39 Всероссийская конференция по космическим лучам

Abstract ID: 174

Поиск нейтринных сигналов от прерванного гравитационного коллапса звёзд (failed supernovae) на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе (2001–2025 гг.)

Кочкаров М.М, Дзапарова И.М., Куреня А.Н., Петков В.Б., Стриганов П.С., **Унатлоков И.Б.**, Янин А.Ф.

Баксанская Нейтринная Обсерватория ИЯИ РАН

Введение

Гравитационный коллапс массивных звёзд ($M > 25{-}40\,M_\odot$) может приводить к образованию чёрной дыры без формирования ударной волны и последующего взрыва сверхновой. Согласно теоретическим моделям, нейтринный сигнал от такого «прерванного» коллапса (failed supernovae) [1] характеризуется малой длительностью (≤ 1 с) и резким обрывом потока в момент формирования горизонта событий чёрной дыры. Длительный мониторинг на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе (БПСТ, рис.1) позволяет устанавливать строгие экспериментальные ограничения на частоту подобных событий в нашей Галактике.

Методика анализа и алгоритмы поиска

Для поиска нейтринного сигнала использовались данные одиночных срабатываний счётчиков БПСТ за период 2001–2025 гг. В качестве мишени применялись внутренние счётчики телескопа (три нижние горизонтальные плоскости) с суммарной массой мишени 130 т. Основным каналом регистрации является реакция обратного бета-распада на протонах [2]:

$$\bar{\nu}_e + p \;\rightarrow\; n + e^+. \tag{1}$$

Результаты поиска

Проведён анализ данных БПСТ за период 2001–2025 гг. с целью поиска нейтринного сигнала от прерванного коллапса сверхновых (failed supernovae). Нейтринный всплеск от таких событий ожидается в виде кратковременного кластера событий длительностью до 1 с.

Первичная обработка включала:

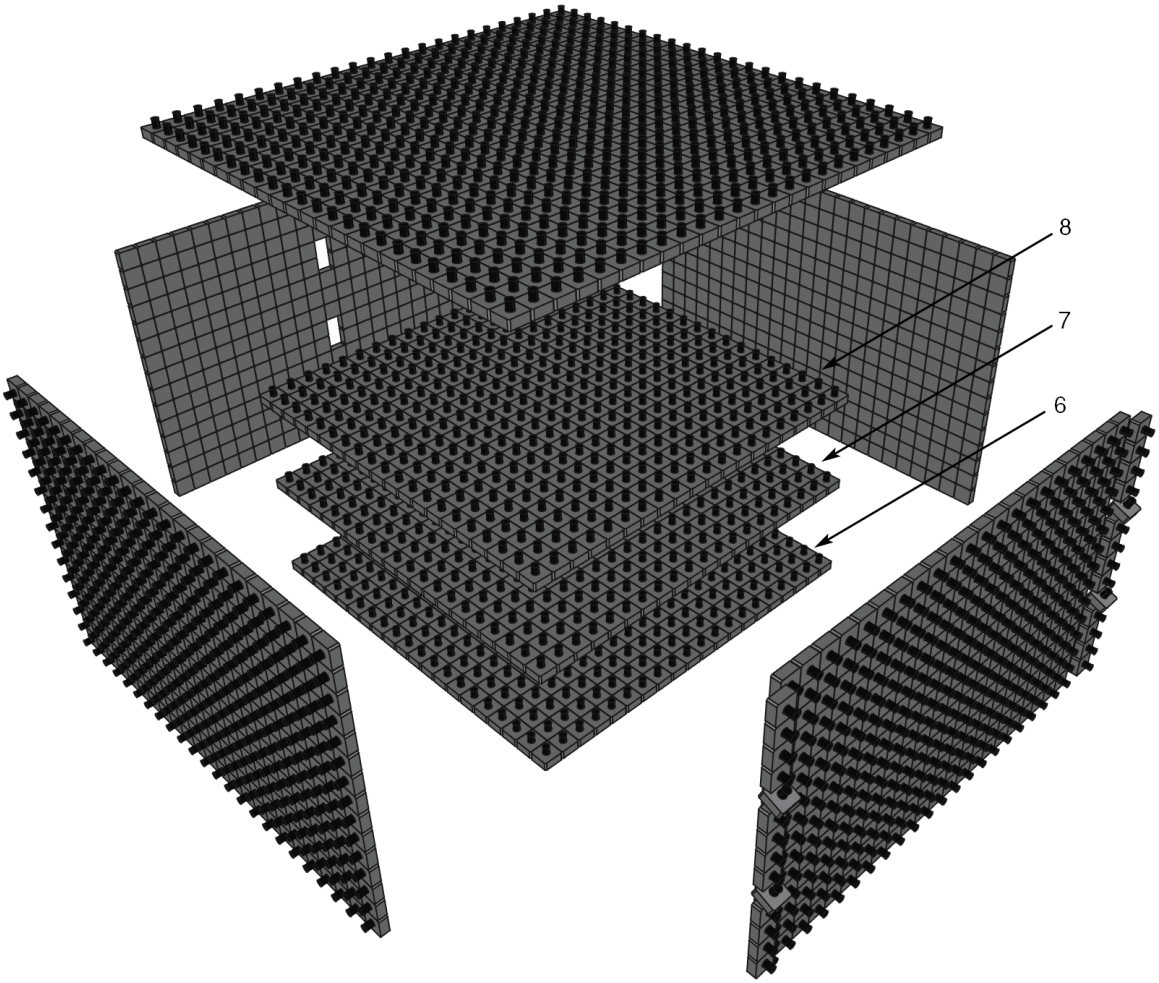

Рис. 1: Структура БПСТ

1. отбор одиночных событий в 250-нс кадрах;
2. верификацию работоспособности счётчиков мюонной защиты — внешних плоскостей (1–5);
3. исключение неисправных счётчиков внутренних плоскостей (6–8);
4. требование отсутствия адронных каскадов в течение 1 с до текущего события;
5. ограничение на число одиночных событий от одного счётчика в 15-минутном блоке информации;
6. контроль скорости счёта счётчика относительно средних калибровочных значений.

Данные за 2005–2008 гг. исключены из анализа вследствие иной структуры файлов данных. Для оставшегося массива (2001–2004, 2009–2025) применена дополнительная фильтрация фона: исключены события с аномальным временем пролёта, после чего итеративно выделялись плотные группы в 20-секундных окнах с использованием алгоритма последовательного поиска интервалов максимальной занятости; группы с признаками фонового происхождения отбрасывались.

Очищенные события подвергались кластеризации для десяти временных окон (100, 200, …, 1000 мс) посредством итеративного алгоритма максимизации заполнения окна: на каждом шаге выбирался интервал заданной длины, содержащий наибольшее число ещё не распределённых событий; эти события объединялись в кластер и исключались из дальнейшего рассмотрения. Одиночные нераспределённые события считались кластерами размера 1. Для каждого временного окна строились распределения размеров кластеров, аппроксимированные распределением Пуассона (рис.2); для всех окон модель удовлетворительно описывает данные, а отклонения для малых окон не превышают уровня статистической значимости.

Полное живое время, согласно обработанным данным, составило $T_{\mathrm{live}} = 5998.12$ дней (≈ 16.43 года). На основе байесовского подхода с равномерным априорным распределением для частоты сигнальных событий и при отсутствии значимых кластеров установлен 90%-ный верхний предел на частоту нейтринных вспышек от failed supernovae, дающих кластер размером ≥ 2:

$$f_{90} = \frac{2.3026}{T} = 3.84 \times 10^{-4} \text{ событий/сут}, \quad \text{что соответствует } 0.14 \text{ событий/год}. \tag{2}$$

В результате анализа нейтринных сигналов, соответствующих критериям прерванного коллапса звёзд, обнаружено не было. Отсутствие зарегистрированных всплесков за весь период наблюдений в совокупности с накопленным чистым временем работы установки позволило получить ограничение на частоту прерванных гравитационных коллапсов в Галактике.

