

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАЛЛАЕВА Микаэла Магомедкеримовна

**Пространственная асимметрия высокоэнергичного
космического излучения в Млечном Пути**

Кафедра Физики частиц и космологии

КУРСОВАЯ РАБОТА 2 КУРСА

(Подпись студента)

Научный руководитель:
Аспирант кафедры ФЧиК
Мартыненко Николай Сергеевич

(Подпись научного руководителя)

Аннотация

В данной работе проведено моделирование диффузного гамма-излучения от галактической плоскости в диапазоне энергий фотонов от ГэВ до десятков ТэВ. Галактика сегментирована по четырём спиральным рукавам. Для каждого рукава путём фитирования данных LHAASO восстановлены произведение амплитуды спектра на плотность мишеней водорода и спектральный индекс локального спектра космических лучей. Получены свидетельства пространственной неоднородности спектра космических лучей (КЛ) в галактическом диске.

Содержание

Аннотация	1
1 Введение	2
2 Данные	2
2.1 Широкополосные потоки диффузного гамма-излучения во внутренних и внешних областях Галактики	2
2.2 Рукава Млечного Пути	3
3 Методы	3
3.1 Сегментация галактики	3
3.2 Параметризация сегментов	4
4 Результаты	7
5 Обсуждение результатов	9
6 Выводы и заключение	9

1 Введение

Недавние теоретические работы, в частности, использующие подходы анизотропной диффузии [1, 2], указывают на возможность существенных пространственных вариаций спектра КЛ в зависимости от локальной структуры магнитного поля и положения относительно спиральных рукавов.

Подобные модели зачастую основываются на труднопроверяемых допущениях об источниках КЛ. В связи с этим актуальной задачей является прямая проверка гипотезы о пространственной неоднородности спектра КЛ, исходя непосредственно из наблюдательных данных, без привлечения сложных моделей распространения. Современные детальные измерения пространственной и угловой структуры высокоэнергичного гамма-излучения, представленные обсерваторией LHAASO, позволяют провести такой анализ.

Целью данной работы является восстановление локальных спектральных характеристик КЛ в структурных элементах Галактики (спиральных рукавах) на основе данных о диффузном гамма-излучении.

Структура работы: В разделе 2 описаны используемые данные, в разделе 3 изложены методы анализа, раздел 4 содержит результаты, в разделе 5 приведено обсуждение, в разделе 6 — выводы.

2 Данные

2.1 Широкополосные потоки диффузного гамма-излучения во внутренних и внешних областях Галактики

Измерения диффузного гамма-излучения галактической плоскости получены из работы [4] обсерватории LHAASO. Физически измеряемой величиной является дифференциальный поток фотонов, умноженный на $E^{2.5}$:

$$E^{2.5} \frac{dJ}{dE} \quad [\text{ТэВ}^{1.5} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ ср}^{-1}], \quad (1)$$

в диапазоне энергий фотонов от ~ 1 до $\sim 10^3$ ТэВ, усреднённый по галактической широте $|b| < 5^\circ$. Данные разделены на два региона по галактической долготе l :

$$\text{Inner: } 15^\circ < l < 125^\circ, \quad (2)$$

$$\text{Outer: } 125^\circ < l < 235^\circ. \quad (3)$$

Регион Inner охватывает внутреннюю часть галактического диска; регион Outer соответствует внешней части диска. Для региона Inner дополнительно доступны измерения в трёх субрегионах: $[15^\circ, 50^\circ]$, $[50^\circ, 90^\circ]$, $[90^\circ, 125^\circ]$, которые используются при фитировании параметров отдельных рукавов. Дополнительно в этой работе на графиках приведены измерения Fermi-LAT в диапазоне энергий ниже ~ 1 ТэВ; эти данные не участвуют в

фитировании, однако служат независимой проверкой модели в области ГэВ.

2.2 Рукава Млечного Пути

Для сегментации галактики по рукавам использовалась модель Vallee 1995 [5], которая загружена в библиотеку SpiralMap на python [6]. Библиотека дает центральные линии рукава, на основе которых в дальнейшем происходит сегментирование.

