

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 МОДЫ РАСПАДА БОЗОННОЙ И
ФЕРМИОННОЙ ЧАСТИЦЫ СКРЫТОЙ МАССЫ

Научный руководитель
д.ф.-м.н.

_____ К. М. Белоцкий

Студент

_____ Я. А. Басов

Москва, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Построение модели	4
Моделирование	6
Заключение	9

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 моделях с модой распада бозонной и фермионной частицы скрытой массы. Исследуется влияние эффектов спинowego и кулоновского взаимодействия, тождественности частиц, количества позитронов в конечном состоянии. Влияние может оказывать принцип запрета Паули [4], что приведет к подавлению гамма-излучения. В работе рассматриваются следующие возможные случаи массивных частиц скрытой массы: скалярный и векторный бозоны X (заряд 0, +1, +2) в паре с фермионами (заряд -1, 0, +1); фермионы X (заряд +1) в паре со скалярным и векторным бозоном Y (заряд 0). В ходе работы планируется проверка результатов исследования распада двухпозитронной моды частицы с зарядом +2 [5].

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

В работе были рассмотрены следующие возможные случаи массивных частиц скрытой массы.

В распаде вида $X \rightarrow e^+ + e^\pm$:

- скалярный бозон X (заряд 0, +2);
- векторный бозон X (заряд 0, +2).

В распаде вида $X \rightarrow e^+ + Y$:

- скалярный бозон X (заряд 0, +1, +2) и фермион Y (заряд -1, 0, +1);
- векторный бозон X (заряд 0, +1, +2) и фермион Y (заряд -1, 0, +1);
- фермион X (заряд +1) и скалярный бозон Y (заряд 0);
- фермион X (заряд +1) и векторный бозон Y (заряд 0).

Для этих случаев с учетом спиновых состояний [6] написаны соответствующие лагранжианы, включающие члены, описывающие моду распада частицы X :

$$\mathcal{L}_{X^0 scalar} = \frac{1}{2} \partial_\mu X \partial^\mu X - \frac{1}{2} M_X^2 X^2 - \lambda \bar{\psi} X \psi, \quad (1)$$

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

$$\mathcal{L}_{X^0 vector} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \frac{1}{2} M_X^2 X_\mu X^\mu - \lambda \bar{\psi} \gamma^\mu X_\mu \psi, \quad (3)$$

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

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{X^0 scalar, Y^- fermion} = & \frac{1}{2} \partial_\mu X \partial^\mu X - \frac{1}{2} M_X^2 X^2 + i \bar{Y} \gamma^\mu \partial_\mu Y + i Y \gamma^\mu \partial_\mu \bar{Y} - \\ & - M_Y \bar{Y} Y - \lambda X \bar{\psi} Y - \lambda X \psi \bar{Y}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\mathcal{L}_{X^+ scalar, Y^0 fermion} = \partial_\mu \bar{X} \partial^\mu X - M_X^2 \bar{X} X + i Y \gamma^\mu \partial_\mu Y - M_Y Y^2 - \lambda X \psi Y - \lambda \bar{X} \bar{\psi} Y, \quad (6)$$

$$\mathcal{L}_{X^{++}scalar, Y^+fermion} = \partial_\mu \bar{X} \partial^\mu X - M_X^2 \bar{X} X + i\bar{Y} \gamma^\mu \partial_\mu Y + iY \gamma^\mu \partial_\mu \bar{Y} - M_Y \bar{Y} Y - \lambda X \psi \bar{Y} - \lambda \bar{X} \bar{\psi} Y, \quad (7)$$

$$\mathcal{L}_{X^0vector, Y^-fermion} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \frac{1}{2} M_X^2 X_\mu X^\mu + i\bar{Y} \gamma^\mu \partial_\mu Y + iY \gamma^\mu \partial_\mu \bar{Y} - M_Y \bar{Y} Y - \lambda Y \gamma^\mu X_\mu \psi - \lambda \bar{Y} \gamma^\mu X_\mu \bar{\psi}, \quad (8)$$

