

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

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
**ПЕРВИЧНЫЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ КАК  
ИСТОЧНИКИ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ**

Научный руководитель

доцент кафедры №40, к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ А.А. Кириллов

Студент

\_\_\_\_\_ Е. В. Васильева

Москва 2025

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Диффузный спектр энергии фотонов от кластеров ПЧД</b>	<b>13</b>
1.1 Ограничение параметров модели из наблюдательных данных Fermi-LAT . . . . .	16
1.2 Ограничение параметра плотности $\Omega$ . . . . .	16
<b>2 Сравнение с наблюдательными данными</b>	<b>17</b>
2.1 Спектр энергии . . . . .	17
2.2 Пространство параметров $N_{cl}$ и $M_{min}$ . . . . .	18
<b>3 Заключение</b>	<b>21</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>23</b>

# ВВЕДЕНИЕ

Общепринятая космологическая модель, также называемая моделью Согласия (Concordance Model) или  $\Lambda$ CDM, говорит о том, что Вселенная состоит из 5% барионной материи,  $\sim 25\%$  холодной темной материи (Cold Dark Matter) и  $\sim 70\%$  темной энергии, также называемой энергией вакуума ( $\Lambda$ ) [1]. Состав барионов хорошо известен как по содержанию элементов, образовавшихся в результате первичного нуклеосинтеза ( $\sim 100$  секунд после Большого взрыва), так и по измерениям анизотропии космического микроволнового фона [2]. Но как темная материя, так и темная энергия выходят за рамки Стандартной Модели физики частиц [3]. Однако их существование во Вселенной подтверждается полученными наблюдательными данными.

Наблюдательные свидетельства существования скрытой массы:

- **Кривые вращения галактик.** Скорости объектов (газа и звезд) вращающихся вокруг центров галактик не уменьшаются в зависимости от расстояния до галактических центров, а остаются постоянными вплоть до очень больших радиусов. Аналогичные наблюдения плоских кривых вращения были обнаружены для всех изученных галактик, включая Млечный Путь. Самое простое объяснение заключается в том, что галактики содержат гораздо больше массы, чем можно объяснить наличием ярких звездных объектов в галактических дисках, и эта масса обеспечивает ускорение орбит. Чтобы объяснить полученные данные, галактики должны иметь огромные темные гало, состоящие из темной материи [2].
- **Гравитационное линзирование.** Искривление пространства-времени вблизи любой гравитирующей массы (включая темную материю) отклоняет проходящие лучи света, что заметно смещает и искажает изображения галактик на заднем плане [4].

Существует ряд теоретических моделей, объясняющих природу скрытой массы и механизмы формирования регистрируемого космического излучения. Одним из наиболее обсуждаемых сценариев является аннигиляция или распад частиц тёмной материи, сопровождающиеся рождением частиц стандартной модели. В частности, в реакциях вида  $DM + DM \rightarrow e^+ + e^- + \gamma$  и  $DM \rightarrow e^+ + e^- + \gamma$  [5] возникают как  $\gamma$ -кванты, так и электрон-позитронные пары. Подобные процессы могут вносить вклад, например, в наблюдаемый избыток позитронов в диапазоне энергий от 25 до 300 ГэВ, зарегистрированный экспериментом AMS-02 [6].

Форма энергетического спектра  $\gamma$ -излучения существенно зависит от конкретного канала аннигиляции или распада тёмной материи и её массы. Например, на рисунке 1 показано сравнение  $\gamma$ -спектра, ожидаемого при аннигиляции тяжелых нейтрино с массой порядка 47 ГэВ, с измеренным спектром одного из неидентифицированных  $\gamma$ -источников. Спектр данного источника аппроксимируется степенным законом со спектральным индексом  $\Gamma \sim 2$  [7]. Распределение неидентифицированных  $\gamma$ -источников с аналогичными значениями спектрального индекса приведено на рисунке 4. Количество этих источников (более 50% от общего числа неидентифицированных источников) подтверждают данные коллаборации Fermi-LAT 2. Для каталога 4FGL средний спектральный индекс источников  $\Gamma_{4FGL} = 2.2 \pm 0.3$  [8].

Однако, среди неидентифицированных источников все еще остаются источники, чей спектральный индекс  $\Gamma > 2 \pm 3\sigma$ , что говорит о специфической природе таких источников.

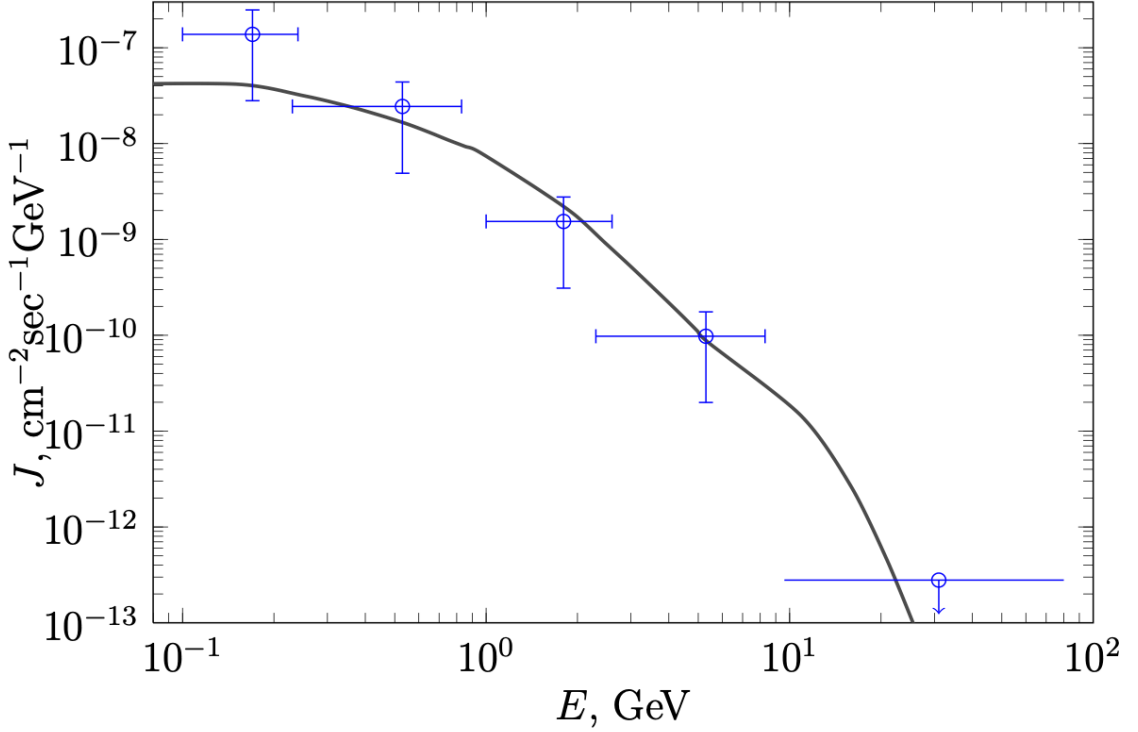


Рисунок 1 — Ожидаемый спектр от  $\nu_4\bar{\nu}_4$ -аннигиляции в сравнении с наблюдаемым спектром от неидентифицированного источника 2FGL J1653.6-0159 [9]

Еще одним возможным сценарием, который объясняет природу СМ, являются первичные черные дыры (ПЧД) или их кластеры. Черные дыры рождают и излучают тепловой спектр частиц с температурой  $T \propto 1/M$  [10]. То есть, по мере уменьшения массы увеличивается температура и, соответственно, расширяется спектр испускаемых частиц:

- $10^{15} \text{ г} < M < 10^{17} \text{ г}$  — в том числе испускаются электроны, но не испускаются мюоны;
- $10^{14} \text{ г} < M < 10^{15} \text{ г}$  — в том числе испускает мюоны, которые распадаются на электроны и нейтрино;
- $M \lesssim 5 \times 10^{14} \text{ г}$  — начинают испускаться пионы, а затем, при дальнейшем уменьшении массы, и другие адроны [11].