Для сопоставления данных гамма-излучения с конкретными структурами Млечного Пути мы используем сегментацию Галактики по четырём рукавам.

Согласно модели Vallee [5], положение спиральных рукавов определяется через распределение интенсивности спирального узора $I(\theta, r)$, максимум которой соответствует центральной линии рукава. Условие максимума интенсивности из уравнения (5а) оригинальной статьи задается соотношением:

$$\theta = \theta_0 + \frac{1}{\tan p} \ln \left(\frac{r}{r_0} \right) \quad (4)$$

где r — галактоцентрический радиус (расстояние от центра Галактики); θ — азимутальный угол в плоскости диска; $r_0 = 2.5$ кпк и θ_0 — начальный радиус и начальный угол точки выхода рукава; $p = 12^\circ$ — угол закрутки (pitch angle), определяющий скорость «раскручивания» спирали.

Таблица 1: Параметры рукавов

Рукав	r кпк	θ_0
Sagittarius	6.5	0°
Perseus	9.5	90°
3-kpc	12.5	180°
Scutum	15.5	270°

3 Методы

3.1 Сегментация галактики

Для ограничения области поиска вводится внешний радиус обрезания галактического диска $R_{max} = 13$ кпк. В модели Vallee [5] указано: «Не показаны внутренняя область ($r_{gal} < 3$ кпк от центра Галактики) и внешняя область ($r_{gal} > 13$ кпк от центра Галактики), где теория предсказывает другие физические режимы». Однако в этой работе мы пренебрегаем ограничением $r_{gal} < 3$, так как центр Галактики не входит в рассматриваемые интервалы. Точки за пределами радиуса $R_{max} = 13$ кпк не рассматриваются как часть Галактики при расчёте вкладов. Каждому элементу объёма присваивается сектор, соответствующий ближайшему к нему рукаву по минимальному евклидову расстоянию в

плоскости диска. Рукав, которому принадлежит точка P , определяется как

$$\arg \min_{\text{Arm}} (\text{dist}(P, \text{Arm}))$$

Дополнительно применяется геометрический фильтр по галактической долготе l , который выделяет конкретные наблюдательные сектора Inner ($15^\circ < l < 125^\circ$) и Outer ($125^\circ < l < 235^\circ$).

