

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

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

## ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБЪЯСНЕНИЯ ИЗБЫТКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

Студент \_\_\_\_\_ Ф. В. Костромин

Научные руководители \_\_\_\_\_ М. Л. Соловьёв  
\_\_\_\_\_ К. М. Белоцкий

Москва 2026

# Введение

Согласно классическим представлениям о механизмах образования космического излучения, космические позитроны имеют вторичное происхождение, т.е. они рождаются при взаимодействии других высокоэнергетических частиц с межзвездной средой. Ожидалось, что их спектр и доля в общем потоке должны падать с увеличением энергии. Однако, в 2008 году на эксперименте PAMELA был зарегистрирован рост доли позитронов от общего потока электронов и позитронов, начинающийся на энергиях порядка 10 ГэВ. В дальнейшем это наблюдение было подтверждено и уточнено экспериментом AMS02 [1], а также экспериментом DAMPE. На данный момент избыток позитронов в космических лучах, называемый "позитронной аномалией", не имеет общепринятого объяснения и порождает большое количество работ развивающих различные модели[5-12]. Одним из основных ограничений накладываемых на подобные модели являются наблюдаемые данные по изотропному фону гамма-излучения (IGRB), предоставляемыми Fermi-LAT [2].

Среди подобных работ выделяются два направления. Первое использует в качестве источников первичных позитронов гипотетические частицы тёмной материи, способные распадаться или аннигилировать с образованием позитронов. Такие модели уже неоднократно обсуждались в моих предыдущих работах, а также в работах кафедры. Второе направление использует пульсары в качестве источника позитронов. При этом спектр инжекции в данном случае, как правило считается степенным.

Данная работа исследует источники обладающие степенным спектром, абстрагируясь при этом от их природы. Её целью является оценка применимости разработанной ранее методологии к подобным источникам, а также установление тех ограничений, которые наблюдаемые данные накладывают на пространственное распределение источников.

## Методология

**Получение спектров от заданного профиля плотности.  
Описание используемых вычислительных средств.**

В данной работе рассматривались источники излучения обладающие степенным спектром инжекции позитронов:

$$\frac{dN}{dE} \propto \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-\gamma_e} \exp \left( -\frac{E}{E_c} \right)$$

где энергия обрезания спектра  $E_c = 10^5$  ТэВ,  $E_0 = 1$  ГэВ и спектральный индекс  $\gamma_e = 2$  (значения взяты из работы [13]).

Для моделирования распространения релятивистских заряженных частиц в Галактике и образующегося при этом диффузного излучения использовался программный пакет GALPROP [3]. Это программа с открытым исходным кодом, которая численно решает уравнение переноса, описывающее распространение космических лучей. При этом программа включает в себя как можно больше актуальных астрофизических данных.

На GALPROP был модифицирован: добавлена возможность задания произвольных спектров инжекции и профилей плотности в виде таблиц.

Запуская GALPROP для заданного профиля плотности, мы получаем на выходе набор файлов в формате FITS, представляющих из себя многомерные массивы с информацией о потоках заряженных частиц в каждой точке Галактики. С помощью программы на Python из них извлекались и очищались от нефизических значений спектры позитронов и вторичного гамма излучения для области расположенной в 8.5 кпк от центра Галактики, что соответствует положению Солнечной системы.

Для позитронного потока сравнение производилось с данными о доле позитронов в общем потоке электронов и позитронов, предоставляемыми AMS02. При этом для расчёта фоновых потоков использовались эмпирические формулы[1] :

$$\Phi_{e^-}^{bkg}(E) = \left( \frac{82.0\epsilon^{-0.28}}{1 + 0.224\epsilon^{2.93}} \right) GeV^{-1}m^{-2}s^{-1}sr^{-1}$$

$$\Phi_{e^-}^{bkg}(E) = \left( \frac{38.4\epsilon^{-4.78}}{1 + 0.0002\epsilon^{5.63}} + 24.0\epsilon^{-3.41} \right) GeV^{-1}m^{-2}s^{-1}sr^{-1}$$

где  $\epsilon = E/1GeV$ .

Для потока гамма излучения сравнение производилось с данными по

изотропному фону гамма-излучения (IGRB), предоставляемыми Fermi-LAT. В качестве фона использовались данные [9].

Вся описанная процедура расчёта требовала в дальнейшей работе многократного автоматического выполнения с различными параметрами и была объединена одной программой на Python. Вследствие чего к процессу расчёта добавились такие шаги, как автоматическая генерация настроечных файлов с необходимыми параметрами для GALPROP, запуск GALPROP непосредственно из Python кода, сохранение и загрузка полученных данных для большого числа циклов расчёта.