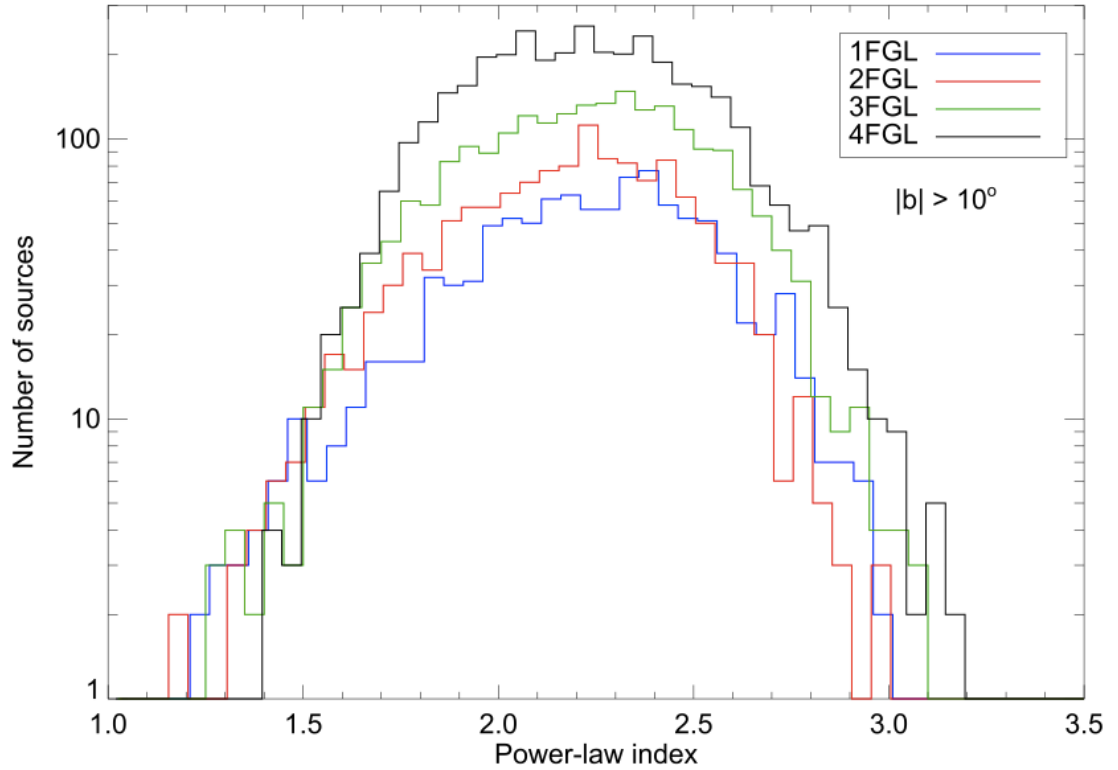


Рисунок 2 — Распределения спектрального индекса для источников в каталогах 1FGL (синий), 2FGL (красный), 3FGL (зеленый) и 4FGL (черный) [8]

Спектральный индекс их излучения в диапазоне больше 100 МэВ  $\Gamma = 3$  [12] (спектр энергии представлен на рисунке 3). Распределение неидентифицированных гамма-источников с аналогичными значениями спектрального индекса приведено на рисунке 5.

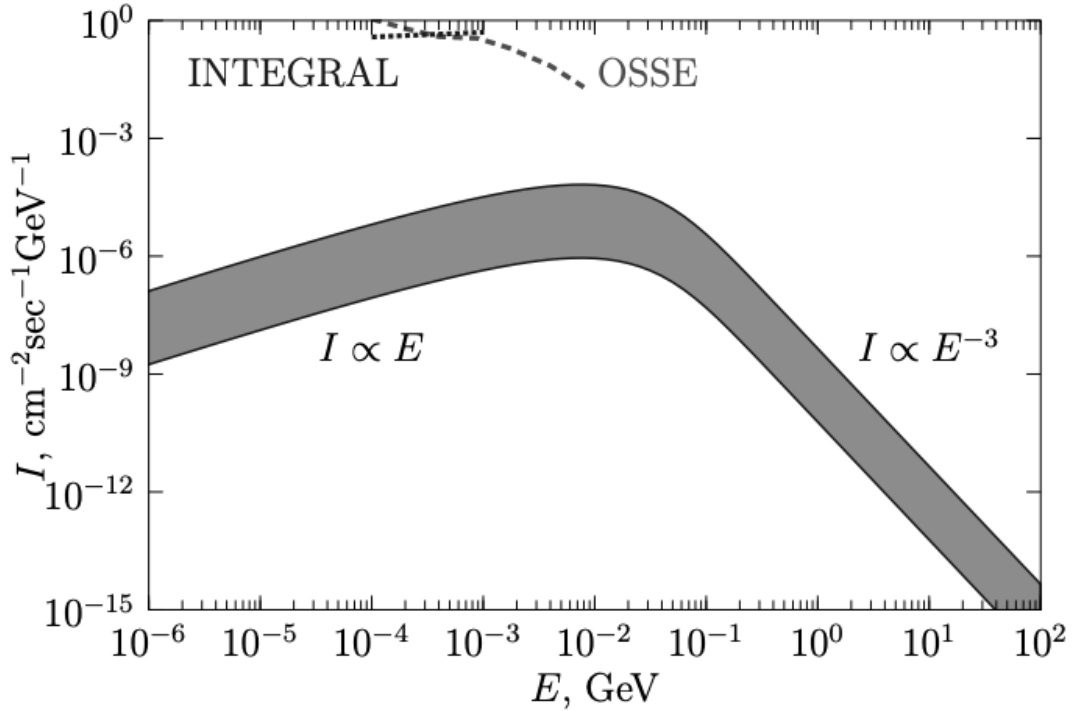


Рисунок 3 — Ожидаемый спектр фотонов от кластера ПЧД [9]

За последние годы было предложено множество сценариев ранней Вселенной, в которых формируются первичные черные дыры. Такие механизмы включают в себя, например, создание ПЧД из начальных неоднородностей плотности [13]. До наших дней сохранились только черные дыры с массой более  $M = 4.6 \times 10^{14}$  г на момент их рождения. Черные дыры с меньшей начальной массой полностью испарились в результате излучения Хокинга [14].

Так, существование или несуществование ПЧД и их кластеров должно дать важную информацию о различных теориях ранней Вселенной. Однако, так как ПЧД не были обнаружены в результате прямых наблюдений, это может означать, что их излучение слишком слабое или они находятся достаточно далеко, чтобы их невозможно было идентифицировать как точечные источники — что означает их вероятный вклад в диффузный гамма-фон.

За последние десятилетия исследования космических источников гамма-излучения (ГИ) продвинулись далеко вперед. Например, если второй ката-

лог COS-B (1981 г.) включал в себя 25 источников, уже в третьем каталоге EGRET (1999 г.) их было 271 [15]. Самый же актуальный на данный момент каталог 4FGL-DR4 (2024 г.), опубликованный коллаборацией Fermi-LAT, содержит 7194 источников [16]. На рисунке 6 можно наглядно увидеть разницу между каталогами SAS-2 (1972 г.), COS-B, EGRET и Fermi-LAT.

