

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

УДК 539.12.01

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХПОЗИТРОННОЙ МОДЫ РАСПАДА  
ЧАСТИЦ СКРЫТОЙ МАССЫ

Научный руководитель  
д.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ К. М. Белоцкий

Студент

\_\_\_\_\_ Я. А. Басов

Москва, 2024

# СОДЕРЖАНИЕ

|                   |   |
|-------------------|---|
| Введение          | 3 |
| Построение модели | 4 |
| Моделирование     | 5 |
| Заключение        | 7 |

# ВВЕДЕНИЕ

Избыток позитронов в космических лучах, впервые обнаруженный экспериментом PAMELA [1] и в дальнейшем нашедший подтверждение в данных экспериментов AMS-02 и Fermi-LAT [2; 3], все еще остается без общепризнанного объяснения. Наиболее многообещающим предположением о природе так называемой позитронной аномалии является существование ранее неизвестных источников первичных позитронов, самыми популярными кандидатами в которые являются пульсары и скрытая масса. Однако существующие модели имеют существенную проблему с производством сопутствующего гамма-излучения.

В данной работе проводится поиск возможного решения проблемы позитронной аномалии путем рассмотрения подавления гамма-излучения в модели с двухпозитронной модой распада частиц скрытой массы. Такой распад может приводить к подавлению гамма-излучения за счет получения в конечном состоянии одинаково заряженных или же тождественных частиц (принципа запрета Паули) [4]. В работе рассматриваются следующие возможные случаи массивных частиц скрытой массы: векторный незаряженный бозон, векторный заряженный бозон (заряд  $+2$ ), скалярный незаряженный бозон, скалярный заряженный бозон (заряд  $+2$ ). В ходе работы планируется проверка результатов исследования распада той же моды [5].

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

В работе были рассмотрены следующие возможные случаи массивных частиц ТМ: скалярный незаряженный бозон, скалярный заряженный бозон (заряд +2), векторный незаряженный бозон, векторный заряженный бозон (заряд +2). Для этих случаев написаны соответствующие лагранжианы, включающие члены, описывающие двухпозитронную моду распада частицы X:

$$\mathcal{L}_{Scalar,real} = \frac{1}{2}\partial_\mu X \partial^\mu X - \frac{1}{2}M_X^2 X^2 - \bar{\psi} X \psi, \quad (1)$$

$$\mathcal{L}_{Scalar,complex} = \partial_\mu X^+ \partial^\mu X - M_X^2 X^+ X - \bar{\psi} X^+ \psi^C - \bar{\psi}^C X \psi, \quad (2)$$

$$\mathcal{L}_{Vector,real} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \frac{1}{2}M_X^2 X_\mu X^\mu - \bar{\psi} \gamma^\mu X_\mu \psi, \quad (3)$$

$$\mathcal{L}_{Vector,complex} = -\frac{1}{2}F_{\mu\nu}^+ F^{\mu\nu} + M_X^2 X_\mu^+ X^\mu - \bar{\psi} \gamma^\mu X_\mu^+ \psi^C - \bar{\psi}^C \gamma^\mu X_\mu \psi, \quad (4)$$

где  $M_X$  – масса частицы X, равная 1000 ГэВ,  $X$  – волновая функция частицы X,  $\psi$  – волновая функция лептонов.

Создание расширений Стандартной модели, предполагающих существование рассмотренных частиц, было произведено с помощью программы FeynRules. За основу была выбрана Стандартная модель, установленная в FeynRules. В качестве входных данных использовались соответствующие лагранжианы частиц скрытой массы X и их взаимодействий, заданных формулами (1-4), масса частицы X – 1000 ГэВ, спин 0 или 1 и заряд частицы 0 или +2.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование распада частицы  $X$  в электроны, позитроны и фотоны производилось в программах CompHEP и MadGraph 5, использующих файлы моделей, созданные в программе FeynRules. Были рассмотрены следующие моды распада:

$$X_{scalar}^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma, X_{scalar}^{++} \rightarrow e^+ + e^+ + \gamma,$$

$$X_{vector}^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma, X_{vector}^{++} \rightarrow e^+ + e^+ + \gamma,$$

Обе программы являются Монте-Карло генераторами, что позволяет получить более достоверные результаты при генерации большего количества событий. Обработка результатов моделирования производилась с помощью фильтра Савицкого и Голея, метода наименьших квадратов.

Было произведено моделирование двухпозитронных мод распада четырех видов частиц как с фотоном в конечном состоянии, так и без него. Во втором случае ширина распада рассчитывалась аналитически в программе CompHEP и численно в программе MadGraph 5. Полученные значения приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Ширины распадов вида  $X \rightarrow e + e$

| Вид частицы                   | Скаляр, 0 | Скаляр, +2 | Вектор, 0 | Вектор, +2 |
|-------------------------------|-----------|------------|-----------|------------|
| Ширина распада $\Gamma$ , ГэВ | 39,79     | 19,89      | 26,53     | 13,26      |

Для оценки количества гамма-излучения были построены соответствующие зависимости величины  $Br$  от энергии фотона в конечном состоянии:

$$Br = \frac{d\Gamma_{X \rightarrow ee\gamma}^{(1)}/dE}{d\Gamma_{X \rightarrow ee\gamma}^{(2)}/dE} \cdot \frac{\Gamma_{X \rightarrow ee}^{(2)}}{\Gamma_{X \rightarrow ee}^{(1)}} \quad (5)$$

Были рассмотрены бозонные двухпозитронные моды распадов и построены распределения по энергиям частиц в их конечных состояниях. Были попарно сравнены векторные, скалярные, заряженные и незаряженные моды распадов. Графики зависимости по энергиям отношения энергетических спектров различных мод приведены на рисунке 1. Была замечена малая разница в рассмотренных модах распада. Получено, что в случае скалярной двухпозитронной моды наблюдается наименьшее количество гамма-излучения.