Оценка остаточного фона

Эффективность поиска редких астрофизических сигналов ограничена фоном одиночных срабатываний внутренних счётчиков. Основные составляющие фона:

Быстрые нейтроны ($E > 10$ МэВ): поток нейтронов, генерируемых мюонами в окружающей породе, составляет $\Phi_n = (2.5 \pm 0.5) \times 10^{-9}\,\text{см}^{-2}\,\text{с}^{-1}$. Вклад упругого рассеяния этих нейтронов на протонах в суммарный фон одиночных событий оценивается величиной около 6%.

Проникающие мюоны: [3] выполнено полное численное моделирование прохождения мюонов через детальную геометрическую модель БПСТ. Оценен вклад одиночных мюонов, проходящих незамеченными через внешние плоскости вследствие геометрических особенностей расположения счётчиков и порога регистрации (8 МэВ).

Для оценки данного фона использовались экспериментальные данные по дифференциальному потоку мюонов на поверхности [5] (рис.3) и результаты моделирования методом Монте-Карло эффективности мюонной защиты [4]. Для всех направлений с известной статистикой ($\varphi \in [0°, 90°] \cup [270°, 360°]$; область $90° < \varphi < 270°$ исключена из-за полного подавления мюонов ШАЛ горным массивом) рассчитывалась вероятность незамеченного прохождения (рис.4). Поток мюонов приводился к сетке $1° \times 1°$ методом билинейной интерполяции с линейной экстраполяцией к $\theta = 0°$; интегральный фон получен суммированием:

$$\Phi_\mu^{\text{eff}} = \sum_{\theta,\varphi} f(\theta,\varphi) \cdot n(\theta,\varphi) \cdot \sin\theta\, \Delta\theta\, \Delta\varphi, \quad \Delta\theta = \Delta\varphi = 1°. \tag{3}$$

Результирующий интегральный поток мюонов, достигающих мишени в обход защиты, составил $3.34 \times 10^{-10}\,\text{см}^{-2}\,\text{с}^{-1}$, что согласуется с ожидаемым подавлением фона за счёт антисовпадательной защиты детектора. Результаты моделирования подтверждают, что незамеченные мюоны составляют основную часть фона одиночных срабатываний, имитирующих нейтринный сигнал; тем не менее геометрия детектора обеспечивает существенное подавление данного фона.

Заключение

Анализ данных БПСТ за 2001–2025 гг. не выявил нейтринных сигналов, соответствующих критериям прерванного гравитационного коллапса в Галактике. Детальное моделирование фона проникающих мюонов в сочетании с оценкой потока быстрых нейтронов обеспечивает высокую достоверность полученных результатов и установленного верхнего предела на частоту failed supernovae в Галактике.