Доминирующим источником фотонов в гамма-диапазоне является диффузное Галактическое излучение, при этом большинство диффузных фотонов генерируется в плоскости Галактики. Наблюдаемое диффузное гамма-излучение состоит из нескольких компонентов:

- Вклад от неразрешённых и слабых источников гамма-излучения,
- Настоящее Галактическое диффузное излучение, возникающее в межзвёздной среде,
- Внегалактическое излучение, природа которого пока не установлена.

Настоящее диффузное Галактическое излучение возникает при взаимодействии энергичных частиц КЛ, в основном  $p$ ,  $\alpha$  и  $e^\pm$ , с межзвёздным газом – через распад нейтральных пионов  $\pi^0$ .

Внегалактическое излучение представляет собой суперпозицию всех источников  $\gamma$ -излучения, как отдельных, так и рассеянных, от края Млечного Пути до края наблюдаемой Вселенной. Гарантированный вклад вносят известные классы внегалактических источников  $\gamma$ -излучения, включая активные ядра галактик, галактики с активным звездообразованием и различные  $\gamma$ -всплески [17].

Чувствительность к точечным источникам у телескопа Fermi-LAT ограничена значением  $6 \times 10^{-9} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , исходя из которого, зная спектр излучения ПЧД, возможно получить максимальное расстояние, на котором ПЧД видна, как точечный источник [12]:

$$R_m = \left( \frac{1}{4\pi} \frac{\dot{N}}{F_{min}} \right)^{1/2} = 3 \times 10^3 \text{ пк}, \quad (1)$$

где  $F_{min} = 6 \times 10^{-9} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  - чувствительность к точечным источникам телескопа Fermi-LAT,  $\dot{N} = 6.6 \times 10^{36} \text{ с}^{-1}$  - скорость испускания фотонов кластером ПЧД.

Это значение сильно меньше радиуса темного гало Галактики, что позволяет им пренебречь в математических расчетах.

Если произвести простую оценку — отнести все кластеры ПЧД на расстояние (1) — то окажется, что поток от них будет равен  $J_b = 10^{-4} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$ , что по порядку величины сходится с величиной диффузного гамма-фона [17].

**Целью** данной работы является расчет спектра энергии фотонов, излучаемых кластером первичных черных дыр, а также доказательство возможности постановки ограничений на параметры модели.

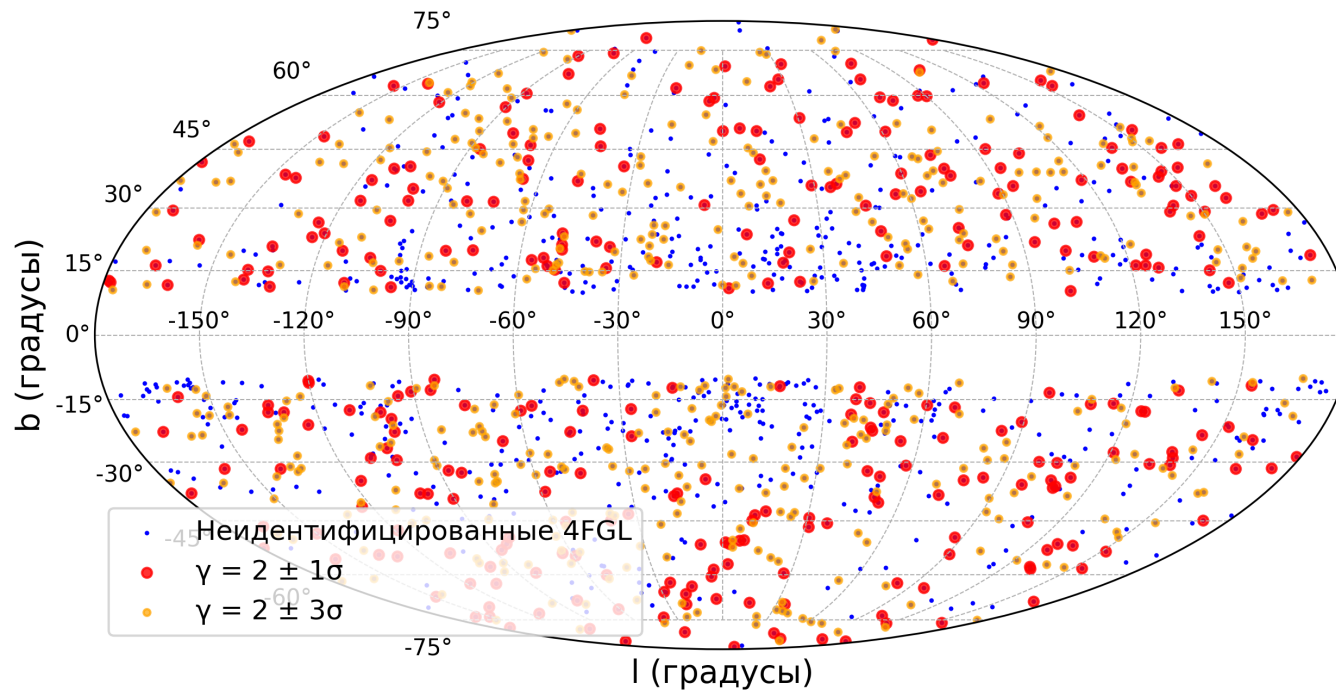


Рисунок 4 — Карта небесной сферы неидентифицированных источников гамма-излучения. Спектральный индекс  $\Gamma = 2$ . Общее число неидентифицированных источников в каталоге 4FGL-DR4: 1387. Число источников, имеющих спектральный индекс  $\Gamma = 2 \pm 1\sigma$ : 326. Число источников, имеющих спектральный индекс  $\Gamma = 2 \pm 3\sigma$ : 443

