

Пространственная асимметрия высокоэнергичного космического излучения в Млечном Пути

Студентка 207 группы
Каллаева Микаэла Магомедкеримовна

Научный руководитель: Аспирант кафедры ФЧиК
Мартыненко Николай Сергеевич

МГУ имени М. В. Ломоносова
Физический факультет

Москва, 2026

Что сделано?

Задача: Проверить гипотезу о пространственной неоднородности спектра космических лучей (КЛ) в диске Галактики.

Что сделано лично:

- Сегментация галактического диска по 4 спиральным рукавам (модель Vallee 1995)
- Фитирование методом Левенберга—Марквардта параметров спектра КЛ по данным LHAASO
- Восстановление амплитуды $\lg(A_{\text{eff}})$ и спектрального индекса p для каждого рукава

Основной результат: Обнаружена вариация спектрального индекса между рукавами от $p \approx 2.63$ до $p \approx 3.05$.

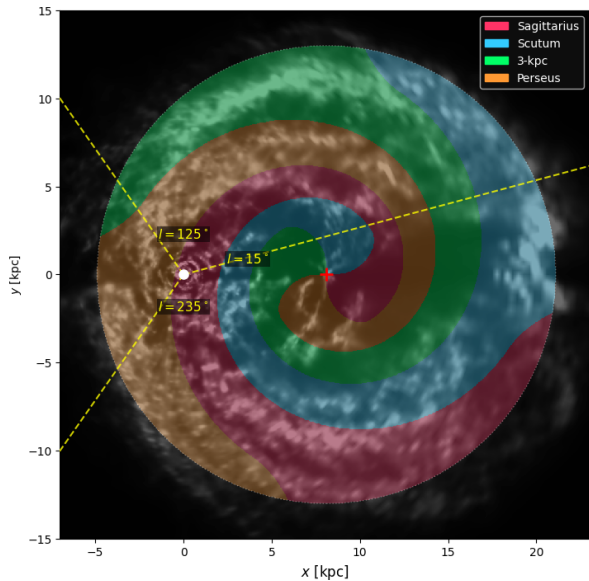
Данные:

- LHAASO — диффузное гамма-излучение ($E^{2.5} dJ/dE$), $E \sim 1-10^3$ ТэВ
- Регионы: Inner ($15^\circ < l < 125^\circ$), Outer ($125^\circ < l < 235^\circ$)
- Модель спиральных рукавов: Vallee 1995
- 3D карты HI для геометрии рукавов

Метод:

- Поток гамма-излучения от рукава: $J_i = \mathcal{A}_i \cdot S_{AAFrags}(E, p_i) \cdot L_i(l, b)$
- $\mathcal{A}_i = n_{H,i} \cdot A_{CR,i}$ — произведение плотности газа и амплитуды КЛ
- Фитирование спектральных индексов p_i и амплитуд \mathcal{A}_i

Результат сегментации галактического диска по модели Vallee 1995.



Результаты фитирования. Часть 1

функция, с которой сопоставляются экспериментальные спектры в формате $E^{2.5} J$, имеет вид:

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

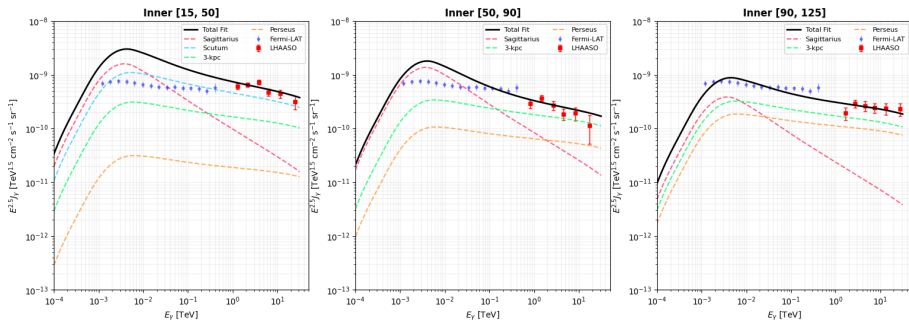


Рис.: Спектральное распределение диффузного гамма-излучения в суб-регионах Inner: $l \in [15^\circ, 50^\circ]$, $[50^\circ, 90^\circ]$, $[90^\circ, 125^\circ]$.