## Составление профиля плотности из набора областей.

В предшествующих работах уже обсуждалась простая идея, на которой основан данный метод, а именно использование свойства аддитивности, которым обладает исследуемая задача. Другими словами, если мы разобьём исследуемое пространство Галактики, заполненное источниками, на несколько областей, то, очевидно, что спектр, приходящий от объединения этих областей равен сумме спектров от каждой области в отдельности.

В этой связи, можно предложить следующий способ построения интересующего нас профиля плотности:

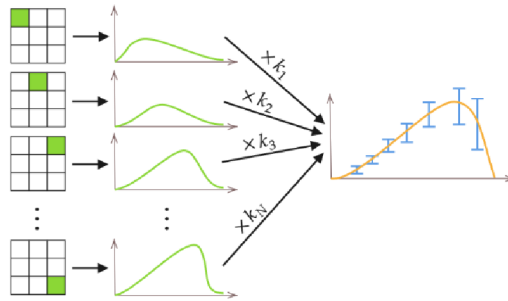
1. Выберем разбиение пространства Галактики некоторым набором областей  $\{D_1, D_2, D_3 \dots D_N\}$ . Это может быть прямоугольная сетка, набор колец или нечто иное - форма областей может быть выбрана произвольно.
2. Заполним каждую область источниками единичной плотности. То есть для каждой из областей рассмотрим профиль плотности равный 1 внутри области и 0 вне её. Выполним расчёт наблюдаемых спектров позитронов и гамма-излучения для каждого из таких профилей.

$$\rho_i(x, y, z) = \begin{cases} 1, & (x, y, z) \in D_i \\ 0, & (x, y, z) \notin D_i \end{cases} \quad i \in [0, N]$$

3. Представим искомый спектр (экспериментальные точки), как линейную комбинацию полученных спектров с некоторыми положительными коэффициентами  $\{k_1, k_2, k_3 \dots k_N\}$ .
4. Найденные коэффициенты показывают оптимальную плотность источников в каждой из областей. Таким образом искомый профиль мы получим в виде:

$$\rho(x, y, z) = \sum_{i=1}^N k_i \rho_i(x, y, z)$$

Схематично описанная процедура показана на рисунке.



Остаётся оговорить то, как происходил расчёт коэффициентов  $\{k_1, k_2 \dots k_N\}$ . Из спектров полученных от каждой области выделим только значения при энергиях соответствующих экспериментальным точкам для позитронов  $\phi_{i1}^{e^+}, \phi_{i2}^{e^+}, \dots, \phi_{im}^{e^+}$  и гамма-излучения  $\phi_{i1}^{\gamma}, \phi_{i2}^{\gamma}, \dots, \phi_{il}^{\gamma}$ , объединим эти значения в общую совокупность и будем думать о ней, как о некотором векторе:

$$D_i \rightarrow \rho_i \rightarrow \begin{bmatrix} \phi_{i1}^{e^+} \\ \phi_{i2}^{e^+} \\ \vdots \\ \phi_{im}^{e^+} \\ \phi_{i1}^{\gamma} \\ \phi_{i2}^{\gamma} \\ \vdots \\ \phi_{il}^{\gamma} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \phi_{i1} \\ \phi_{i2} \\ \vdots \\ \phi_{iM} \end{bmatrix}$$

Здесь  $i \in [1, N]$ ,  $m$  - число экспериментальных точек для позитронов,  $l$  - для гамма-излучения,  $M = m + l$ .

Поиск оптимального разложения одного вектора по набору других с положительными коэффициентами, это задача линейной алгебры, имеющая известное решение[4], более того это решение уже реализовано в таких программных пакетах как MATLAB или SciPy (Python).

Все эти методы минимизируют норму отклонения:  $\|A\vec{k} - \vec{b}\| \rightarrow \min$ , где  $A$  - матрица из векторов по которым идёт разложение,  $\vec{b}$  - вектор который нужно

получить,  $\vec{k}$  - искомые коэффициенты.

В нашем случае, вектор  $\vec{b}$  следует составить из экспериментальных точек позитронного и гамма спектра, делённых на их погрешности:

$$\vec{b} = \begin{bmatrix} \Phi_1^{e^+ \text{ эксп}} / \sigma_1 \\ \Phi_2^{e^+ \text{ эксп}} / \sigma_2 \\ \vdots \\ \Phi_{M-1}^{\gamma \text{ эксп}} / \sigma_{M-1} \\ \Phi_M^{\gamma \text{ эксп}} / \sigma_M \end{bmatrix}$$