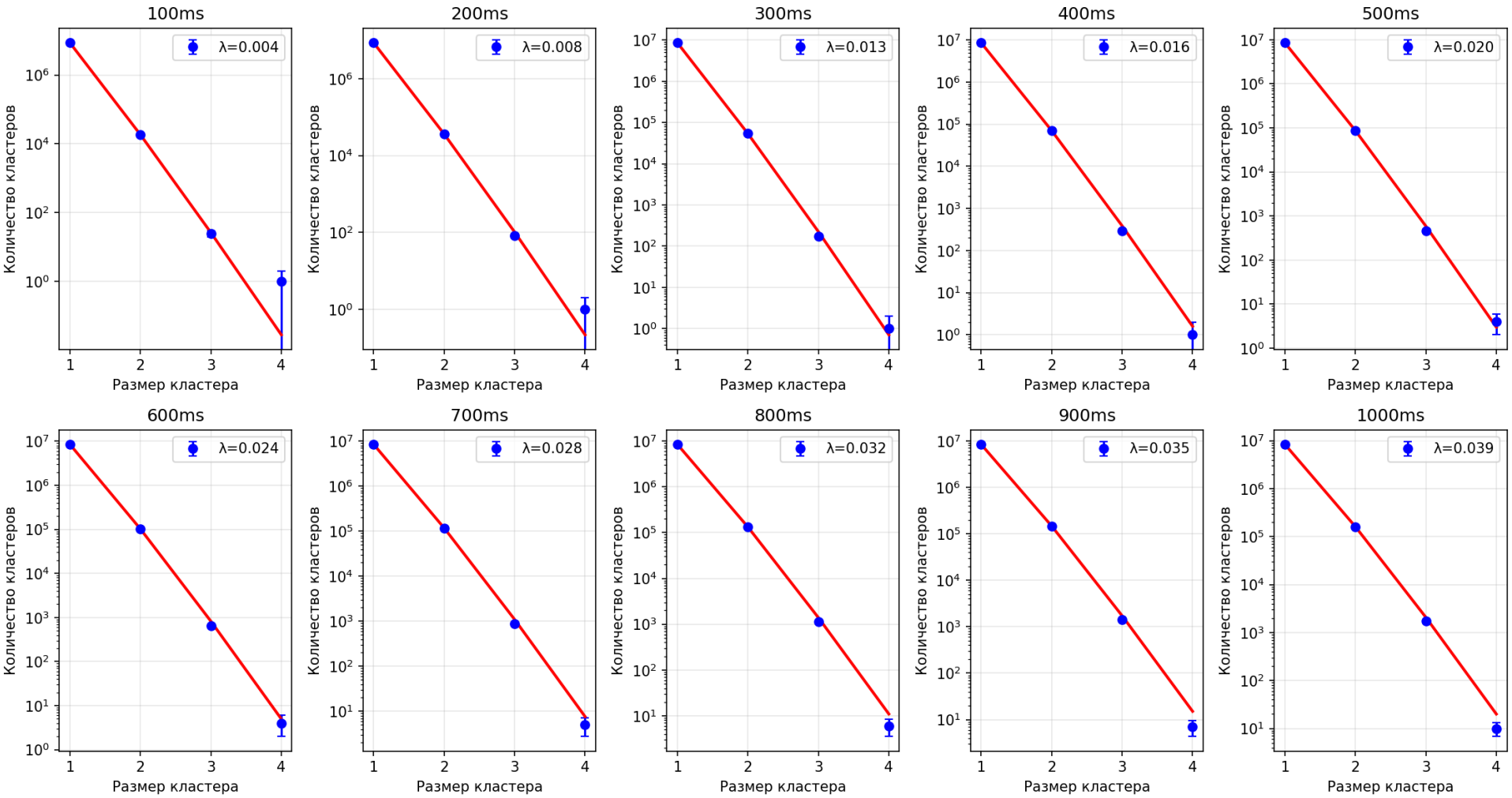

Рис. 2: Фитирование Пуассоном

Список литературы

[1] Sumiyoshi K., Yamada S., Suzuki H. *Astrophys. J.* **688**, 1176 (2008).

[2] Novoseltseva R. V. et al. *Physics of Atomic Nuclei* **49**(4), 1103–1111 (2018).

[3] Kochkarov M. M. et al. *Bull. Russ. Acad. Sci.: Physics* **83**(8), 927–929 (2019).

[4] Кочкаров М. М. и др. *Изв. РАН. Сер. физ.* **89**(6), 905–909 (2025).

[5] Гуренцов В. И. Препринт АН СССР П-0379 (1984).

Работа выполнена на УНУ «Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп» (ЦКП «Баксанская нейтринная обсерватория» ИЯИ РАН) при финансовой поддержке Минобрнауки РФ.

