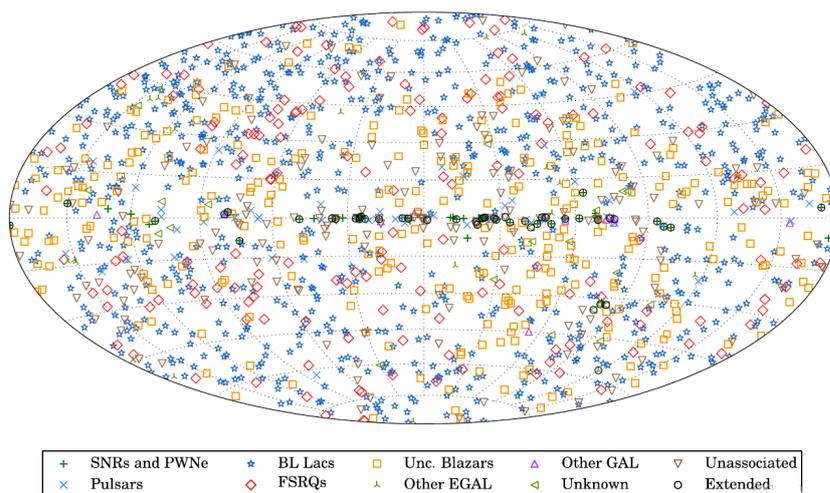


Рисунок 1 — Карта источников в каталоге *3FGL*[1]

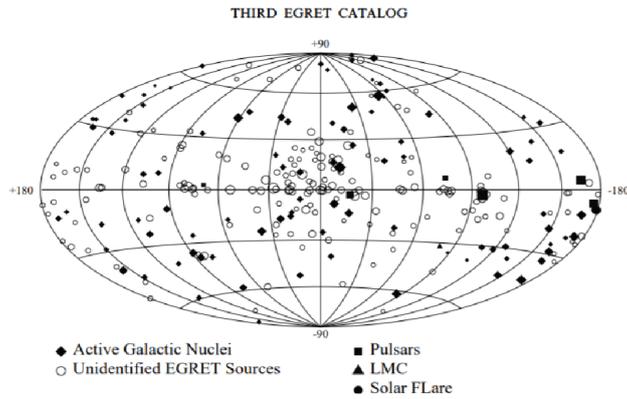


Рисунок 2 — Карта источников в каталоге *EGR*[2]

Несложно заметить, что опорными данными, которым будут иска́ться соответствия, являются результаты эксперимента *EGRET*, и иска́ть их следует в *4FGL* каталоге. Коллаборация Ферми подготовила для пользователей своих данных способ навигации, позволяющий задать области поиска в экспериментальных данных для параметров источника. Были избраны 30 источников, покрывающих изотропную часть распределения по звёздному небу в области ( $0^\circ : 90^\circ$ ). Было проведено сравнение, в пределах предполагаемого распределения обнаружено 2 источника, вне его пределов - ещё 1. Данный результат выглядит следующим образом:

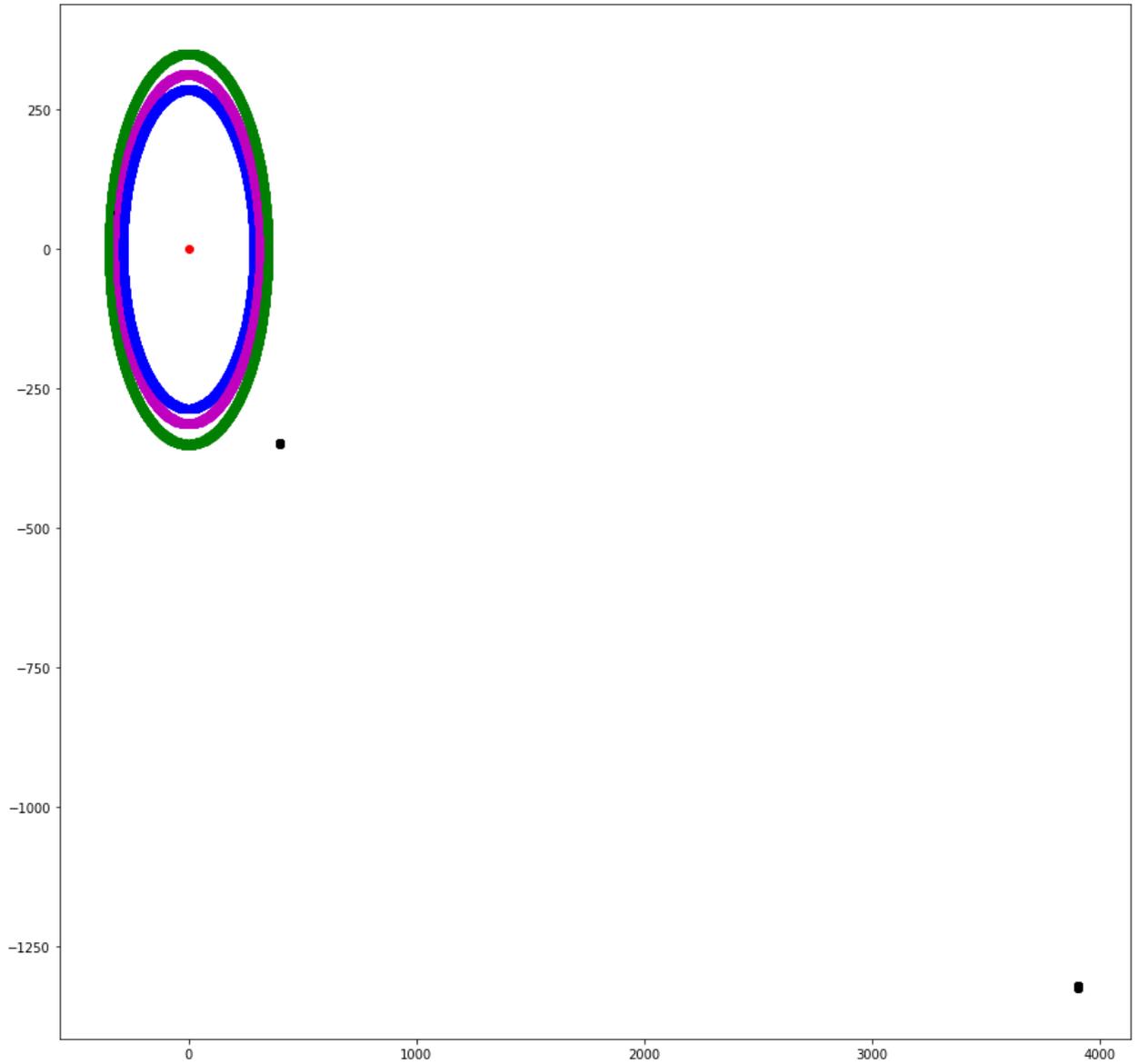


Рисунок 3 — Функция распределения вероятностей смещения источников и примеры обнаруженных источников. Синяя линия -  $1\sigma$  вероятность, фиолетовая -  $2\sigma$ , зелёная -  $3\sigma$ . Красная - точка начальных координат, чёрные - точки источников 4FGL J0214.9-37226, 4FGL J0406.2+0639, 4FGL J0509.2+5550.

# Заключительный комментарий

Анализ работ, вышедших на основе данных экспериментов EGRET и FERMI-LAT показывает, что проверка аналогичной гипотезы о скрытой массе осуществлялась, также был недавно выпущен каталог *EGR*, как повторный анализ данных, на основе которых был составлен предыдущий каталог *ZEG*. Следует отметить, что порядок количества находимых во всех случаях  $\gamma$ -источников, которые ассоциируют со сгустками ТМ близок, т.е. дальнейшее развитие и уточнение гипотетического распределения имеет смысл. Также следует исключить простое и удобное распределение по радиальной координате:

$$\rho(R) = \frac{4 \cdot \pi R^2}{V_{det}} \quad (13)$$

Также следует добавить внутрь Максвелловской функции распределения скоростей величину:

$$v_{srkv}^2 = \frac{G \cdot M_g}{R} + V_{ea}^2 \quad (14)$$

То есть учесть собственное движение земли всего одной операцией. Что касается радиальных профилей плотности, то здесь потребуется перебирать, то есть может найтись объясняющий имеющееся распределение источников профиль плотности, который даст ограничение уже на само распределение CDM в галактике. Тем самым, можно дважды проверить одну и ту же величину исходя из наблюдаемых и теоритических данных, пусть и косвенно.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Collaboration F.* The ALICE experiment at the CERN LHC // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 2020. — Vol. 247, issue 1.
2. *Collaboration E.* The Third EGRET Catalog of High-Energy Gamma-Ray Sources // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 1999. — Vol. 123, issue 1. — P. 79–202.