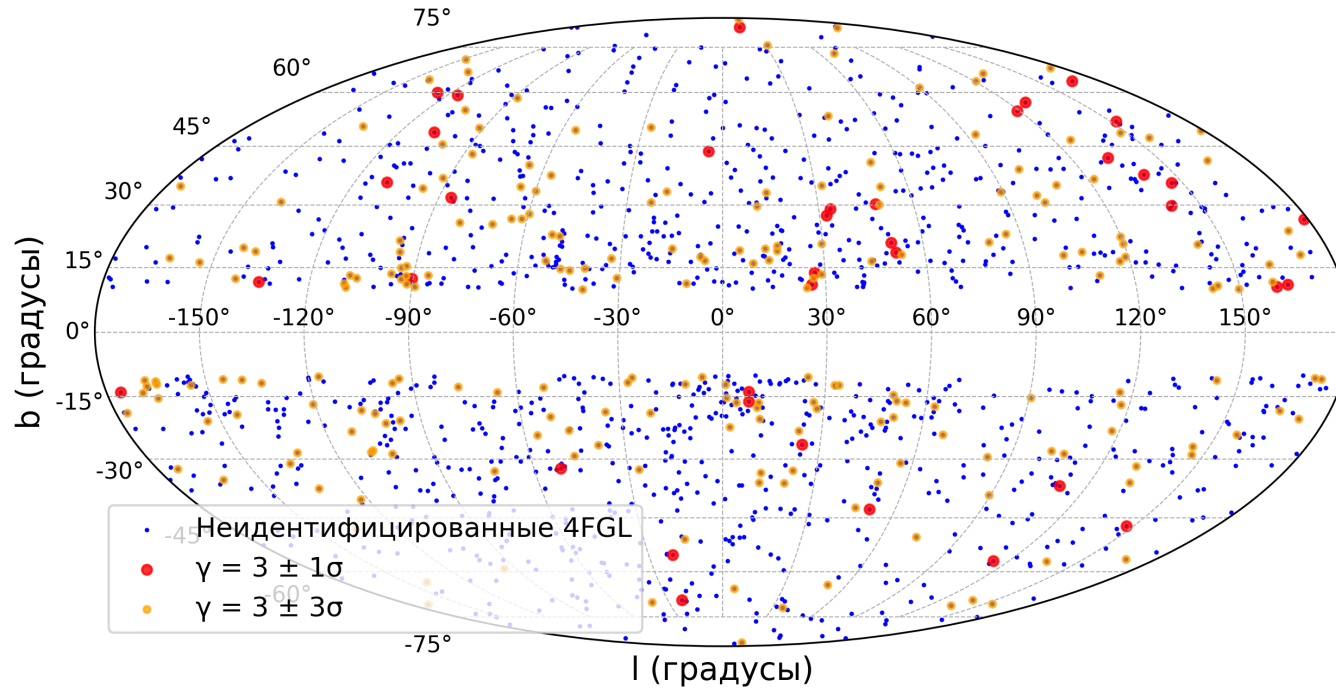


Рисунок 5 — Карта небесной сферы неидентифицированных источников гамма-излучения. Спектральный индекс  $\Gamma = 3$ . Общее число неидентифицированных источников в каталоге 4FGL-DR4: 1387. Число источников, имеющих спектральный индекс  $\Gamma = 3 \pm 1\sigma$ : 38. Число источников, имеющих спектральный индекс  $\Gamma = 2 \pm 3\sigma$ : 222

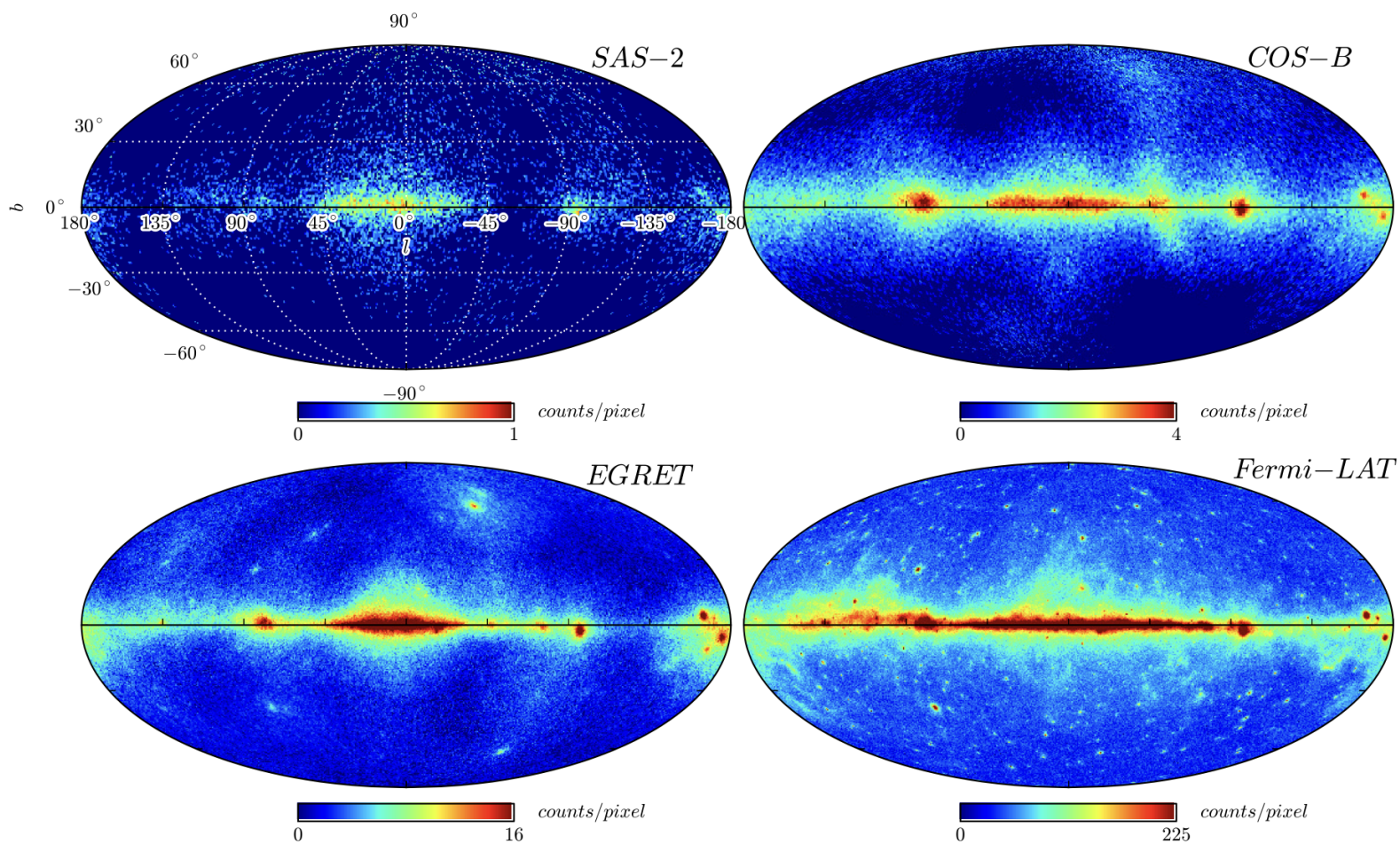


Рисунок 6 — Карты небесной сферы источников гамма-излучения, полученные SAS-2, COS-B, EGRET (энергии выше 50 МэВ) и Fermi-LAT (энергии выше 360 МэВ, 4 года наблюдений) [18]

# 1. ДИФФУЗНЫЙ СПЕКТР ЭНЕРГИИ ФОТОНОВ ОТ КЛАСТЕРОВ ПЧД

Спектр энергии фотонов, излучаемых кластером первичных черных дыр [12]:

$$I = \frac{1}{\Delta\Omega} \int \frac{d\dot{N}}{dE} \Big|_{cl} n_{cl} r^2 d\Omega dr = \frac{1}{4\pi} \int \frac{d\dot{N}}{dE} \Big|_{cl} n_{cl} dr \quad (2)$$

Где плотность кластеров в единице объема пространства:

$$n_{cl} = \frac{3}{4\pi} \frac{N_{cl}}{l_h^3} \quad (3)$$

Для одной первичной черной дыры известны: интенсивность излучения фотонов первичной черной дырой (4), температура (5), а также площадь, занимаемая первичной черной дырой (6).

$$\frac{d\dot{N}}{dE} = \frac{\sigma}{2\pi^2} \frac{E^2}{\exp(\frac{E}{T}) - 1}, \quad (4)$$

$$T = \frac{1}{8\pi} \frac{m_{pl}^2}{M} = 21 \text{ МэВ} \frac{M_*}{M}, \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{27\pi M^2}{m_{pl}^4} \quad (6)$$

Известными считаем константы: радиус гало Галактики  $l_h \sim 100 \times 10^3 \text{ пк}$ , масса Планка  $m_{pl} \sim 10^{22} \text{ МэВ} \sim 2 \times 10^{-5} \text{ г}$ .