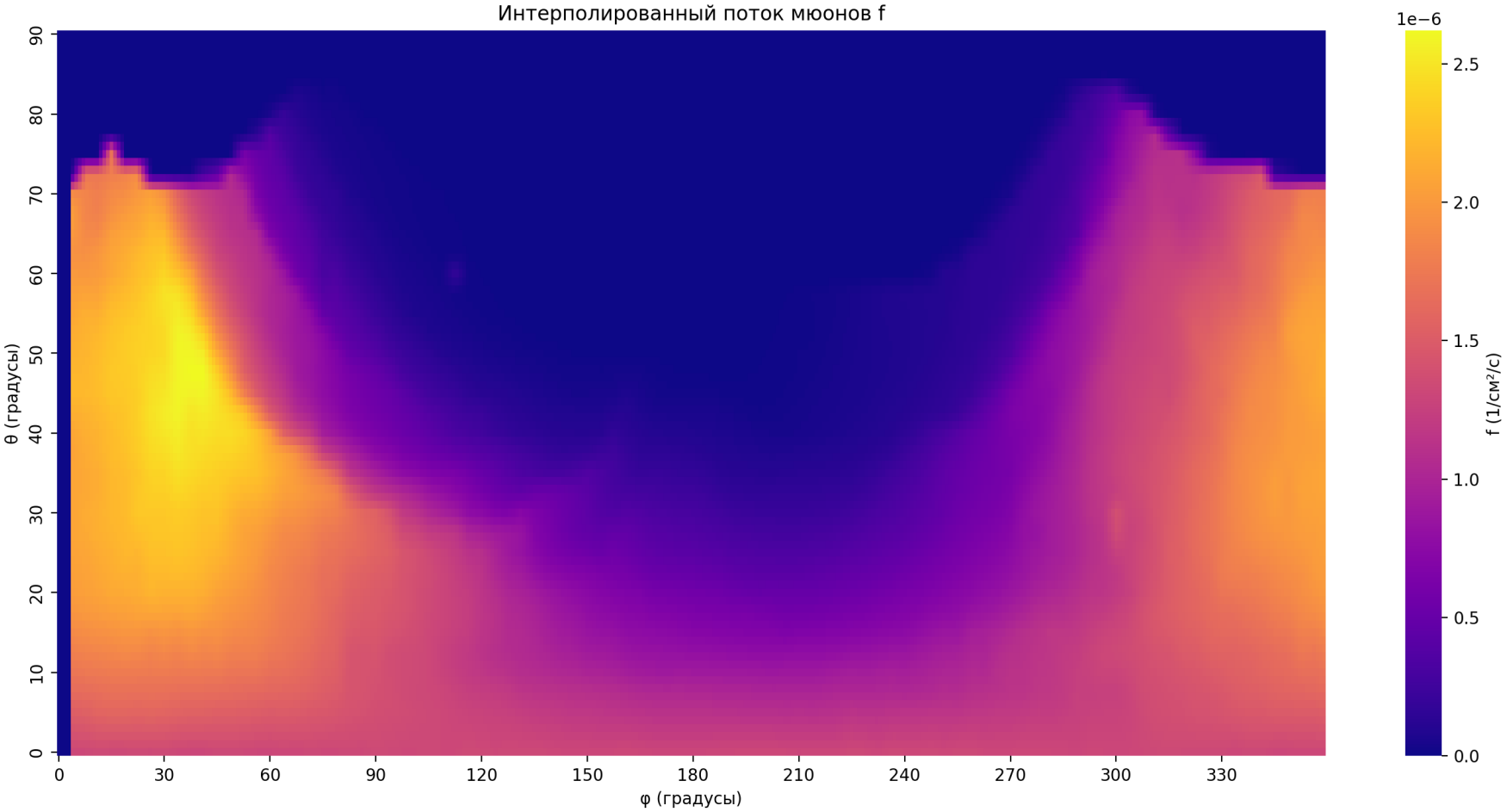

Рис. 3: Поток мюонов в камере БПСТ, [5]