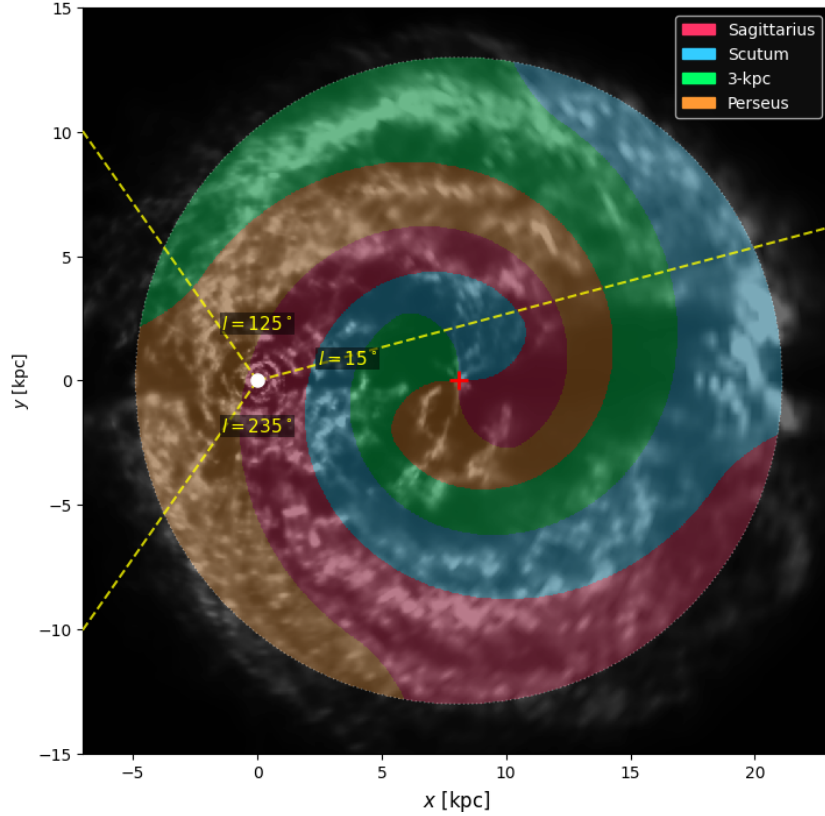


Рис. 1: Результат сегментации галактического диска по модели Vallee 1995. Карта распределения объемной плотности нейтрального водорода (HI), реконструированная по данным работы [3], где монохромная шкала фона отражает интенсивность концентрации межзвездного газа в плоскости Галактики. Поверх эмпирических данных наложена теоретическая модель Vallee 1995, каждому пикселю присвоен цвет ближайшего спирального рукава (Sagittarius, Scutum, 3-kpc или Perseus)

3.2 Параметризация сегментов

При анализе диффузного гамма-излучения в диапазоне энергий до 30–100 ТэВ необходимо учитывать ослабление потока вследствие парного рождения электронов и позитронов ($\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$) при взаимодействии с межзвездными радиационными полями и реликтовым излучением.

Согласно результатам работ Vernetto and Lipari [9] и Moskalenko et al. [10], оптическая толщина τ для фотонов с энергиями $E_\gamma < 30$ ТэВ остается малой ($\tau < 0.1$) даже

для протяженных траекторий, проходящих через Галактический центр. Это соответствует поглощению менее 10% исходного потока. В данной работе рассматривается диапазон энергий до 30 ТэВ, что позволяет использовать приближение прозрачной среды:

$$J_{obs}(E_\gamma) = J_{prod}(E_\gamma) \cdot e^{-\tau} \approx J_{prod}(E_\gamma). \quad (5)$$

Здесь $J_{obs}(E_\gamma)$ — дифференциальный поток гамма-излучения, наблюдаемый на Земле, а $J_{prod}(E_\gamma)$ — исходный поток гамма-излучения. Согласно работам [9, 10], для энергий $E < 30$ ТэВ фактор поглощения $e^{-\tau} \approx 1$.

Поток гамма-излучения от конкретного сегмента (спирального рукава) вдоль луча зрения определяется следующим выражением [2, 11]:

$$J_{segment}(E, l, b) = \frac{c}{4\pi} \int_{s_{min}}^{s_{max}} ds n_H(s, l, b) \cdot \int_E^\infty dE' \frac{d\sigma^{pp \rightarrow \gamma}}{dE}(E', E) \cdot \frac{dn_{CR}}{dE'}(s, E') \quad (6)$$

где s — расстояние от наблюдателя вдоль луча зрения, c — скорость света в вакууме, n_H — концентрация газа-мишени [см^{-3}], а интегрирование по dE' описывает генерацию гамма-квантов с дифференциальным инклюзивным сечением $d\sigma^{pp \rightarrow \gamma}/dE$.

Галактика моделируется структурой из четырёх спиральных рукавов. Интеграл по лучу зрения разбивается на сумму вкладов от каждого сегмента:

$$J_\gamma(E, l, b) = \sum_{i=1}^4 J_i(E, l, b) \quad (7)$$

где интегрирование для i -го рукава ведется только по тем участкам луча s , которые геометрически принадлежат данному рукаву.

Внутри каждого рукава форма энергетического спектра космических лучей (КЛ) считается пространственно однородной. Дифференциальная плотность КЛ факторизуется на пространственно-зависимую амплитуду $A_{CR_i}(s)$ [$\text{см}^{-3} \text{ ТэВ}^{-1}$] и безразмерную спектральную функцию $F_i(E', p_i)$:

$$\frac{dn_{CR}}{dE'}(s, E') = A_{CR_i}(s) \cdot F_i(E', p_i) \quad (8)$$

В качестве спектральной функции F_i используется степенной закон с экспоненциальным завалом:

$$F_i(E', p_i) = \left(\frac{E'}{1 \text{ ТэВ}} \right)^{-p_i} \exp \left(-\frac{E'}{E_{cut}} \right) \quad (9)$$

где p_i — искомый спектральный индекс для i -го рукава, а $E_{cut} = 3 \times 10^3$ ТэВ (3 ПэВ) — значение энергии, при котором спектр первичных Галактических космических лучей перестает быть степенным и начинает резко падать [11].