Подставляя выражения для площади (6) в выражение для интенсивности (4), получим спектр излучения одной ПЧД:

$$\frac{d\dot{N}}{dE} = \frac{\sigma}{2\pi^2} \frac{E^2}{\exp(\frac{E}{T}) - 1} = \frac{27M^2}{2\pi m_{pl}^4} \frac{E^2}{\exp(\frac{E}{T}) - 1} \quad (7)$$

Полученное выражение не имеет размерности. Для ее восстановления введем размерный множитель:

$$\left(\frac{c}{\hbar c}\right) = \left(\frac{3 \times 10^8 \text{М/с}}{200 \text{МэВ фМ}}\right) = 1.5 \times 10^{21} \text{МэВ}^{-1} \text{с}^{-1}.$$

Учитывая также, что  $\exp(E/T) \ll 1$ , получим:

$$\frac{d\dot{N}}{dE} = \frac{27M^2}{2\pi m_{pl}^4} \frac{E^2}{\exp(E/T)} \left(\frac{c}{\hbar c}\right) \quad (8)$$

Интенсивность (7) является интенсивностью излучения фотонов одной ПЧД. Для того, чтобы получить интенсивность излучения фотонов кластером ПЧД, требуемое для вычисления спектра (2), необходимо интегрировать выражение для интенсивности по массе:

$$\left.\frac{d\dot{N}}{dE}\right|_{cl} = \int_{M_{min}}^{M_{max}} \frac{d\dot{N}}{dE} \frac{dN}{dM} dM \quad (9)$$

Максимальная масса ПЧД (верхний предел интегрирования) не ограничена, что позволяет сделать переход  $M_{max} \rightarrow \infty$ . Предположим, что первичные черные дыры в составе кластера имеют следующее распределение масс:

$$\frac{dN}{dM} = \frac{N_{bh}}{M_*} \left(\frac{M_*}{M_{in}}\right)^\alpha, \quad (10)$$

где  $M_* = 10^{15} \text{Г}$ .

Известное соотношения между начальным и текущим значением массы ПЧД [12]:

$$M_{in} = (M^3 + M_*^3)^{1/3}, \quad (11)$$

Тогда массовое распределение 10 можно представить в виде:

$$\frac{dN}{dM} = \frac{dM_{bh}}{dM} f_{in}(M_{in}(M)) = \frac{N_{in}}{M_*} \frac{(M/M_*)^2}{\left(1 + (M/M_*)^3\right)^{2/3 + \alpha/3}}, \quad (12)$$

Тогда массовое распределение 10 можно представить в виде:

$$\frac{dN}{dM} = \frac{N_{bh}}{M_*} \frac{(M/M_*)^2}{\left(1 + (M/M_*)^3\right)^{2/3+\alpha/3}}, \quad (13)$$

Тогда выражение(9) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\dot{N}}{dE} \right|_{cl} &= \int_{M_{min}}^{\infty} \frac{d\dot{N}}{dE} \frac{dN}{dM} dM = \\ &= \int_{M_{min}}^{\infty} \frac{27M^2}{2\pi m_{pl}^4} \frac{E^2}{\exp(\frac{E}{T})} \left(\frac{c}{\hbar c}\right) \frac{N_{in}}{M_*} \frac{(M/M_*)^2}{\left(1 + (M/M_*)^3\right)^{2/3+\alpha/3}} dM = \\ &= \frac{27M_*^2 E^2}{2\pi m_{pl}^4} \frac{N_{in}}{M_*} \left(\frac{c}{\hbar c}\right) \int_{M_{min}}^{\infty} \frac{x^2 dx}{\exp\left(\frac{xE}{21 \text{ МэВ}}\right) (1+x^3)^{2/3+\alpha/3}}, \quad (14) \end{aligned}$$

где  $x = M/M_*$  и  $\alpha$  - некоторая константа.

Окончательно выражение для спектра энергии фотонов будет иметь вид:

$$I = \frac{3}{(4\pi)^2} \frac{N_{cl}}{l_h^2} \frac{27M_*^2 E^2}{2\pi m_{pl}^4} \frac{N_{in}}{M_*} \left(\frac{c}{\hbar c}\right) \int_{M_{min}}^{\infty} \frac{x^2 dx}{\exp\left(\frac{xE}{21 \text{ МэВ}}\right) (1+x^3)^{2/3+\alpha/3}} \quad (15)$$

Таким образом, в данной модели возможно варьировать следующие параметры:

- $N_{cl}$  — число кластеров на одну галактику;
- $M_{min}$  — минимальная масса ПЧД;
- $N_{bh}$  — полное число чёрных дыр в одном кластере;
- $\alpha$  — параметр, определяющий форму массового спектра.

## 1.1 Ограничение параметров модели из наблюдательных данных Fermi-LAT

Первичные чёрные дыры малой массы ( $M \lesssim 10^{15}$  г) испаряются за счёт излучения Хокинга, внося вклад в диффузный гамма-фон. Спектр излучения одной чёрной дыры массы  $M$  в приближении геометрической оптики имеет вид:

$$\frac{d\dot{N}}{dE} \propto \frac{E^2}{\exp(E/T_H) \pm 1}, \quad T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_B}, \quad (16)$$

где  $T_H$  — температура Хокинга.

Условие непротиворечия модели данным *Fermi-LAT*:

$$I_{model}(E) \leq I_{Fermi}(E) \quad \forall E \in [10 \text{ МэВ}, 1 \text{ ГэВ}], \quad (17)$$

где  $I_{Fermi}(E)$  — наблюдательные данные по диффузному гамма-фону.

## 1.2 Ограничение параметра плотности $\Omega$

Плотность вещества, заключённого в первичных чёрных дырах, не может превышать наблюдаемую плотность тёмной материи  $\Omega_{CDM} \approx 0.27$ . Для модели кластеров:

$$\Omega_{bh} = \frac{N_g N_{cl} \bar{M}(M_{min})}{\rho_{cr} V} = \frac{N_{cl} \bar{M}(M_{min})}{M_{halo}} \leq \Omega_{CDM}, \quad (18)$$

Где  $M_{halo} \propto 12M_\odot$  и  $\bar{M}$  — полная масса кластера:

$$\bar{M}(M_{min}) = \int_{M_{min}}^{10^{33}} M \frac{dN}{dM} dM \quad (19)$$

Условие  $\Omega_{bh} \leq \Omega_{CDM}$  задаёт верхнюю границу на  $N_{cl}$ :

$$N_{cl} \leq \frac{\Omega_{CDM} \cdot M_{halo}}{\bar{M}(M_{min})}. \quad (20)$$

## 2. СРАВНЕНИЕ С НАБЛЮДАТЕЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

### 2.1 Спектр энергии

На рисунке 7 показано сравнение полученного спектра энергии фотонов (15) и данных коллабораций EGRET и FERMI-LAT.