Матрицу  $A$  следует составить из рассчитанных нами позитронных и гамма спектров от каждой области, делённых на соответствующие погрешности экспериментальных точек:

$$A = \begin{bmatrix} \phi_{11}/\sigma_1 & \phi_{21}/\sigma_1 & \cdots & \phi_{N1}/\sigma_1 \\ \phi_{12}/\sigma_2 & \phi_{22}/\sigma_2 & \cdots & \phi_{N2}/\sigma_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{1M}/\sigma_M & \phi_{2M}/\sigma_M & \cdots & \phi_{NM}/\sigma_M \end{bmatrix}$$

Тогда выражение  $\|A\vec{k} - \vec{b}\| \rightarrow \min$  перейдёт в:

$$\chi^2 = \sum_{\text{datapoints}} \frac{\Delta\Phi_{e^+}^2}{\sigma_e^2} + \sum_{\text{datapoints}} \frac{\Delta\Phi_{\gamma}^2}{\sigma_{\gamma}^2} \rightarrow \min$$

Где  $\Delta\Phi_{e^+(\gamma)} = \Phi^{e^+(\gamma) \text{ эксп}} - \Phi^{e^+(\gamma) \text{ расчёт}} = \Phi^{e^+(\gamma) \text{ эксп}} - \sum_i k_i \phi_i$ .

Однако, гамма излучение мы не хотим воссоздать точно, а хотим лишь не превысить и следовательно минимизировать должны не приведённое выше выражение, а:

$$\chi_{\theta}^2 = \sum_{\text{datapoints}} \frac{\Delta\Phi_{e^+}^2}{\sigma_e^2} + \sum_{\text{datapoints}} \frac{\Delta\Phi_{\gamma}^2}{\sigma_{\gamma}^2} \theta(\Delta\Phi_{\gamma})$$

Где  $\theta$  - функция Хэвисайда. Был разработан алгоритм позволяющий перейти от минимизации  $\chi^2$  к минимизации  $\chi_{\theta}^2$  (далее обозначаемому просто как  $\chi^2$ ), который также уже обсуждался в моих предшествующих работах.

**Поиск всех возможных профилей плотности.**

Теперь по наблюдаемым данным мы можем построить оптимальный профиль плотности, соответствующий минимально возможному значению  $\chi_0^2$ . Однако стоит задаться вопросом: что если мы перенесём часть плотности источников из одной из задействованных областей в соседнюю?  $\chi^2$  очевидно ухудшится но не существенно. Вообще говоря оказывается, что из используемого нами набора спектров от каждой из областей, многие являются "*линейно зависимыми*" в том смысле, что суммы одних наборов спектров с положительными коэффициентами с хорошей точностью можно представлять как суммы других наборов, опять же с положительными коэффициентами, и исследуемая задача имеет множество неочевидных "*симметрий*". Таким образом оказывается, что найденное нами наилучшее решение, отвечающее значению  $\chi_0^2$  не имеет физического смысла, мы можем найти бесконечное множество удовлетворительных с точки зрения описания наблюдаемых данных решений, которым соответствуют значения  $[\chi_0^2, \chi_0^2 + \Delta\chi^2]$ . Разработанный алгоритм построения такого множества решений уже обсуждался ранее и здесь будет изложен кратко.

- Рассмотрим все подмножества множества используемых нами областей.
- Для каждого подмножества областей построим оптимальный профиль плотности на этом подмножестве, то есть произведём разложение наблюдаемых спектров по спектрам исходящим только от областей данного подмножества.
- Если полученный нами профиль задействует все области данного подмножества, то есть ни в одной из областей подмножества плотность не оказалась равной нулю, и при этом полученный профиль удовлетворяет условию  $\chi^2 < \chi_0^2 + \Delta\chi^2$ , запомним этот профиль плотности как  $\rho_i$ . Таким образом полученный нами набор профилей  $\{\rho_i\}$  образует некоторый "базис" в пространстве профилей плотности. Мы можем записать результирующий профиль плотности в виде:

$$\rho = \sum_i \alpha_i \rho_i$$

При этом условие  $\chi^2 < \chi_0^2 + \Delta\chi^2$  будет выполняться для любых значений  $\alpha_i$  таких, что  $\alpha_i \geq 0$ ,  $\sum_i \alpha_i = 1$ .

