

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 ОЦЕНКА ДОЛИ ПОЗИТРОНОВ И ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ В КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

Студент \_\_\_\_\_ Ф. В. Костромин

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

Москва 2024

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>2</b>
<b>1 Описание используемых вычислительных средств</b>	<b>3</b>
<b>2 Модель</b>	<b>4</b>
<b>3 Результаты</b>	<b>11</b>
<b>Заключение</b>	<b>14</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>15</b>

# 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 электронов 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 [1]. В дальнейшем это наблюдение было подтверждено на эксперименте AMS02 [2], а также в данных DAMPE. На данный момент позитронная аномалия не имеет общепризнанного объяснения. Одним из возможных объяснений позитронной могут служить модели нестабильной скрытой массы (тёмной материи) в качестве источника первичных позитронов. Основным недостатком таких моделей является перепроизводство гамма-излучения в процессе распада или аннигиляции частиц скрытой массы [3]. Одним из возможных путей решения данной проблемы является изменение пространственного распределения источников. В данной работе рассчитывались потоки позитронов и гамма излучения в космических лучах от источников, распределённых симметрично относительно центра нашей Галактики. Начата работа по поиску оптимальных параметров для описания позитронной аномалии.

# 1. ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Для моделирования распространения заряженных частиц в Галактике использовался программный пакет GALPROP [4], модифицированный на кафедре для возможности задания произвольных начальных спектров в виде таблиц и использования нестандартных профилей плотности скрытой массы.

GALPROP решает уравнение переноса для диффузии космических лучей в Галактике с заданным распределением источников и граничными условиями для всех видов космических лучей. При этом программа включает в себя как можно больше актуальных астрофизических данных.

Результатом работы GALPROP'а является набор файлов в формате FITS, представляющих из себя многомерные массивы с информацией по потокам заряженных частиц в Галактике. Для извлечения из них необходимых данных, дальнейшего их анализа и построения необходимых графиков использовался математический пакет Wolfram Mathematica.

Mathematica также использовалась для подсчёта интегралов по объёму в котором распределены источники для определения первичного гамма излучения.

Mathematica — система компьютерной алгебры, широко используемая для научных, инженерных, математических расчётов. Она оснащена широким перечнем аналитических возможностей, среди которых упрощение выражений, интегрирование, решение дифференциальных, уравнений и прочее, осуществление численных расчётов.

## 2. МОДЕЛЬ

Предполагается, что скрытая масса состоит из специальных частиц, которые способны распадаться или аннигилировать с образованием позитронов.

В данной работе рассматривалась аннигиляция по трём каналам:

$$X\bar{X} \rightarrow e^+e^-$$

$$X\bar{X} \rightarrow \tau^+\tau^-$$

$$X\bar{X} \rightarrow \mu^+\mu^-$$

В качестве первого приближения рассматривалась упрощенная двумерная модель распределения скрытой массы симметричная относительно центра галактики.

Профиль плотности для этого приближения был предложен в виде:

$$\rho(r, z) = \rho_0(r)e^{-\frac{|z|}{Zc}},$$

где  $r$  и  $z$  - цилиндрические галактические координаты;  $Zc = 0.1$  — параметр толщины. А  $\rho_0(r)$  - произвольная функция, поиску которой и посвящена данная работа.

Скорость реакции для моделирования определлась параметром  $\langle\sigma v\rangle = 10^{-23}\frac{cm^3}{s}$ , масса частицы тёмной материи взята  $M = 1800GeV$ .

Перейдём к поиску  $\rho_0(r)$ . Предположим, что  $r \in [0, 20kpk]$ . Разобьём этот промежуток на отрезки по  $0.1kpk$ , и рассмотрим множество профилей плотности ( $n \in [0, 200]$ ):

$$\rho_n(r, z) = \begin{cases} e^{-\frac{|z|}{Zc}}, & r \in [0.1n; 0.1(n+1)] \\ 0, & r \notin [0.1n; 0.1(n+1)] \end{cases}$$

Galprop позволяет нам смоделировать потоки позитронов от каждого из этих колец для  $e$ ,  $\mu$   $\tau$  распадов:

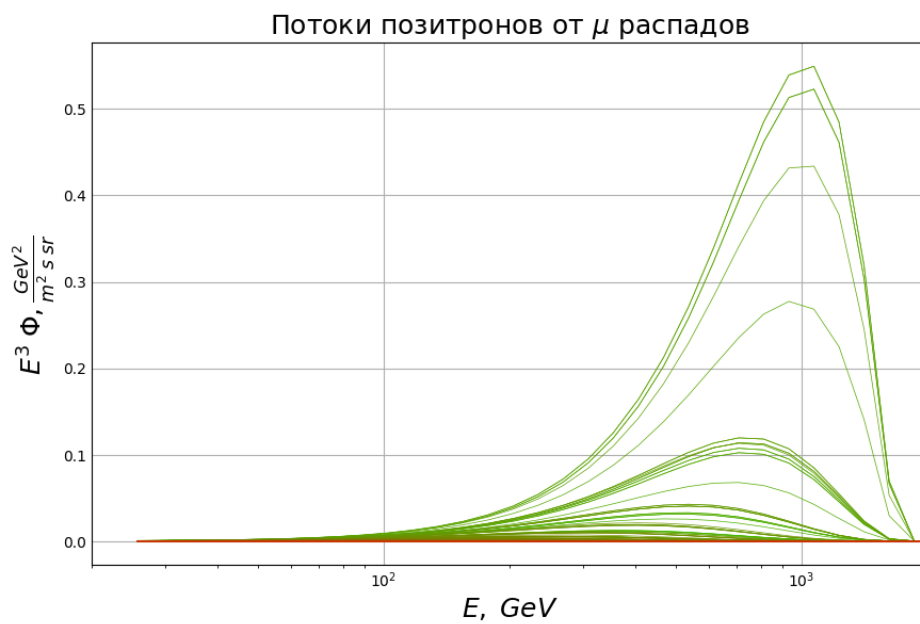
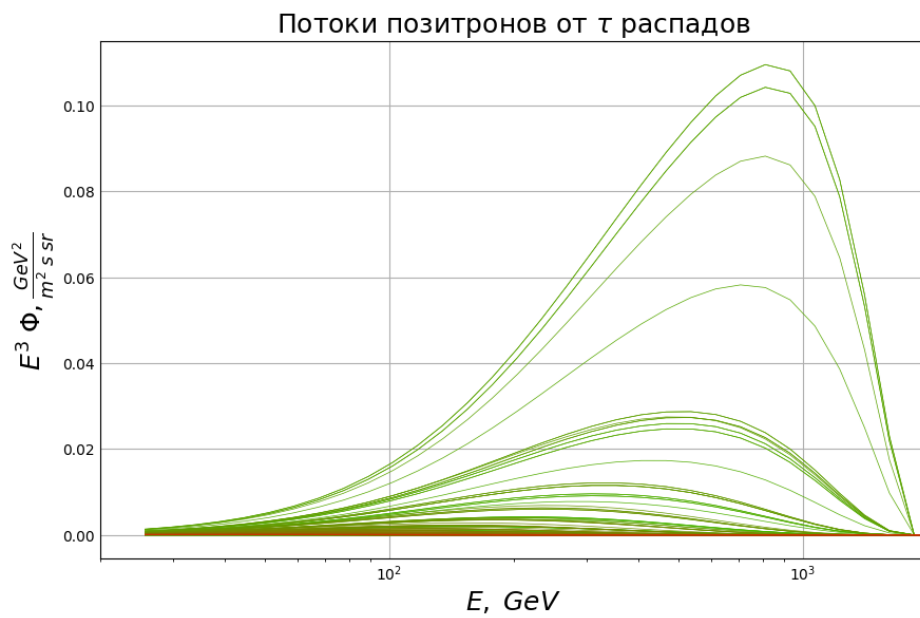


Рисунок 2.1 — Спектры позитронов от единичных колец различного радиуса

Также с помощью Galprop можно получить потоки вторичного гамма излучения:

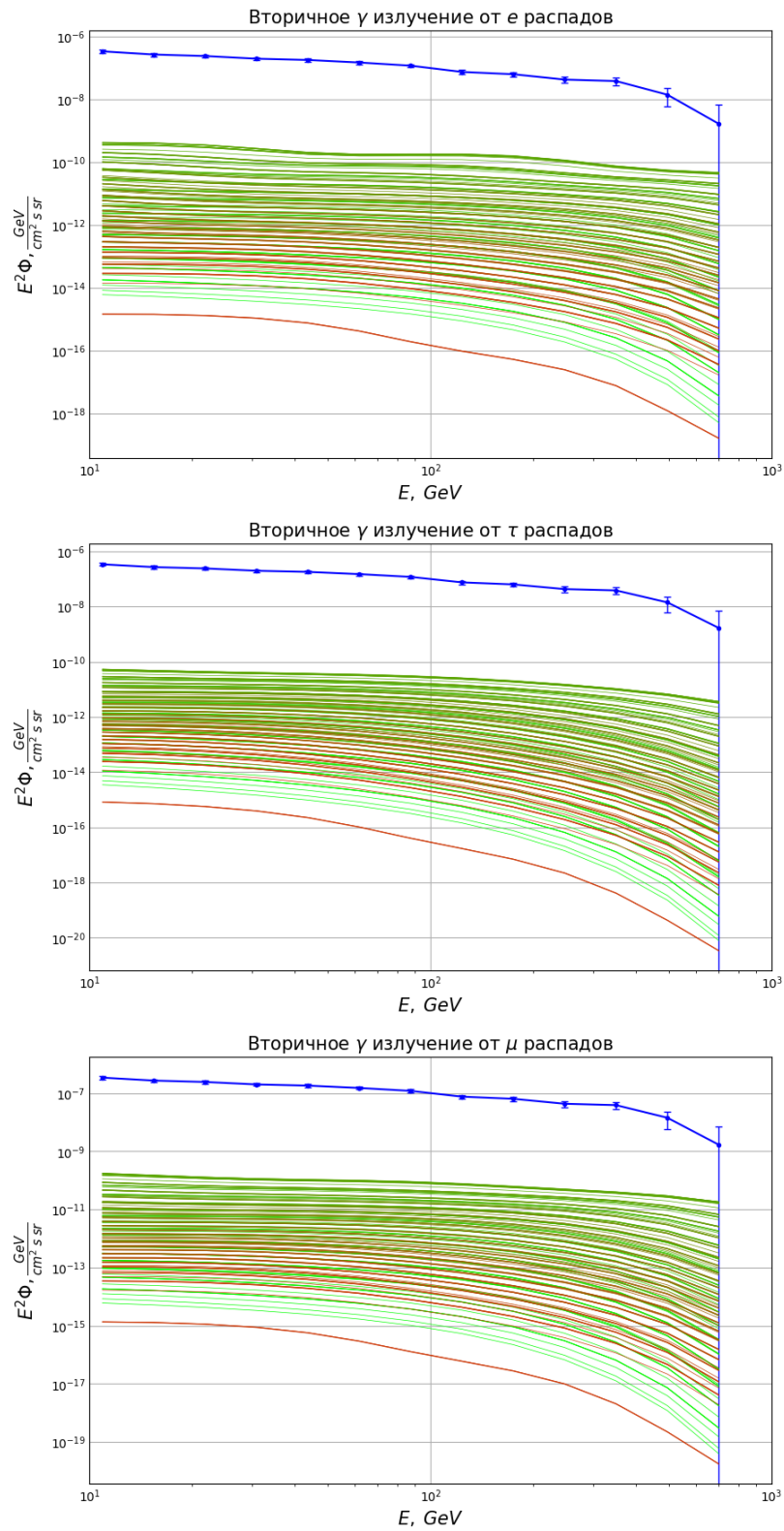


Рисунок 2.2 — Вторичное  $\gamma$  излучение от единичных колец различного радиуса

Первичное гамма излучение может быть рассчитано по формуле:

$$\Phi = \frac{dN}{dE} \frac{\langle \sigma v \rangle}{4} \frac{1}{\Delta\Omega} \int \frac{1}{4\pi r^2} \frac{\rho^2}{M^2} dV$$

$$\Phi = \underbrace{\frac{dN}{dE}} \underbrace{\frac{\langle \sigma v \rangle}{4} \frac{1}{\Delta\Omega} \frac{1}{4\pi M^2}} \underbrace{\int \frac{\rho^2}{r^2} dV}$$

Первый выделенный множитель - спектр от единичной реакции аннигиляции:

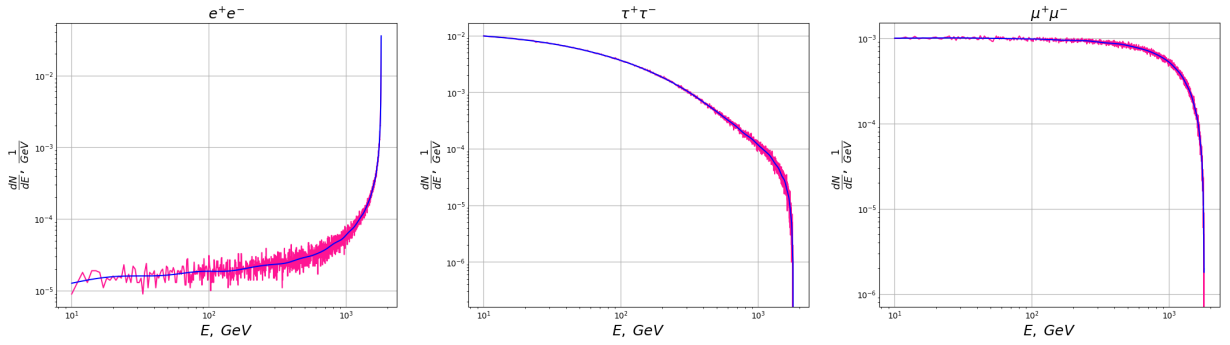


Рисунок 2.3 — Спектры единичной реакции аннигиляции

На рисунке 2.3 синей линией показан сглаженный спектр, используемый в дальнейших расчётах.

Второй выделенный множитель - числовой коэффициент рассчитанный для указанных выше параметров.  $\Delta\Omega$  - область для которой угол с галактическим горизонтом составляет  $> 20$  (та область для которой будет производиться сравнение с экспериментальными данными).