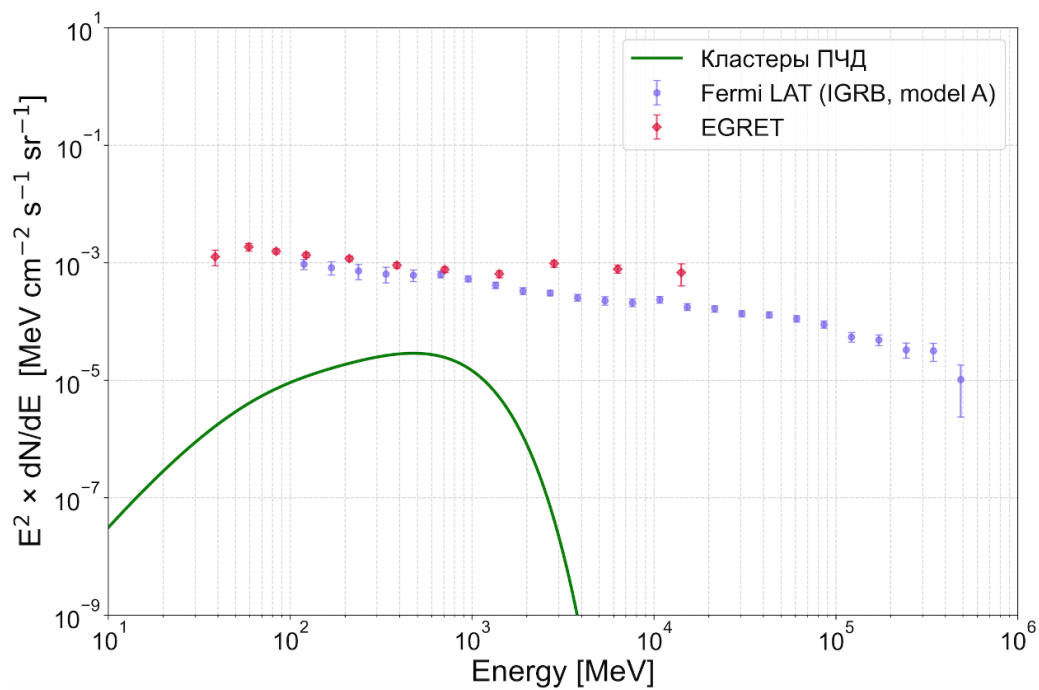


Рисунок 7 — Спектр энергии фотонов, излучаемых кластером первичных черных дыр

Полученный спектр (15) лежит ниже экспериментальных данных, что говорит об отсутствии противоречия между ними. То есть, существует такая область параметров модели, которая не противоречит наблюдательным данным.

## 2.2 Пространство параметров $N_{cl}$ и $M_{min}$

На рис. 8 представлены результаты для  $\alpha = 1.5$ . В этом случае ограничение по плотности тёмной материи ( $\Omega_{CDM}$ ) является строгим: допустимое число кластеров не превышает  $N_{cl} \sim 10^4$ .

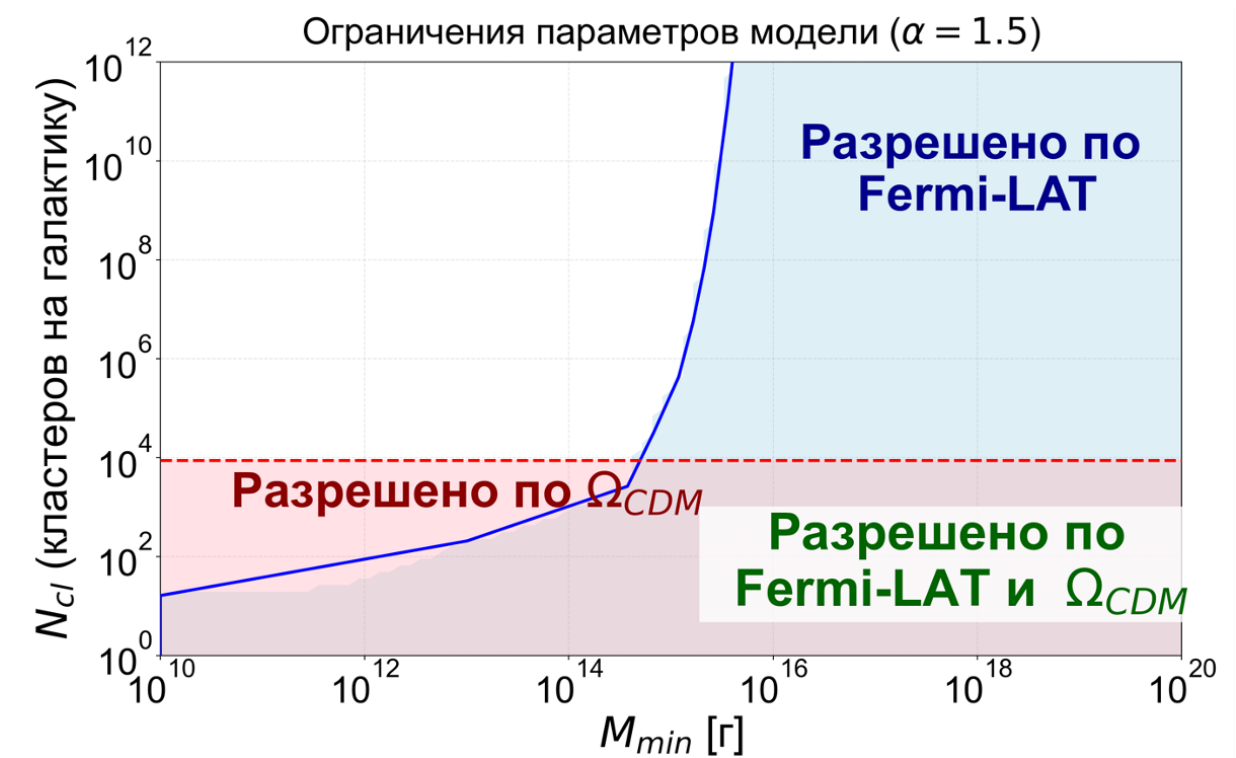


Рисунок 8 — Ограничения параметров модели при  $\alpha = 1.5$ . Синяя область: разрешено по Fermi-LAT. Красная пунктирная линия: предел по  $\Omega_{CDM}$ .

При переходе к  $\alpha = 2.0$  (рис. 9) массовый спектр становится более крутым, что позволяет системе содержать больше тяжёлых объектов без превышения наблюдаемой плотности тёмной материи. Верхняя граница по  $\Omega_{CDM}$  сдвигается в область  $N_{cl} \sim 10^{12}$ .

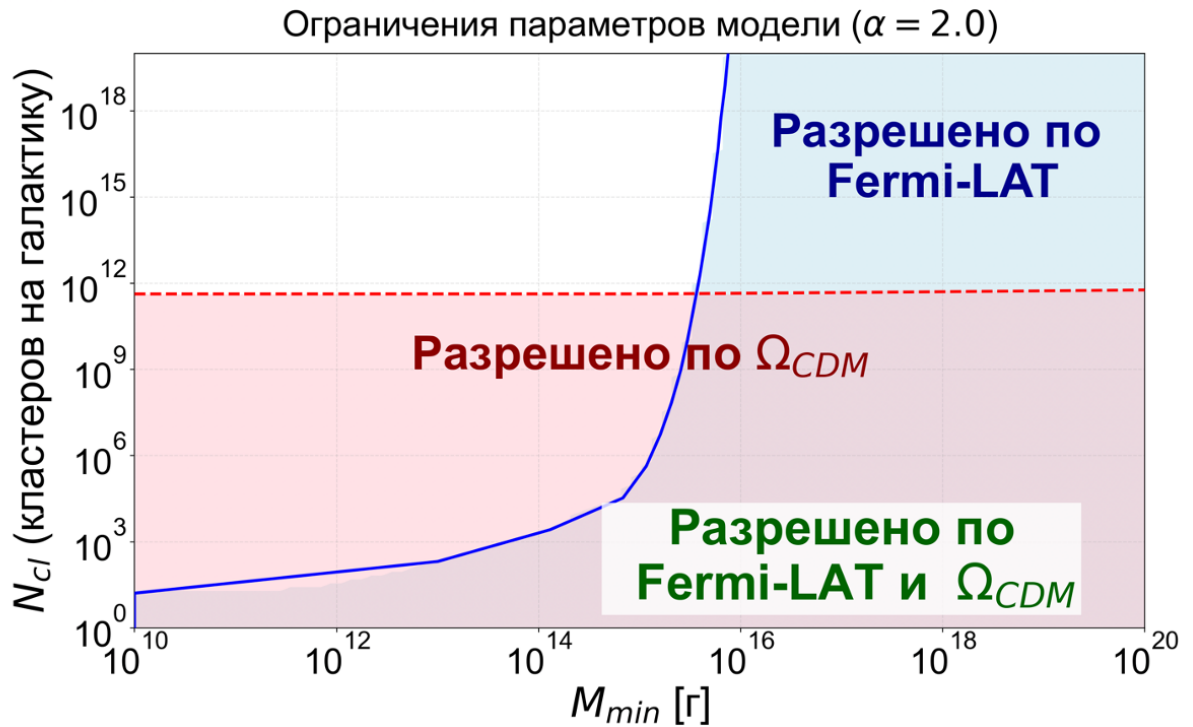


Рисунок 9 — Ограничения параметров модели при  $\alpha = 2.0$ . Наблюдается существенное расширение допустимой области по сравнению со случаем  $\alpha = 1.5$ .