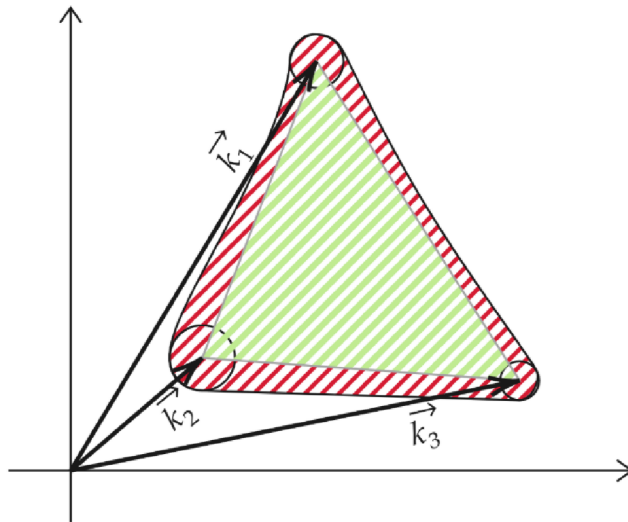
Однако число возможных подмножеств равно  $2^N$ , где  $N$  - число областей порядка 100. Очевидно, что какой бы быстрой не была процедура поиска

оптимальных коэффициентов проделать её  $2^{100}$  раз за разумное время невозможно.

- Во-первых, нужно заранее исключать из рассмотрения подмножества, заведомо приводящие к одинаковому результату.
- Во-вторых, нужно организовать перебор в порядке возрастания  $\chi^2$ , чтобы не рассматривать все подмножества, а двигаясь от минимального значения остановить перебор достигнув определённой границы.

Был разработан алгоритм, удовлетворяющий этим требованиям, позволяющий оптимизировать перебор и решить задачу за разумное время.

Также, для поддержания строгости рассуждений, следует сделать ещё одну оговорку.



Мы находим наборы коэффициентов, например,  $\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3$ , которые задействуют различные области нашего разбиения (на рисунке а они схематично показаны векторами) и рассматриваем их линейные комбинации с коэффициентами  $\alpha_i > 0, \sum_i \alpha_i = 1$ , таким образом получая множество решений (на рисунке это множество схематично показано зелёной штриховкой).

Однако ясно, что получив, например, набор коэффициентов  $\vec{k}_1$  мы можем, немного меняя значения коэффициентов в задействованных областях, получить множество решений близких к  $\vec{k}_1$ , имеющих приемлемый  $\chi^2$  (такие множества решений схематично показаны на рисунке б красной штриховкой). Рассмотрение таких решений не интересно, так как они задействуют одни и те же области и геометрически представляют из себя один и тот же профиль, искусственно ухудшенный перераспределением плотности.

Таким образом, нужно отметить, что множество решений удовлетворяющих

условию  $\chi^2 < \chi_{min}^2 + \Delta\chi^2$  содержит не только множество рассматриваемых в работе решений, но и некоторую его окрестность (схематично она показана красной штриховкой на рисунке).

В предыдущих работах было показано, что эта окрестность мала и мы можем ей пренебречь. Однако в данном случае, в силу особенностей поведения степенного спектра инжекции, это не всегда так.

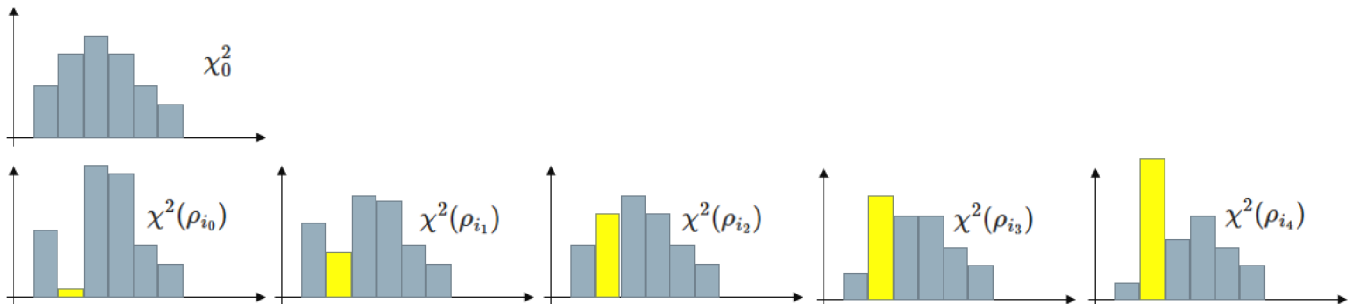
Построенное нами множество решений охватывает все геометрически различные профили плотности. Таким образом задаваясь, например, вопросом о поиске самого пространственно протяжённого или напротив самого компактного профиля плотности мы смело можем его использовать и конструктивно приводить примеры. Однако задаваясь вопросом, например, о верхней оценке на плотность в каждой из областей мы можем воспользоваться другим более точным методом.