Третий выделенный множитель - интеграл представляющий из себя коэффициент различный для каждого кольца. Он был рассчитан с помощью Wolfram Mathematica:



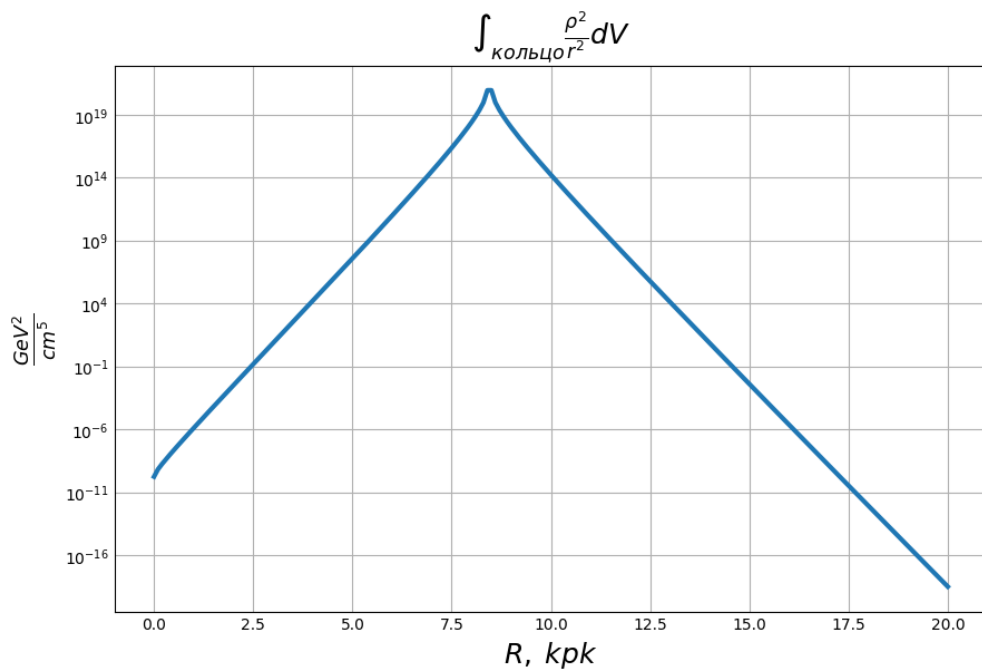
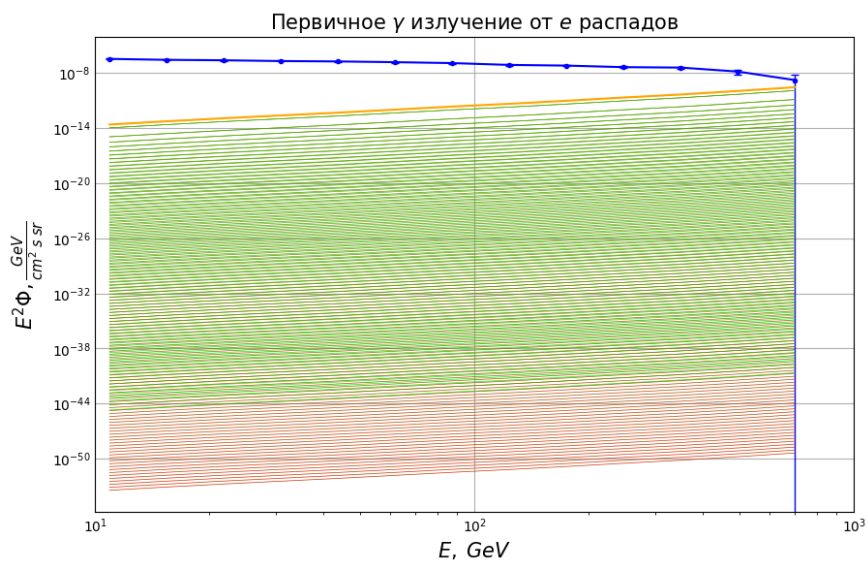


Рисунок 2.4 — Зависимость интеграла от радиуса кольца

Таким образом первичное излучение от колец:



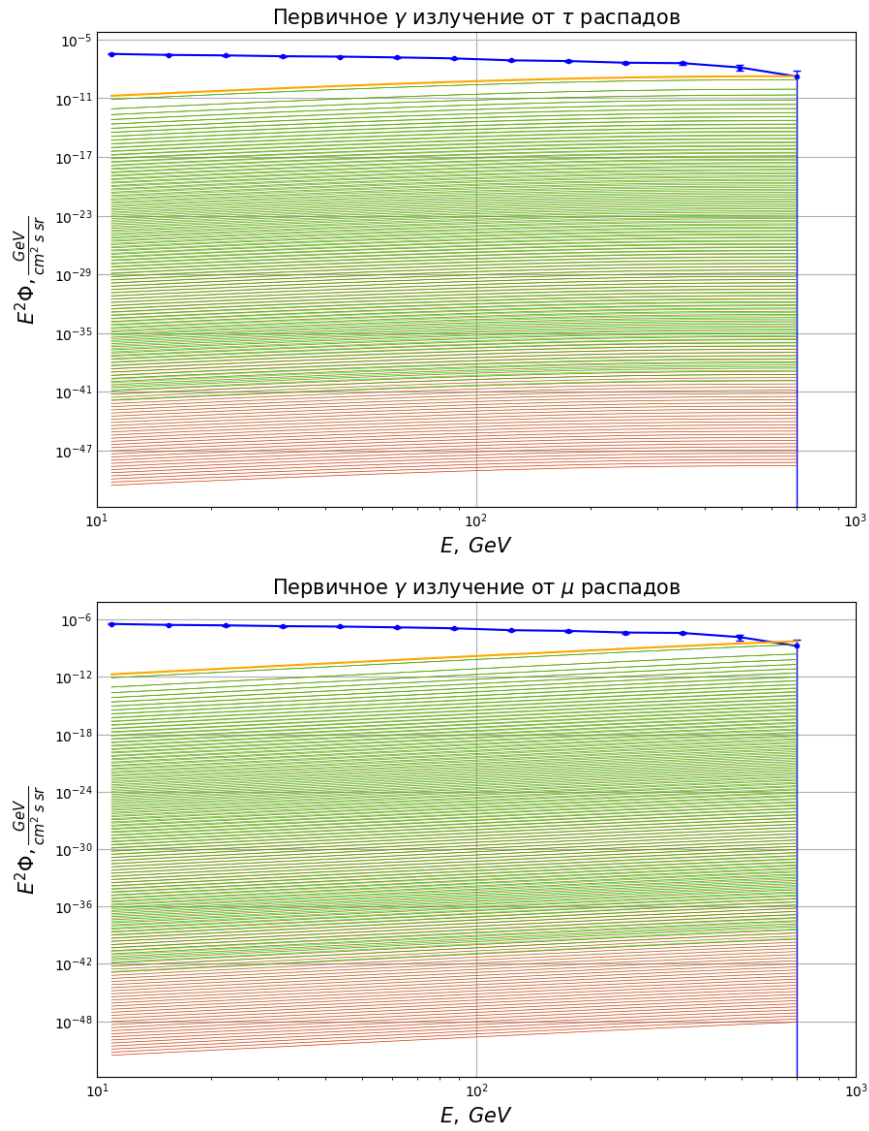


Рисунок 2.5 — Зависимость интеграла от радиуса кольца

Теперь, мы можем зафиксировать вероятности распада по рассматриваемым каналам реакции  $Br_e Br_\tau Br_\mu$  и просуммировать излучение от отдельных колец с некоторыми коэффициентами так, чтобы суммарное излучение наилучшим образом описывало экспериментальные данные. Тогда использованные коэффициенты определяют итоговый профиль плотности. Рассматривать полученные спектры будем лишь при тех значениях энергии для которых имеем экспериментальные данные. Следовательно работать будем с наборами чисел - векторами, линейная комбинация которых должна дать нам искомые точки.

Наши вектора следует обезразмерить и привести к "общему для позитронов и гамма знаменателю" разделив каждое значение в них на соответствующую погрешность экспериментальной точки. Тогда задача перейдет в об-

ласть линейной алгебры и сведётся к отысканию проекции результирующего вектора на линейное подпространство образованное векторами полученными от каждого кольца. При этом квадрат модуля разности искомого вектора и этой проекции сразу даст нам минимально возможное значения выражения:

$$\sum_{datapoints} \frac{\Delta\Phi_{e^+}^2}{\sigma_e^2} + \sum_{datapoints} \frac{\Delta\Phi_\gamma^2}{\sigma_\gamma^2}$$

Проблема описанного метода состоит в том, что, во-первых, мы ищем разложение только по положительным коэффициентам, во-вторых, гамма излучение мы не хотим воссоздать точно, а хотим лишь не превысить и следовательно минимизировать должны не приведённое выше выражение, а

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

Однако обе эти проблемы удалось решить незначительными изменениями стандартных алгоритмов.

Следует отметить, что минимизируемое выражение квадратично зависит от всех параметров и как следствие применимо к этой задаче хорошо работает обычный метод градиентного спуска, однако он не сможет дать точного ответа за конечное число шагов и потребует большего времени вычислений.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Проделав изложенный вычисления удалось получить минимальное для нашей модели возможное значение  $\chi^2$ , как функцию от трёх параметров  $Br_e$ ,  $Br_\tau$ ,  $Br_\mu$  (на самом деле от двух, т. к.  $Br_e + Br_\tau + Br_\mu = 1$ ):