Это позволяет вынести интеграл по энергии, вычисляемый численно с помощью

пакета **AAFrag**, за знак пространственного интеграла:

$$S_{AAFrag}(E, p_i) = \frac{c}{4\pi} \int_E^\infty dE' \frac{d\sigma^{pp \rightarrow \gamma}}{dE} \cdot F_i(E', p_i) \quad (10)$$

где S_{AAFrag} имеет размерность $[\text{см}^3 \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}]$.

В рамках агностического подхода предполагается, что внутри каждого i -го рукава концентрация газа $n_{H,i}$ и концентрация КЛ $A_{CR,i}(s)$ постоянны. Тогда поток от одного рукава в направлении (l, b) принимает вид:

$$J_i(E, l, b) = \mathcal{A}_i \cdot S_{AAFrag}(E, p_i) \cdot L_i(l, b) \quad (11)$$

Здесь $\mathcal{A}_i = n_{H,i} \cdot A_{CR,i} [\text{см}^{-6} \text{ ТэВ}^{-1}]$ — физическая константа рукава, характеризующая плотность среды и интенсивность КЛ в нем. В нашем подходе мы не можем по отдельности восстановить множители, а можем оценить только произведение. Величина $L_i(l, b)$ представляет собой геометрическую длину пути луча зрения внутри i -го рукава:

$$L_i(l, b) = \int_{s \in \text{Arm}_i} ds = s_{max,i}(l, b) - s_{min,i}(l, b) \quad (12)$$

где $s_{min,i}$ и $s_{max,i}$ — точки входа и выхода луча из объема рукава. При расчете этих границ учитывается вертикальная структура Галактики: рукава моделируются как структуры с полной толщиной $H = 400$ пк, что накладывает ограничение $|z| = |s \cdot \sin b| \leq 200$ пк. Таким образом, фактор L_i учитывает, что на больших расстояниях или высоких широтах луч может выйти за пределы газового диска быстрее, чем пересечет радиальную границу рукава.

Экспериментальные данные усреднены по регионам R , определяемым границами $l \in [l_{min}, l_{max}]$ и $b \in [b_{min}, b_{max}]$. Средний поток в регионе вычисляется как:

$$\langle J(E) \rangle_R = \sum_{i=1}^4 \mathcal{A}_i \cdot S_{AAFrag}(E, p_i) \cdot \langle L_i \rangle_R \quad (13)$$

где $\langle L_i \rangle_R$ [кпк] — средневзвешенная длина пути в i -м рукаве для региона R :

$$\langle L_i \rangle_R = \frac{1}{\Delta\Omega_R} \int_{l_{min}}^{l_{max}} \int_{b_{min}}^{b_{max}} L_i(l, b) \cos b \, db \, dl \quad (14)$$

Здесь $\Delta\Omega_R = \int_R \cos b \, db \, dl$ — телесный угол региона. В численной реализации $\langle L_i \rangle_R$ соответствует средней длине пути, приходящейся на конкретный рукав в выбранном секторе неба. Численное интегрирование выполняется методом суммирования по сетке с разбиением области на элементарные прямоугольники с угловым шагом порядка 1° .

При аппроксимации методом Левенберга — Марквардта [12] фитируется десятичный логарифм безразмерной амплитуды $A_{\text{eff}} = \mathcal{A}_i / \mathcal{A}_0$, где $\mathcal{A}_0 = 1 \text{ см}^{-6} \text{ ТэВ}^{-1}$ — нормировочный множитель. Итоговая функция, с которой сопоставляются экспериментальные

спектры в формате $E^{2.5} J$, имеет вид:

$$E^{2.5} \langle J(E) \rangle_R = E^{2.5} \sum_{i=1}^4 [10^{\lg(A_{\text{eff}})} \cdot S_{AAFrag}(E, p_i) \cdot \langle L_i \rangle_R] \quad (15)$$

Для региона Inner мы ищем параметры (фитируем по формуле (15)) на узких суб-регионах, а затем проверяем, насколько хорошо эти параметры предсказывают поток суммарного региона Inner. Для внешнего региона Outer фитируем сразу по полному региону.