## Верхняя оценка плотности источников.

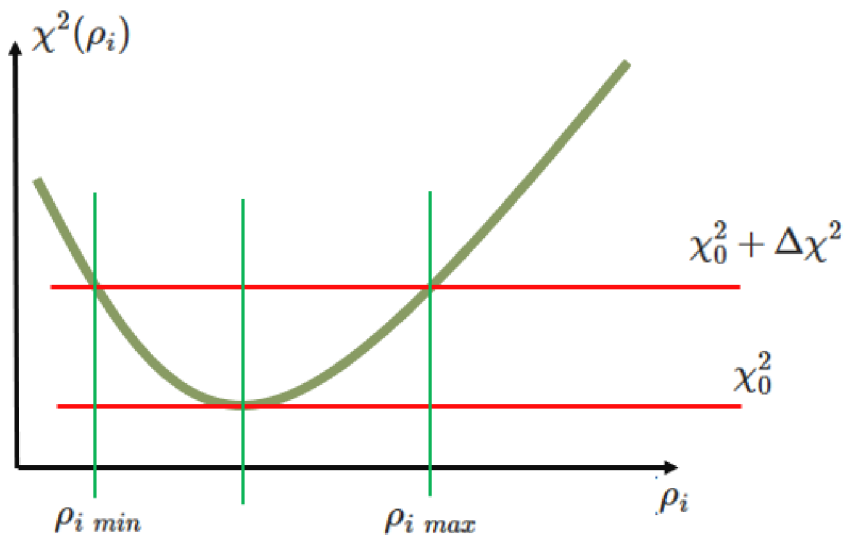
Получим точную верхнюю оценку на плотность источников в каждой из областей при условии, что профиль плотности соответствует значению  $\chi^2 < \chi_0^2 + \Delta\chi^2$ .

Используя все доступные области построим наилучший профиль плотности. Далее рассмотрим  $i$ -тую область. Построим оптимальный профиль плотности, при условии, что значение плотности в рассматриваемой области фиксировано, то есть заранее вычтем исходящие от неё спектры из наблюдаемых и разложим то что осталось по спектрам оставшихся областей. Получим  $\chi^2(\rho_i) > \chi_0^2$ .

(Схематично это показано на рисунке)



Далее построим график зависимости  $\chi^2(\rho_i)$ . Отметим на нём уровни  $\chi^2 < \chi_0^2$  и  $\Delta\chi^2$ . По точкам пересечения определим минимальное и максимальное значение плотности в рассматриваемой области (смотри рисунок).



Таким образом мы можем точно установить, что если  $\rho_i < \rho_{i \min}$  или  $\rho_i > \rho_{i \max}$ , то профиля плотности удовлетворяющего  $\chi^2 < \chi_0^2 + \Delta\chi^2$  не существует. В противном случае, мы можем его построить.

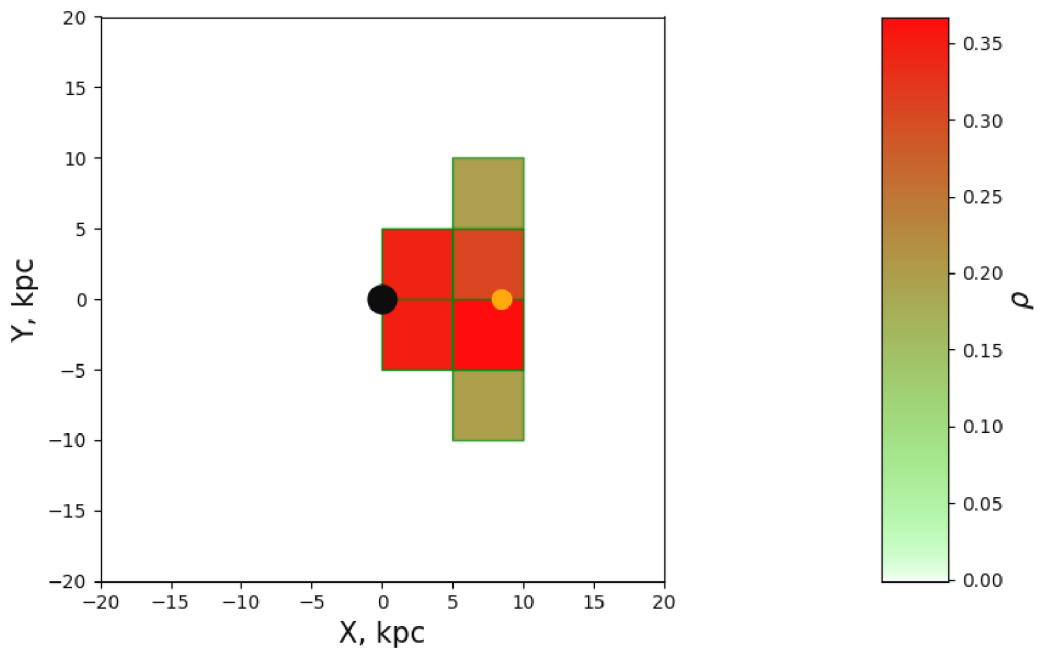
Аналогичная процедура применяется в статистике для определения доверительного интервала величины с помощью построения графика уровня значимости (p-value) от этой величины, за тем исключением, что в данном случае  $\chi^2$  не несёт статистического смысла.