Результаты фитирования. Часть 2

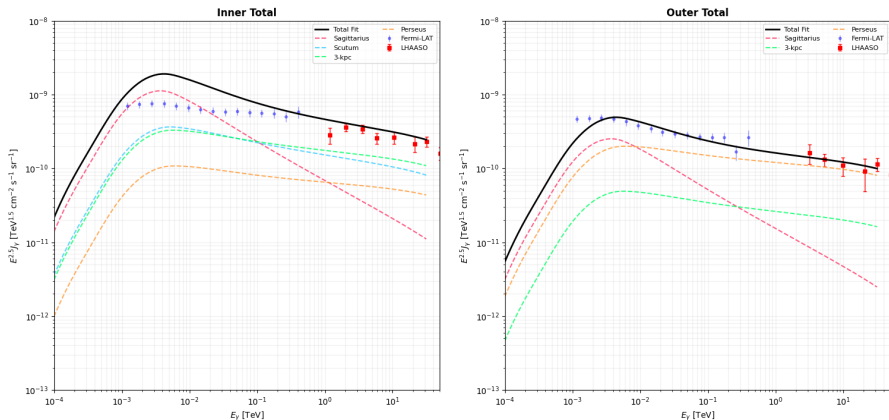


Рис.: Интегральные спектры диффузного гамма-излучения для регионов Inner ($15^\circ < l < 125^\circ$) и Outer ($125^\circ < l < 235^\circ$).

Таблица: Параметры спектра КЛ для 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: $\chi_\nu = 0.8872$

Наблюдаемые закономерности:

- p растёт от внешних рукавов к внутренним: Perseus (2.63) \rightarrow Sagittarius (3.05)
- Амплитуда $\lg(A_{\text{eff}})$ снижается к периферии: Scutum (-9.56) \rightarrow Perseus (-10.55)
- Рукав Sagittarius — большие погрешности (трудно отделить вклад от фона)

Согласие с предсказаниями анизотропной диффузии [1, 2]:

- Предсказанные индексы: $\sim 2.7\text{--}3.1$
→ Наши значения: 2.63–3.05 ✓
- Радиальный градиент плотности КЛ (падение к периферии)
→ Амплитуда $\lg(A_{\text{eff}})$ снижается от Scutum к Perseus ✓

Решённая задача:

- Прямая проверка пространственной неоднородности спектра КЛ по данным LHAASO без сложных моделей распространения






Личный вклад:

- 1 Сегментация Галактики на 4 рукава
- 2 Реализация фитирования спектральных параметров p_i и $\lg(A_{\text{eff}})$
- 3 Получены значения p_i для всех рукавов

Главный вывод: Спектр космических лучей в Млечном Пути пространственно неоднороден — спектральный индекс варьируется от рукава к рукаву.

- Включение нейтринного канала (multimessenger-анализ) — совместное ограничение параметров
- Распространение анализа на $E > 30$ ТэВ с учётом фактора поглощения $e^{-\tau}$ (Vernetto2016, Moskalenko2006)
- Уточнение геометрической модели рукавов

Спасибо за внимание!

-  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.
-  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.
-  Vernetto & Lipari (2016) — Absorption of VHE gamma rays, *Phys. Rev. D* 94, 063009
-  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.
-  *Measurement of Very-high-energy Diffuse Gamma-ray Emissions from the Galactic Plane with LHAASO-WCDA*, arXiv:2411.16021v4, 7 Jan 2026, страница 7.