4 Результаты

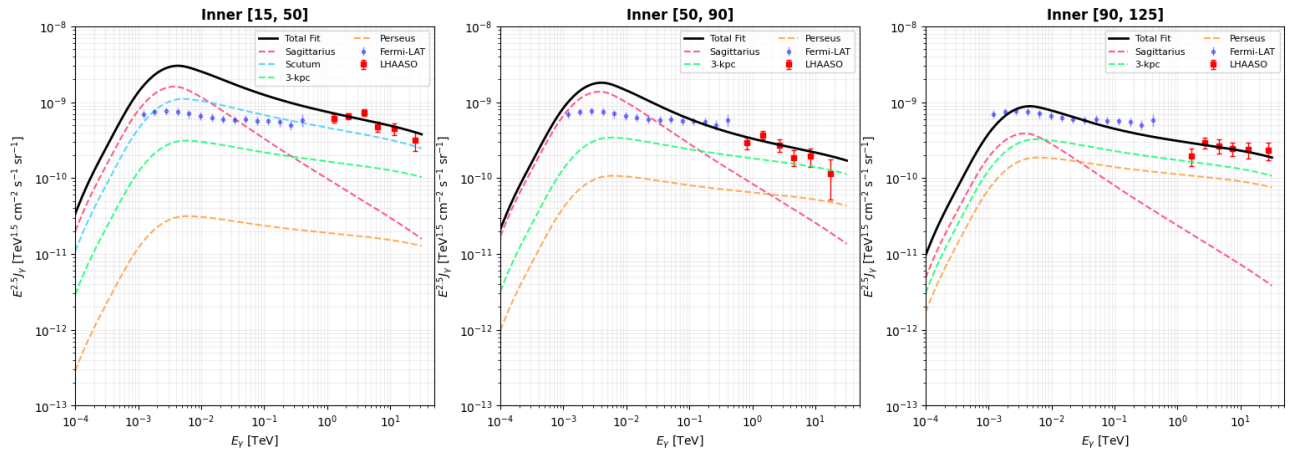


Рис. 2: Спектральное распределение диффузного гамма-излучения в суб-регионах Inner: $l \in [15^\circ, 50^\circ], [50^\circ, 90^\circ], [90^\circ, 125^\circ]$. Черная линия соответствует суммарному теоретическому потоку. Красные точки — точки LHAASO, использованные при фитировании; синие точки — точки Fermi-LAT, приведенные для сравнения (усреднены по всей области Inner). Цветные штриховые линии обозначают индивидуальные вклады спиральных рукавов Галактики, цвета рукавов соответствуют их обозначениям на Рис. 1.