Продельывая эту процедуру для каждой области мы строим верхнюю оценку на плотность источников.

## Результаты

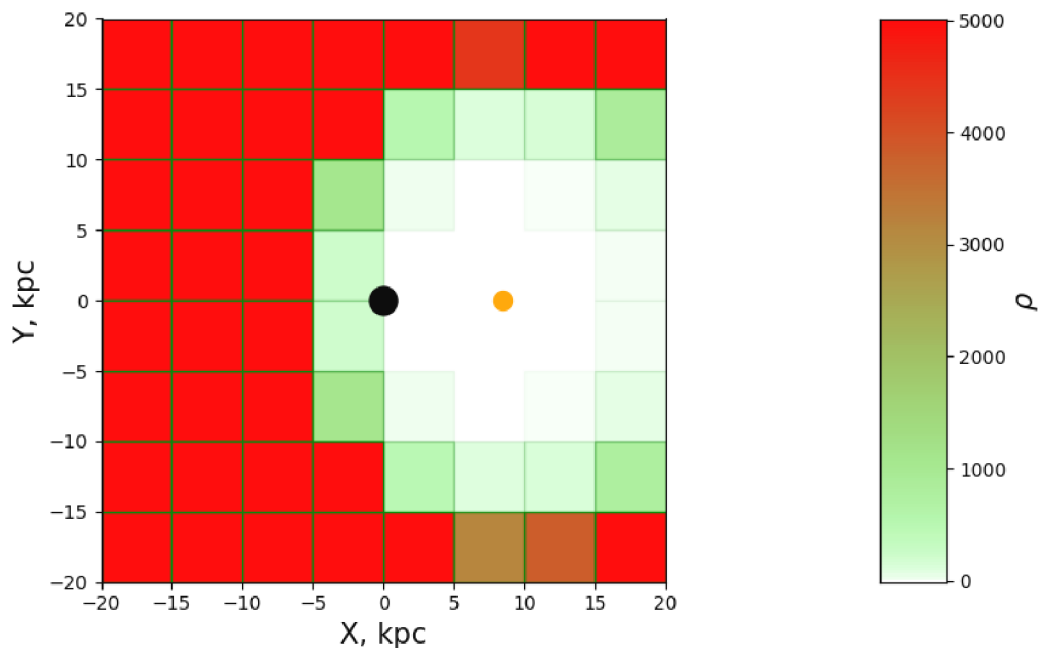
Рассматривалась тонкая область лежащая в плоскости галактики с координатами  $x, y \in [-20 \text{ kpc}, +20 \text{ kpc}]$  и толщиной  $0.6 \text{ kpc}$  (некоторая минимальная толщина, необходима для корректной работы GALPROP), разбитая на  $8 * 8 = 64$  одинаковых квадрата со стороной  $5 \text{ kpc}$ . Значение  $\Delta\chi^2$  зафиксировано на 20% от  $\chi_0^2$ .

Для начала построим наиболее компактный (с точностью до зеркальных отражений) вариант профиля плотности. На представленном рисунке  $x$  и  $y$  - галактические координаты в килопарсеках, чёрная точка указывает положение центра галактики, оранжевая точка соответствует положению солнечной системы:



Представленный на рисунке профиль удовлетворительно описывает данные. При этом мы видим, что добиться этого можно задействовав лишь несколько областей лежащих между наблюдателем и центром галактики.

Теперь построим верхнюю оценку плотности источников (обозначения на рисунке аналогичны, ярко красные участки отвечают плотности превосходящей 5000):



Здесь видно, что достаточно строгую оценку можно получить лишь в небольшом количестве областей вблизи наблюдателя. Для прочего обширного

пространства галактики (красная область) получаемая оценка столь высока, что физически и вовсе не может считаться ограничением.