Для значения  $\alpha = 2.5$  (рис. 10) космологическое ограничение ослабевает настолько, что в широком диапазоне масс доминирующим фактором становится ограничение по потоку гамма-излучения от телескопа Fermi-LAT.

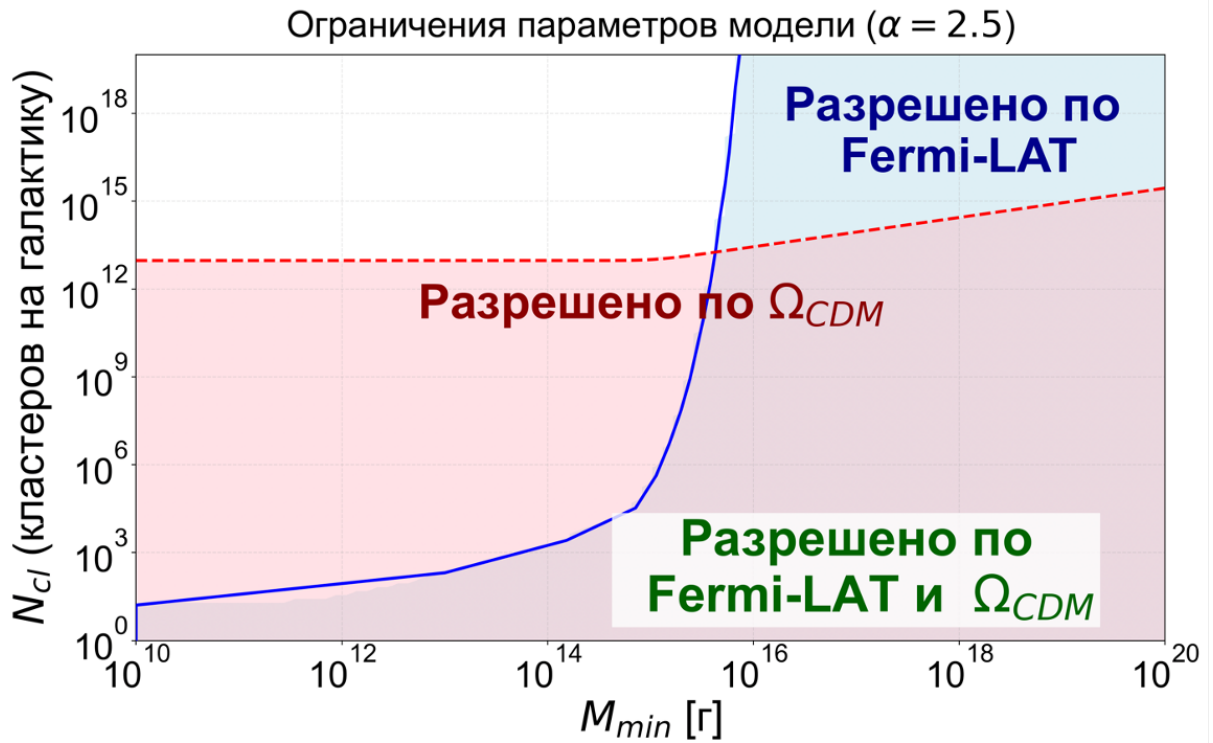


Рисунок 10 — Ограничения параметров модели при  $\alpha = 2.5$ . Предел по  $\Omega_{CDM}$  уходит в область высоких  $N_{cl}$ , и допустимая область определяется преимущественно данными Fermi-LAT.

Число чёрных дыр в одном кластере  $N_{bh}$  напрямую масштабирует общую светимость и массу кластера. На рис. 11 показано сравнение границ для трёх значений  $N_{bh}$  при фиксированном  $\alpha = 2.0$ .

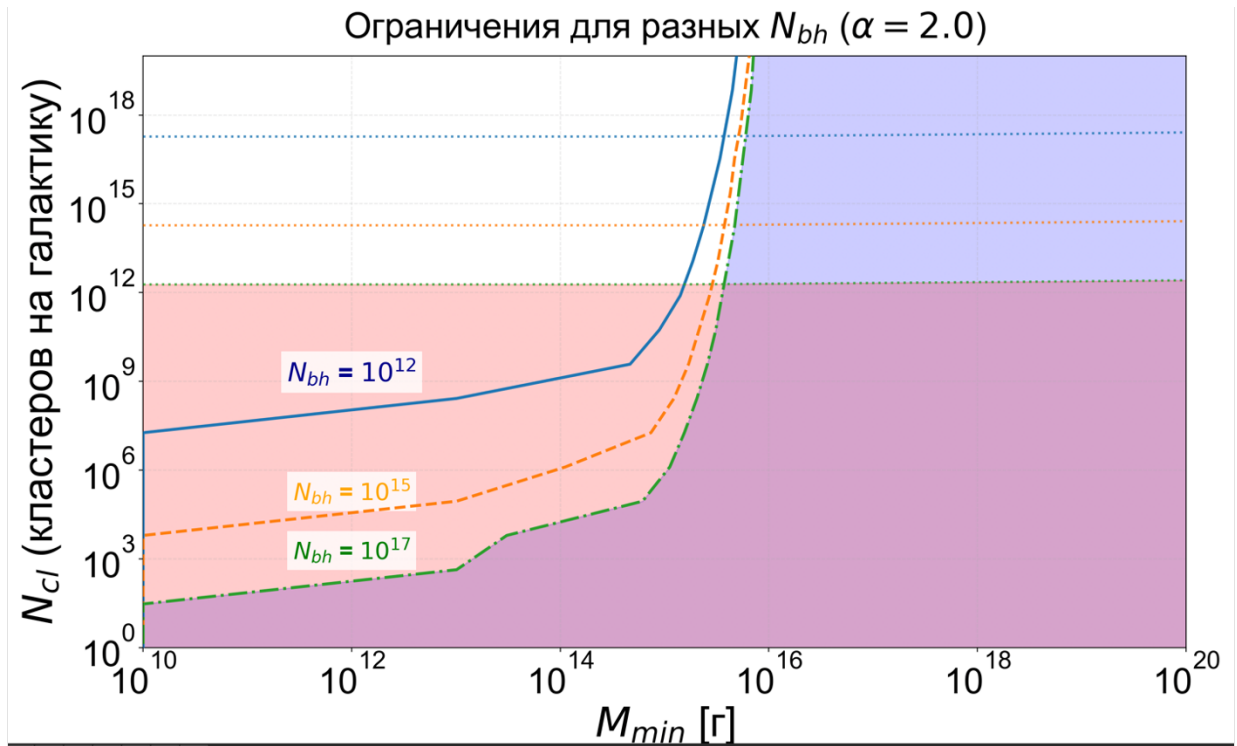


Рисунок 11 — Сравнение ограничений для разных значений  $N_{bh}$  при  $\alpha = 2.0$ . Синяя линия:  $N_{bh} = 10^{12}$ , оранжевая:  $N_{bh} = 10^{15}$ , зелёная:  $N_{bh} = 10^{17}$ . Увеличение  $N_{bh}$  приводит к сдвигу границы Fermi-LAT влево, уменьшая допустимое число кластеров  $N_{cl}$ .