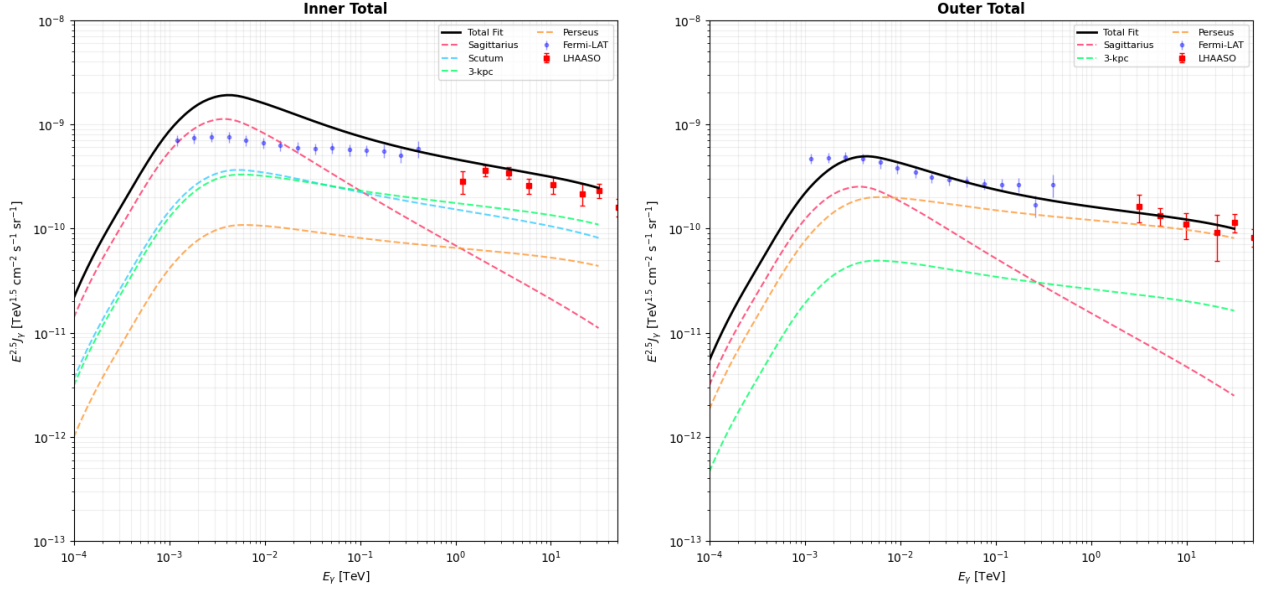


Рис. 3: Интегральные спектры диффузного гамма-излучения для регионов Inner ($15^\circ < l < 125^\circ$) и Outer ($125^\circ < l < 235^\circ$). Черная линия соответствует суммарному теоретическому потоку. Красные точки — точки LHAASO, использованные при фитировании; синие точки — точки Fermi-LAT, приведенные для сравнения (усреднены по всей области Inner). Цветные штриховые линии обозначают индивидуальные вклады спиральных рукавов Галактики, цвета рукавов соответствуют их обозначениям на Рис. 1.

Таблица 2: Результаты фитирования параметров спектра космических лучей для различных спиральных рукавов

Рукав	$\lg(A_{\text{eff}})$	Spectral Index p
Sagittarius	-10.311 ± 1.171	3.051 ± 0.957
Scutum	-9.560 ± 0.222	2.697 ± 0.148
3-kpc	-9.785 ± 0.679	2.651 ± 0.375
Perseus	-10.553 ± 0.748	2.628 ± 0.415

Среднеквадратичная ошибка фита:

$$\chi_\nu = \sqrt{\frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^{22} \left(\frac{\lg(E_i^{2.5} \langle J(E_i) \rangle_R) - \lg(E_i^{2.5} \sum_{k=1}^4 10^{\lg A_{\text{eff},k}} \cdot S_{\text{AAFrag}}(E_i, p_k) \cdot \langle L_k \rangle_R)}{\frac{\sigma_i}{y_i \ln 10}} \right)^2} = 0.8872, \quad (16)$$

где σ_i — статистическая погрешность i -й точки LHAASO, $\nu = 14$ — число степеней свободы, 22 точки входят в фит.

5 Обсуждение результатов

Сравнение полученных параметров с результатами работ [1, 2] показывает качественное согласие: наблюдаемое в нашей модели увеличение спектрального индекса p от 2.628 до 3.051 соответствует теоретически предсказанным спектральным индексам КЛ, примерно от 2.7 до 3.1. Согласно анизотропному диффузионному подходу, это объясняется изменением условий удержания частиц в зависимости от структуры локального магнитного поля в различных регионах Галактического диска.

Параметры амплитуды $\lg(A_{\text{eff}})$, полученные в данной работе, также коррелируют с результатами теоретического моделирования [2]. Наблюдаемое снижение амплитуды при переходе от внутренних сегментов (Scutum, 3-кpc) к внешним (Perseus) качественно соответствует радиальному градиенту плотности космических лучей, который плавно падает при движении от центра к периферии.

Вклад рукава Sagittarius трудно отделить от фона из-за его геометрического расположения, что привело к большим погрешностям в оптимальных параметрах. Также в этом регионе (согласно [2]) условия диффузии меняются слишком резко.