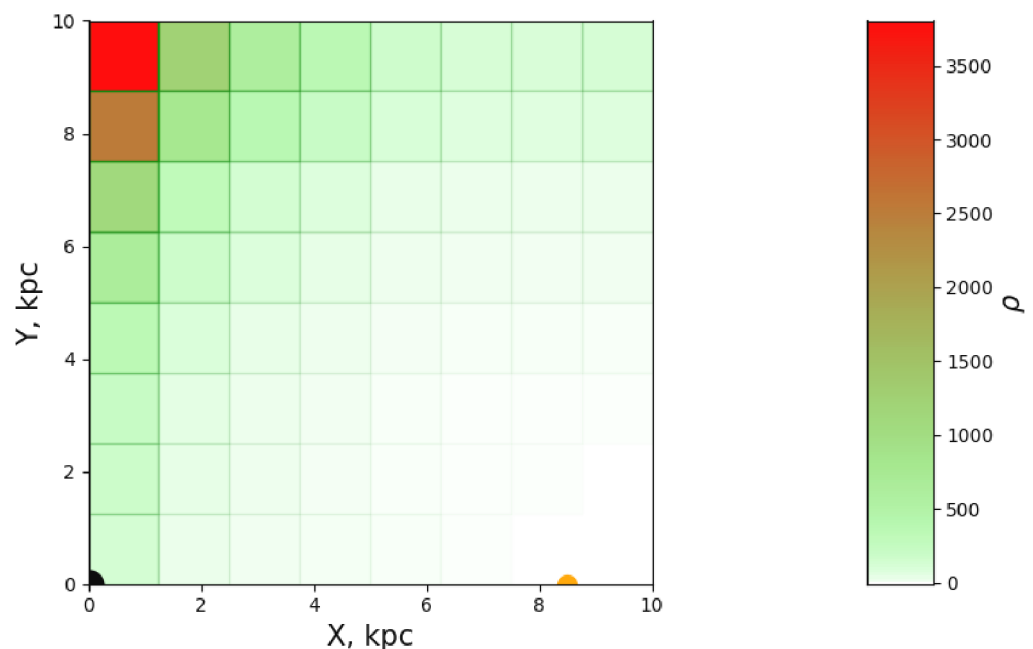
Сравнивая эти два результата можно сделать вывод о том, что сами по себе данные о спектрах космических позитронов и гамма излучения позволяют делать вывод о структуре пространственного распределения лишь на небольшом участке галактики вблизи наблюдателя. Выбор плотности на остальном пространстве до некоторой степени остаётся произвольным.

Следует так же сказать, что полученный вывод специфичен для степенного спектра источников. В предыдущих работах, где в качестве источников рассматривались аннигилирующие частицы тёмной материи с соответствующим спектром инжекции подобной ситуации не наблюдалось.

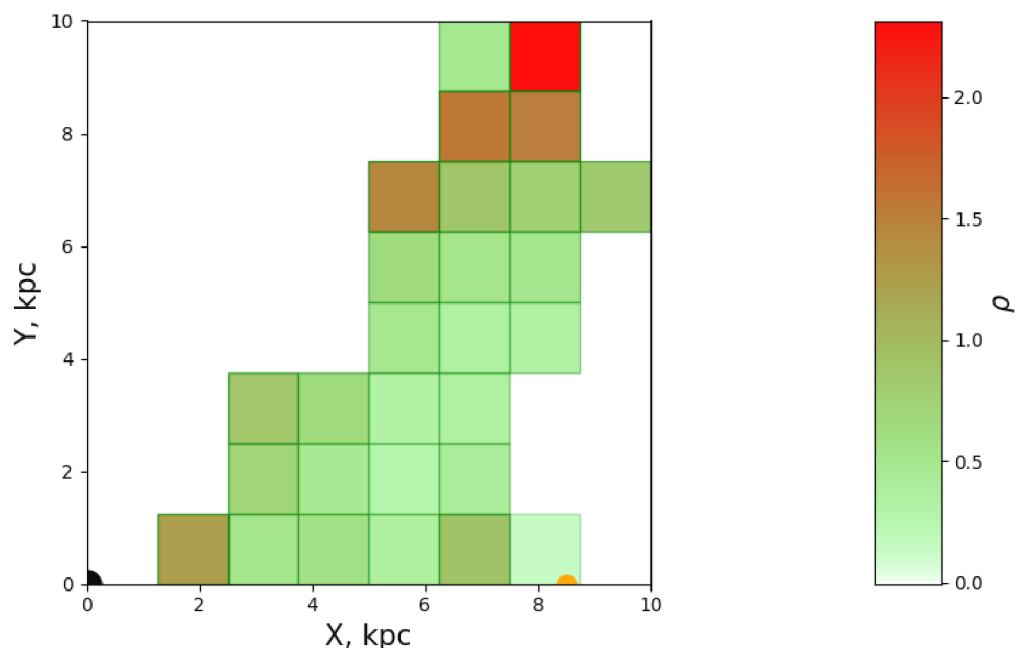
Нам остаётся только отбросить ту область, выводы о которой нам недоступны и детализировать ту область в которой источники необходимы и при этом хорошо ограничены сверху.