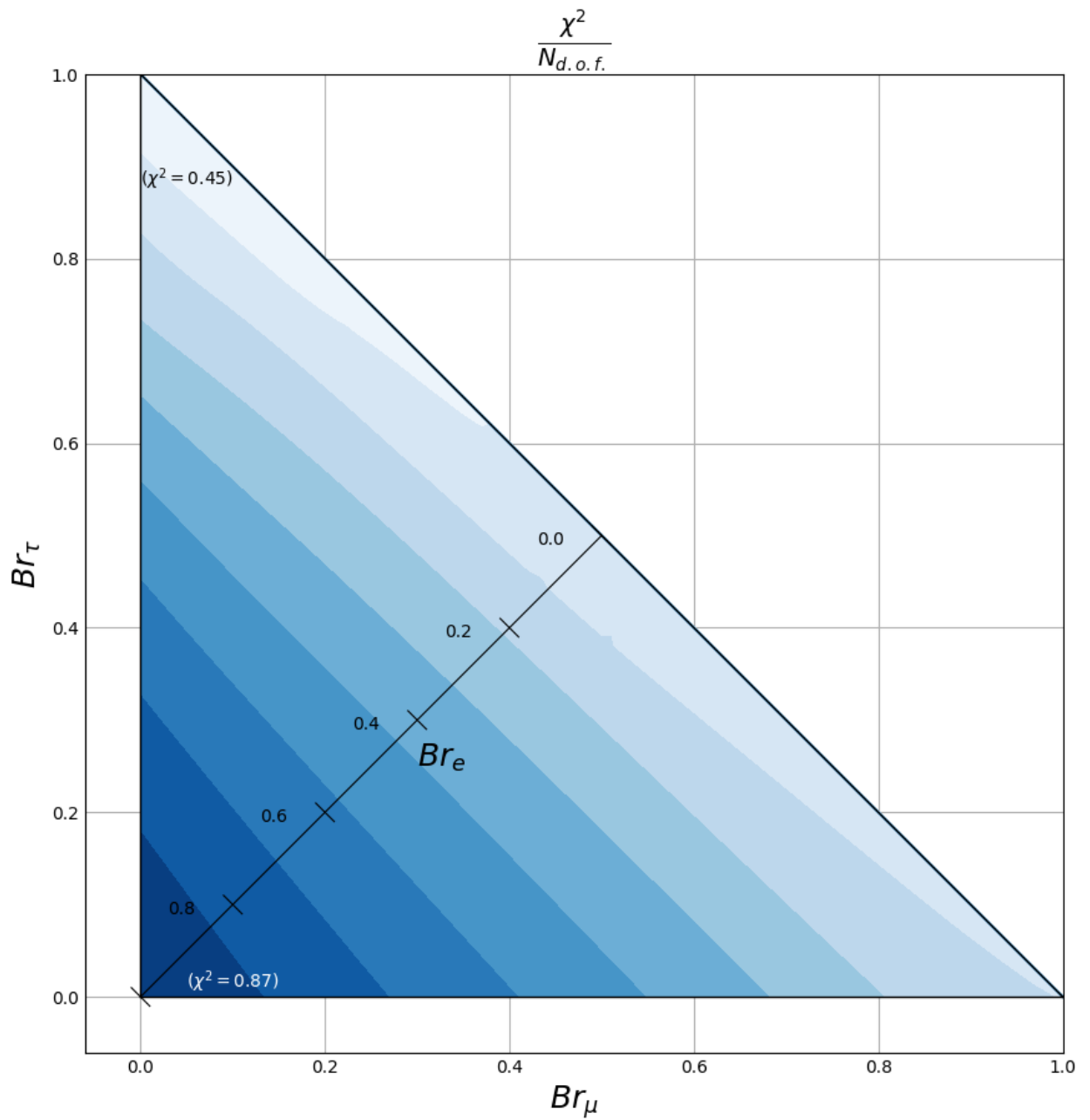


Рисунок 3.1 — Зависимость  $\chi^2$  от вероятностей каналов аннигиляции

По ней видно, что  $\chi^2$  растёт с ростом  $Br_e$  (наклонная ось). Приведу

результаты для  $Br_e = 0$   $Br_\tau = 1$   $Br_\mu = 0$  ( $\frac{\chi^2}{N_{d.o.f.}} = 0.45$ ):