6 Выводы и заключение

В настоящей работе проведён анализ пространственной неоднородности спектра космических лучей в Млечном Пути на основе наблюдательных данных о диффузном гамма-излучении.

Основные результаты:

Выполнена сегментация галактического диска по четырём спиральным рукавам в рамках модели Vallee 1995.

Для каждого рукава восстановлены параметры спектра КЛ — амплитуда $\lg(A_{\text{eff}})$ и спектральный индекс p — путём фитирования суммарного модельного потока гамма-излучения по данным LHAASO.

Обнаружена вариация спектрального индекса между рукавами: от $p \approx 2.63$ (Perseus) до $p \approx 3.05$ (Sagittarius), что качественно согласуется с теоретическими предсказаниями анизотропного диффузионного подхода [1, 2].

Наблюдаемое снижение амплитуды при переходе от внутренних рукавов к внешним соответствует ожидаемому радиальному градиенту плотности КЛ.

Большие погрешности параметров рукава Sagittarius обусловлены его геометрическим положением, затрудняющим разделение вкладов отдельных структур.

В дальнейшем планируется расширение модели за счёт включения нейтринного канала излучения. Поскольку нейтрино и гамма-кванты имеют общую родительскую популяцию протонов космических лучей, совместный (multimessenger) анализ позволит наложить более строгие ограничения на параметры модели. Также планируется распространить анализ на более высокие энергии (выше 30 ТэВ), где поглощение гамма-квантов на

межзвёздных радиационных полях становится существенным ($\tau \gtrsim 0.1$), и явным образом учесть фактор $e^{-\tau}$ при интерпретации наблюдательных данных [9, 10].

Список литературы

- [1] V. D. Borisov, V. O. Yurovsky, and I. A. Kudryashov. Modulation of the Galactic Cosmic Ray Spectrum in an Anisotropic Diffusion Approach. *arXiv preprint arXiv:2502.19062*, 2025.
- [2] V. D. Borisov, V. O. Yurovsky, A. I. Peryatinskaya, and I. A. Kudryashov. Spatial dependence of the break in the energy spectrum of cosmic rays in the new anisotropic diffusion approach. *arXiv preprint arXiv:2503.15680*, 2025.
- [3] *Spatially Coherent 3D Distributions of HI and CO in the Milky Way - Data Products*, ZENODO, Published June 28, 2024. <https://zenodo.org/records/12578443>
- [4] *Measurement of Very-high-energy Diffuse Gamma-ray Emissions from the Galactic Plane with LHAASO-WCDA*, arXiv:2411.16021v4, 7 Jan 2026, страница 7.
- [5] Vallee, J. P. (1995), *The Milky Way's spiral arms traced by magnetic fields, dust, gas, and stars.*, The Astronomical Journal, 454: 119–124, 20 Nov 1995.
- [6] Prusty and Khanna, *SpiralMap: A Python library of the Milky Way's spiral arms*, arXiv:2506.11383, 1 Mar 2026.
- [7] Prevotat, C., Kachelrieß, M., Koldobskiy, S., Neronov, A., Semikoz, D. (2024). *Energy dependence of the knee in the cosmic-ray spectrum across the Milky Way*. arXiv preprint arXiv:2407.11911.
- [8] Kachelrieß, M., Moskalenko, I. V., Ostapchenko, S. S. (2019). *AAfrag: Interpolation routines for Monte Carlo newly produced secondary cosmic rays*. *Computer Physics Communications*, 245, 106846.
- [9] S. Vernetto, P. Lipari. Absorption of Very High Energy Gamma Rays in the Milky Way. arXiv:1608.01587 (2016).
- [10] I. V. Moskalenko et al. Attenuation of VHE Gamma Rays by the Milky Way Interstellar Radiation Field. *ApJ* 640, L155 (2006).
- [11] C. Prevotat et al. Energy dependence of the knee in the cosmic-ray spectrum across the Milky Way. arXiv:2407.11911 (2024).
- [12] A method for the solution of certain non-linear problems in least squares by Kenneth Levenberg *Quart. Appl. Math.* 2 (1944), 164-168