На данном этапе рассматривалась тонкая область лежащая в плоскости галактики с координатами  $x, y \in [0 \text{ kpc}, +10 \text{ kpc}]$  и толщиной  $0.6 \text{ kpc}$ , разбитая на  $8 * 8 = 64$  одинаковых квадрата со стороной  $1,25 \text{ kpc}$ . Значение  $\Delta\chi^2$  также зафиксировано на 20% от  $\chi_0^2$ .

Здесь можно привести более строгую верхнюю оценку (смотри рисунок, обозначения аналогичны).



Также стоит отметить, что на такой области хорошо работает конструктивный подход к поиску множества решений (не учитываемая окрестность найденного множества становится мала). Таким образом задаваясь оптимизацией некоторого условия накладываемого на профиль, например гладкости, мы можем конструировать профиль как комбинацию базисный профилей, описанным ранее методом. На следующем рисунке приведён пример такого профиля.



## Заключение

Данная работа была посвящена поиску пространственного распределения источников излучения для объяснения избытка позитронов в космических лучах.

Рассматривались источники со степенным спектром инжекции позитронов.

Была произведена доработка функционала программного обеспечения, использующегося при моделировании.

Были разработаны подходы, позволяющие на основе методов линейной алгебры находить оптимальное пространственное распределение на основе экспериментальных данных, строить параметризованное множество решений, а так же получать верхние оценки на допустимую плотность источников.

Целью данной работы было развитие созданной ранее методологии, а также выявление особенностей связанных с использованием степенных спектров

инжекции, вместо спектров от аннигиляции частиц тёмной материи, которые рассматривались ранее.

Среди таких особенностей, ключевым является вывод о том, что имеющиеся данные о позитронной аномалии не позволяют делать однозначных выводов о пространственной структуре источников на большей части пространства галактики.

Грубо и качественно это обстоятельство можно объяснить следующим наблюдением. Позитроны замедляются проходя расстояние от источника до наблюдателя. Таким образом при рассмотрении спектров аннигиляции частиц тёмной материи мы получаем явное смещение пика влево на наблюдаемом спектре при удалении источника, в то время как степенной спектр практически переходит в себя с точностью до константы.

Работа показывает, что реконструкция пространственного распределения всё таки возможна на небольшом участке около наблюдателя. Однако в целом рассмотрение степенных спектров требует дополнительных, более жёстких ограничений.

## **Список использованных источников**

1. Aguilar, M. et al. The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II — Results from the first seven years. *Physics Reports* 894. The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the International Space Station: Part II - Results from the First Seven Years, 1–116. issn: 0370-1573 (2021).
2. Ackermann, M. et al. The spectrum of isotropic diffuse gamma-ray emission between 100 MeV and 820 GeV. *Astrophys. J.* 799, 86. arXiv: 1410.3696 [astro-ph.HE] (2015).
3. GALPROP (Электронный ресурс) The GALPROP code for cosmicray transport and diffuse emission production.
4. Bro, R. & De Jong, S. A fast non-negativity-constrained least squares algorithm. *Journal of Chemometrics* 11, 393–401 (1997).
5. Adriani, O. et al. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5-100 GeV. *Nature* 458 (2009).
6. Aguilar, M. et al. First Result from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station: Precision Measurement of the Positron Fraction in

- Primary Cosmic Rays of 0.5-350 GeV. *Phys. Rev. Lett.* 110, 141102 (2013).
7. Accardo, L. et al. High Statistics Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5–500 GeV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station. *Phys. Rev. Lett.* 113, 121101 (2014).
  8. Belotsky, K., Budaev, R., Kirillov, A. & Laletin, M. Fermi-LAT kills dark matter interpretations of AMS-02 data. Or not? *JCAP* 1701, 021. arXiv: 1606.01271 [astro-ph.HE] (2017).
  9. Alekseev, V. V. et al. High-energy cosmic antiparticle excess vs. isotropic gamma-ray background problem in decaying dark matter Universe. *J. Phys. Conf. Ser.* 675, 012023 (2016).
  10. Belotsky, K. M., Kirillov, A. A. & Solovyov, M. L. Development of dark disk model of positron anomaly origin. *Int. J. Mod. Phys. D27*, 11. arXiv: 1802.04678 [astro-ph.HE] (2018).
  11. Belotsky, K., Kamaletdinov, A., Laletin, M. & Solovyov, M. The DAMPE excess and gamma-ray constraints. *Phys. Dark Universe* 26, 100333. arXiv: 1904.02456 [astro-ph.HE] (2019).
  12. Solovyov, M. L., Rakhimova, M. A. & Belotsky, K. M. The “Dark disk” model in the light of DAMPE experiment. *Bled Workshops in Physics* 21, 156–161. arXiv: 2011.04425 [astro-ph.HE] (2020).
  13. Constraining positron emission from pulsar populations with AMS-02 data arXiv:2107.06300v2