Как видно из графика, с ростом  $N_{bh}$  от  $10^{12}$  до  $10^{17}$  допустимое количество кластеров  $N_{cl}$  уменьшается на несколько порядков, так как суммарный поток излучения Хокинга быстрее достигает предела чувствительности телескопа.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной научно-исследовательской работы было проведено комплексное изучение вклада кластеров первичных чёрных дыр в диффузный гамма-фон. Основная цель исследования заключалась в расчёте теоретического спектра энергии фотонов, излучаемых кластером ПЧД в результате

испарения Хокинга, и установлении ограничений на параметры модели на основе современных наблюдательных данных.

В ходе работы была разработана математическая модель, описывающая излучение кластера первичных чёрных дыр. Получено аналитическое выражение для дифференциального спектра энергии фотонов. Модель содержит четыре свободных параметра: число кластеров на галактику  $N_{cl}$ , минимальную массу ПЧД  $M_{min}$ , количество чёрных дыр в кластере  $N_{bh}$  и параметр формы массового спектра  $\alpha$ .

Проведено сравнение теоретического спектра с данными гамма-телескопов EGRET и Fermi-LAT. Показано, что предсказанный моделью спектр не противоречит наблюдательным данным в диапазоне энергий от 30 МэВ до 10 ГэВ при определённых значениях параметров, что подтверждает принципиальную возможность существования кластеров ПЧД как компонента тёмной материи.

Наиболее важным результатом работы стало получение ограничений на пространство параметров  $(N_{cl}, M_{min})$  из двух независимых условий:

1. Ограничение по потоку гамма-излучения: модельный поток не должен превышать наблюдаемый диффузный фон Fermi-LAT;
2. Космологическое ограничение: плотность вещества в ПЧД не должна превышать плотность тёмной материи  $\Omega_{bh} \leq \Omega_{CDM} \approx 0.27$ .

Исследована зависимость допустимой области параметров от спектрального индекса  $\alpha$ . Установлено, что при  $\alpha = 1.5$  доминирующим является ограничение по плотности ( $N_{cl} \lesssim 10^4$ ), тогда как при  $\alpha = 2.5$  основную роль играет ограничение Fermi-LAT. При  $\alpha = 2.0$  допустимое число кластеров достигает  $N_{cl} \sim 10^{12}$ .

Проанализировано влияние количества чёрных дыр в кластере  $N_{bh}$  на ограничения. Показано, что увеличение  $N_{bh}$  с  $10^{12}$  до  $10^{17}$  приводит к сдвигу

границы Fermi-LAT влево и уменьшению допустимого числа кластеров на несколько порядков, так как суммарная светимость кластера растёт.

Полученные результаты имеют важное значение для понимания природы неидентифицированных источников гамма-излучения и формирования диффузного гамма-фона. В частности, показано, что кластеры ПЧД с параметрами, попадающими в допустимую область, могут вносить существенный вклад в наблюдаемый фон, не противореча современным данным.

В перспективе планируется усовершенствовать модель, учтя возможность существования точечных источников. Это позволит наложить более строгие ограничения на параметры модели и оценить максимально возможный вклад кластеров ПЧД в тёмную материю Галактики.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Leauthaud A., Riess A.* Looking beyond lambda // Nature Astronomy. — 2025. — Aug. — Vol. 9, no. 8. — P. 1123–1128. — ISSN 2397-3366. — DOI: 10.1038/s41550-025-02627-2.
2. *Freese K.* Status of dark matter in the universe // International Journal of Modern Physics D. — 2017. — Mar. — Vol. 26, no. 06. — P. 1730012. — ISSN 1793-6594. — DOI: 10.1142/s0218271817300129.
3. Exploring the Quantum Universe: Pathways to Innovation and Discovery in Particle Physics / H. Murayama [et al.]. — 06/2023. — DOI: 10.2172/2368847.
4. *Massey R., Kitching T., Richard J.* The dark matter of gravitational lensing // Reports on Progress in Physics. — 2010. — July. — Vol. 73, no. 8. — P. 086901. — ISSN 1361-6633. — DOI: 10.1088/0034-4885/73/8/086901.
5. Extragalactic gamma-ray signal from dark matter annihilation: a power spectrum based computation / P. D. Serpico [et al.] // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters. — 2012. — Mar. — Vol. 421, no. 1. — P. L87–L91. — ISSN 1745-3933. — DOI: 10.1111/j.1745-3933.2011.01212.x.
6. Towards Understanding the Origin of Cosmic-Ray Positrons / M. Aguilar [et al.] // Physical Review Letters. — 2019. — Jan. — Vol. 122, no. 4. — ISSN 1079-7114. — DOI: 10.1103/physrevlett.122.041102.
7. DISCOVERY OF AN ULTRACOMPACT GAMMA-RAY MILLISECOND PULSAR BINARY CANDIDATE / A. K. H. Kong [et al.] // The Astrophysical Journal. — 2014. — Oct. — Vol. 794, no. 2. — P. L22. — ISSN 2041-8213. — DOI: 10.1088/2041-8205/794/2/122.

8. 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.
9. *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. — ISSN 1995-0721. — DOI: 10.1134/s0202289314010022.
10. *Hawking S. W.* Particle creation by black holes // Communications In Mathematical Physics. — 1975. — Aug. — Vol. 43, no. 3. — P. 199–220. — ISSN 1432-0916. — DOI: 10.1007/bf02345020.
11. Constraints on primordial black holes from the Galactic gamma-ray background / B. J. Carr [et al.] // Physical Review D. — 2016. — Aug. — Vol. 94, no. 4. — ISSN 2470-0029. — DOI: 10.1103/physrevd.94.044029.
12. Clusters of black holes as point-like gamma-ray sources / K. Belotsky [et al.] // Astroparticle Physics. — 2011. — Aug. — Vol. 35, no. 1. — P. 28–32. — ISSN 0927-6505. — DOI: 10.1016/j.astropartphys.2011.05.001.
13. *Hawking S.* Gravitationally Collapsed Objects of Very Low Mass // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1971. — Apr. — Vol. 152, no. 1. — P. 75–78. — ISSN 1365-2966. — DOI: 10.1093/mnras/152.1.75.
14. *MacGibbon J. H.* Quark- and gluon-jet emission from primordial black holes. II. The emission over the black-hole lifetime // Physical Review D. — 1991. — July. — Vol. 44, no. 2. — P. 376–392. — ISSN 0556-2821. — DOI: 10.1103/physrevd.44.376.
15. *Salvetti D.* Classifying Unidentified Gamma-ray Sources : PhD thesis / Salvetti David. — Pavia U., 2014. — arXiv: 1603.00231 [astro-ph.HE].

16. 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].
17. THE SPECTRUM OF ISOTROPIC DIFFUSE GAMMA-RAY EMISSION BETWEEN 100 MeV AND 820 GeV / M. Ackermann [et al.] // The Astrophysical Journal. — 2015. — Jan. — Vol. 799, no. 1. — P. 86. — ISSN 1538-4357. — DOI: 10.1088/0004-637x/799/1/86.
18. 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].