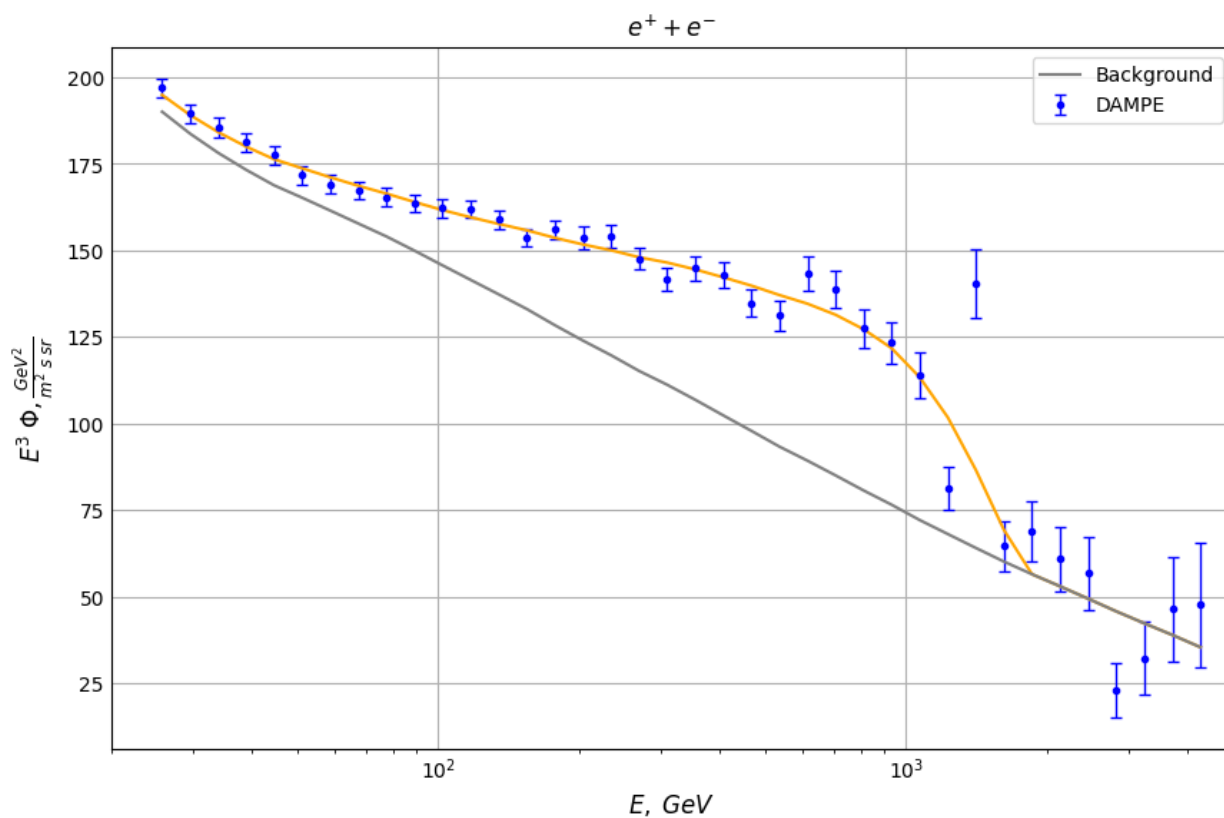


Рисунок 3.2 — Полученный позитронный спектр

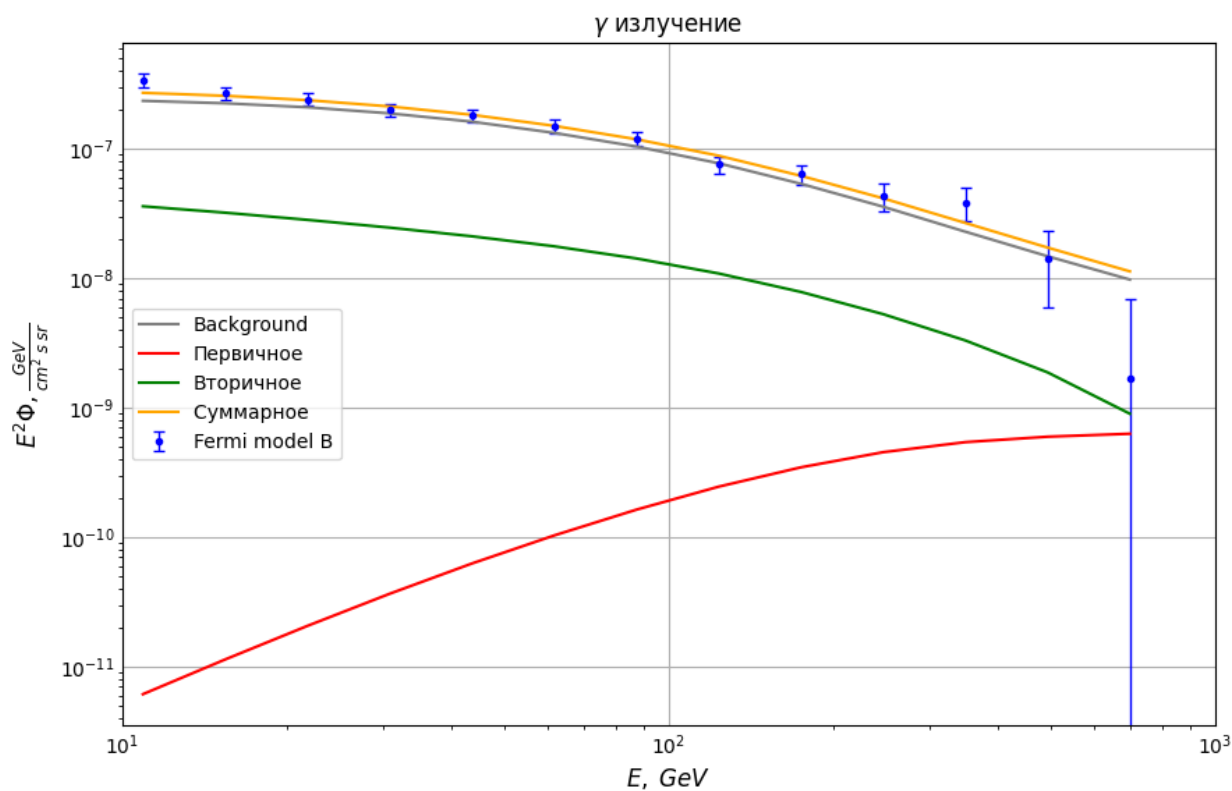


Рисунок 3.3 — Полученный  $\gamma$  спектр

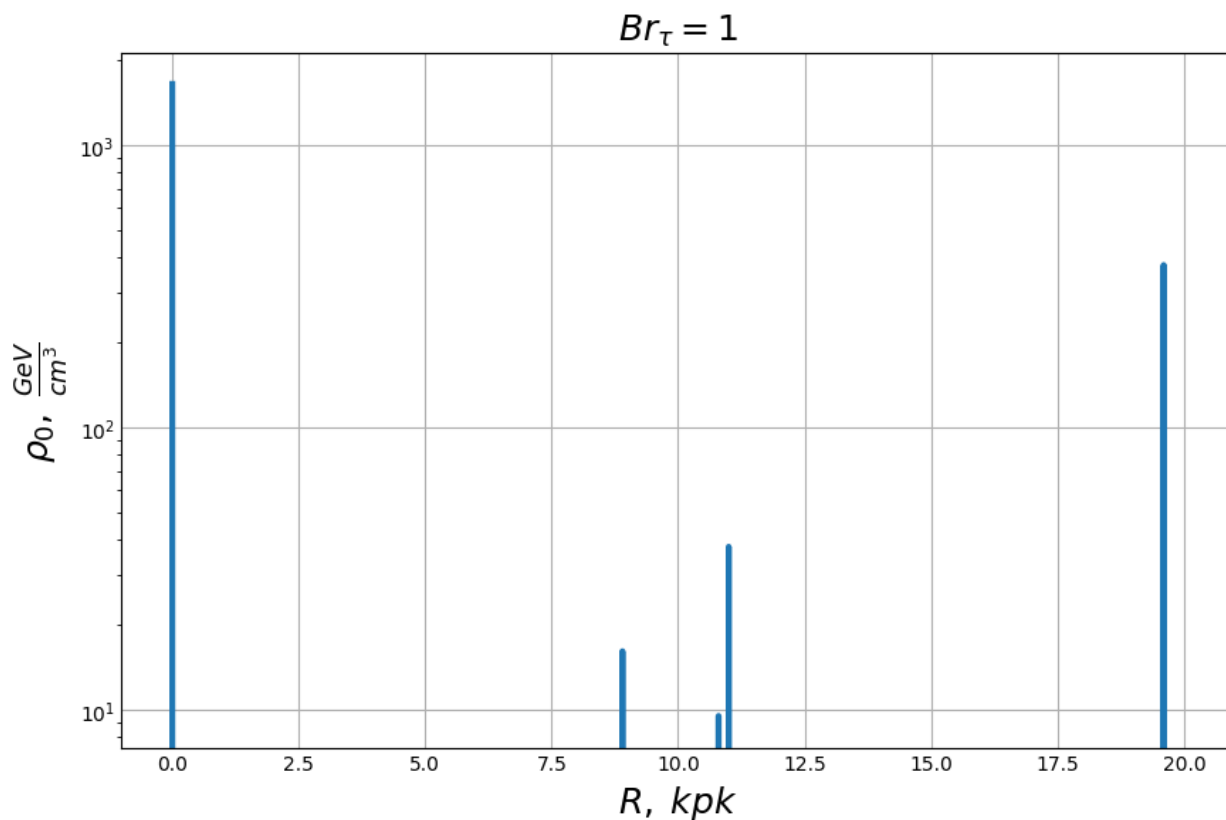


Рисунок 3.4 — Полученное распределение по радиусу

Полученный профиль состоит из отдельных источников, часть из которых расположена вблизи земли и позволяет описать высокие энергии, часть - на значительном удалении позволяет описать низкие энергии.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был рассмотрен профиль плотности произвольно изменяющийся вдоль радиуса галактики. Рассмотрены потоки позитронов и гамма излучения. Найдены оптимальные параметры для различных каналов каннигиляции

В дальнейшем планируется рассмотреть частицы тёмной материи с различной массой, усложнить пространственное распределение.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *O. A.* An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5-100GeV // *Nature*. — 2009. — Vol. 458, no. 7238. — P. 607– 609. — arXiv: 0810.4995 [astro-ph]. —
2. *M. A.* 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.* — 2013. — Vol. 110. — P. 141102. —
3. *K. B.* Fermi-LAT kills dark matter interpretations of AMS-02 data. Or not? // *JCAP*. — 2017. — Vol. 1701, no. 01. — P. 021. — arXiv: 1606.01271 [astro-ph.HE]. —
4. GALPROP (Электронный ресурс). — The GALPROP code for cosmic-ray transport and diffuse emission production.