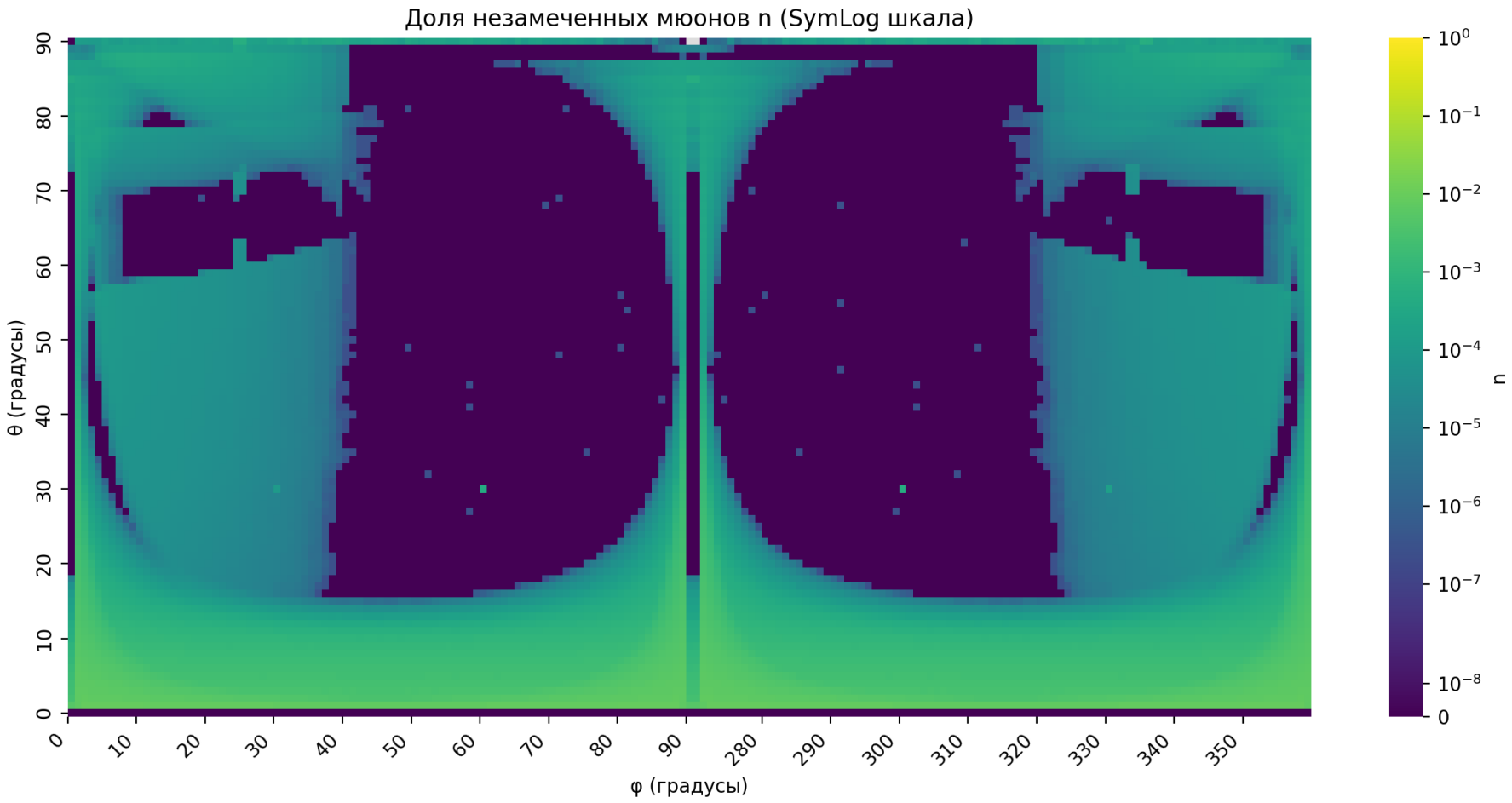

Рис. 4: Вероятность незаметного проникновения мюона через мюонную защиту