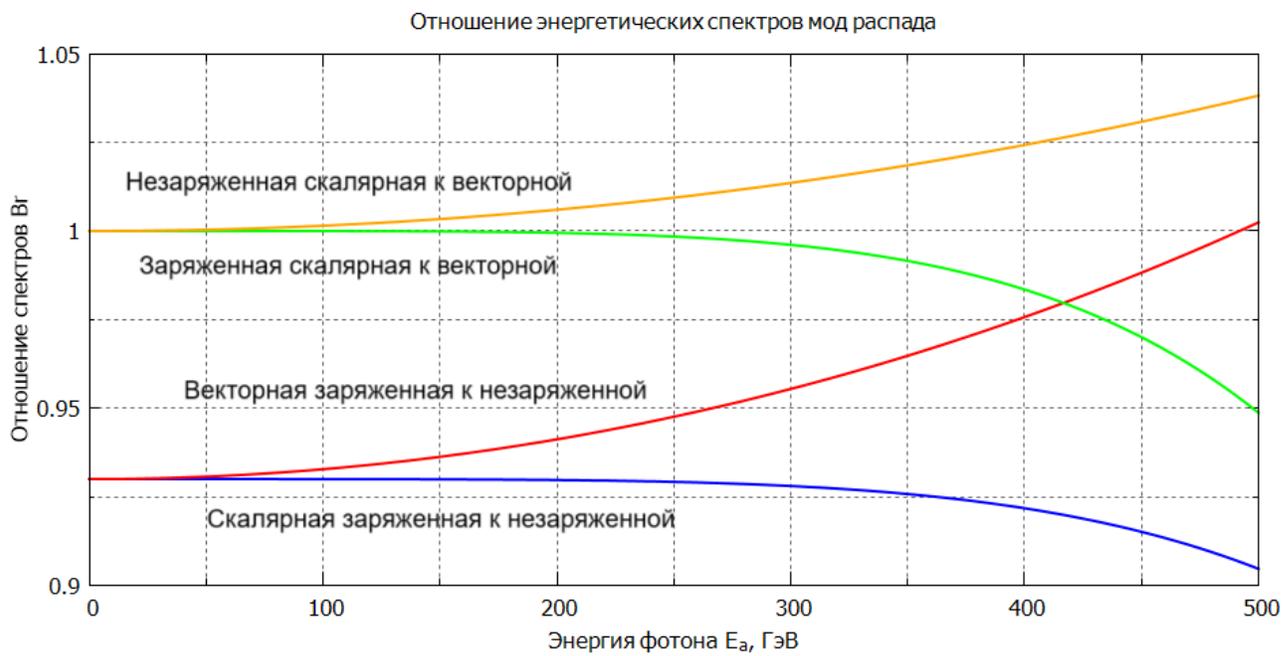


Рисунок 1 — Зависимость отношений пар энергетических спектров мод распада от энергии фотона в конечном состоянии.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проводилось исследование возможных вариантов двухпозитронной моды распада частиц скрытой массы. Были рассмотрены модели существования бозонных заряженных и незаряженных частиц скрытой массы и их двухпозитронные моды распадов с и без испускания фотона высокой энергии. Было произведено моделирование процессов распада частиц и получены энергетические спектры.

В результате была замечена малая разница в количестве сопутствующего гамма-излучения в рассмотренных модах распада. Получено, что в случае скалярной заряженной частицы скрытой массы и двухпозитронной моды распада наблюдается наименьшее количество гамма-излучения.

Перспективным направлением для продолжения работы является рассмотрение фермионных частиц скрытой массы, а также многопозитронной моды распада с различными конфигурациями конечного состояния.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5-100 GeV / O. Adriani [и др.] // Nature. — 2009. — Т. 458. — С. 607—609.
2. 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 / M. Aguilar [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2013. — Апр. — Т. 110, вып. 14.
3. Measurement of Separate Cosmic-Ray Electron and Positron Spectra with the Fermi Large Area Telescope / M. Ackermann [и др.] //. — 2012. — Янв. — Т. 108, № 1.
4. Indirect effects of dark matter / K. M. Belotsky [и др.] // Int. J. Mod. Phys. D. — 2019. — Т. 28, № 13.
5. Barak R., Belotsky K., Shlepkina E. Proposition of FSR Photon Suppression Employing a Two-Positron Decay Dark Matter Model to Explain Positron Anomaly in Cosmic Rays // Universe. — 2023. — Т. 9, № 8. — С. 370.