$$\mathcal{L}_{X^+vector, Y^0fermion} = -\frac{1}{2} F_{\mu\nu}^+ F^{\mu\nu} + M_X^2 \bar{X}_\mu X^\mu + iY \gamma^\mu \partial_\mu Y - M_Y Y^2 - \lambda \bar{\psi} \gamma^\mu \bar{X}_\mu Y - \lambda Y \gamma^\mu X_\mu \psi, \quad (9)$$

$$\mathcal{L}_{X^{++}vector, Y^+fermion} = -\frac{1}{2} F_{\mu\nu}^+ F^{\mu\nu} + M_X^2 \bar{X}_\mu X^\mu + i\bar{Y} \gamma^\mu \partial_\mu Y + iY \gamma^\mu \partial_\mu \bar{Y} - M_Y \bar{Y} Y - \lambda \bar{\psi} \gamma^\mu \bar{X}_\mu Y - \lambda \bar{Y} \gamma^\mu X_\mu \psi, \quad (10)$$

$$\mathcal{L}_{X^+fermion, Y^0scalar} = \frac{1}{2} \partial_\mu Y \partial^\mu Y - \frac{1}{2} M_Y^2 Y^2 + i\bar{X} \gamma^\mu \partial_\mu X + iX \gamma^\mu \partial_\mu \bar{X} - M_X \bar{X} X - \lambda \bar{X} \psi Y - \lambda X \bar{\psi} Y, \quad (11)$$

$$\mathcal{L}_{X^+fermion, Y^0vector} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \frac{1}{2} M_Y^2 Y_\mu Y^\mu + iX \gamma^\mu \partial_\mu \bar{X} + i\bar{X} \gamma^\mu \partial_\mu X - M_X \bar{X} X - \lambda \psi \gamma^\mu Y_\mu X - \lambda \bar{\psi} \bar{X} \gamma^\mu Y_\mu, \quad (12)$$

где λ – константа взаимодействия, принятая равной элементарному заряду 0,313451, M_Y – масса частицы Y , равная 0,1 ГэВ, Y – волновая функция частицы Y , M_X – масса частицы X , равная 1000 ГэВ, X – волновая функция частицы X , ψ – 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 Y и их взаимодействий, заданных формулами (1-12), масса частицы X – 1000 ГэВ, масса частицы Y – 0,1 ГэВ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

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

$$X \rightarrow e^+ + Y + \gamma, \quad X \rightarrow e^+ + e^\pm + \gamma,$$

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 12 видов распадов 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. Полученные значения совпадают с теоретическим расчетом по формуле (13).

$$\Gamma = \frac{\lambda^2 M_X}{4\pi g} \sqrt{1 - \frac{4M_Y^2}{M_X^2}}, \quad (13)$$

где λ – константа взаимодействия, принятая равной элементарному заряду 0,313451, $g = 2$ для скалярной распадающейся частицы, $g = 3$ для векторной распадающейся частицы. Если частицы в конечном состоянии тождественные, то значение дополнительно уменьшается вдвое.

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

Вид частицы	Скаляр, 0	Скаляр, +2	Вектор, 0	Вектор, +2
Ширина распада Γ , ГэВ	3,909	1,955	2,606	1,303

Для оценки количества гамма-излучения были построены соответствующие зависимости величины R от энергии фотона в конечном состоянии по сравнению с наиболее часто встречаемой модой распада $X_{scalar}^0 \rightarrow e^- e^+$:

$$Br = \frac{\Gamma(X \rightarrow eY\gamma)}{\Gamma(X \rightarrow eY)}, \quad \frac{dBr}{dE} = \frac{1}{\Gamma(X \rightarrow eY)} \frac{d\Gamma(X \rightarrow eY\gamma)}{dE}, \quad (14)$$

$$R = \frac{dBr(decay)}{dE} / \frac{dBr(X_{scalar}^0 \rightarrow e^- e^+)}{dE} \quad (15)$$

Построены графики зависимости по энергиям отношения энергетических спектров различных мод (рисунок 1 – по энергии фотонов, рисунок 2 – по энергиям позитронов). Замечено, что в случае X^{++} наблюдается подавление испускания высокоэнергетических фотонов из-за кулоновского эффекта. В случае X^+ наблюдается малое количество фотонов по сравнению с двухпозитронной модой распада ввиду исключения кулоновского взаимодействия между частицами в конечном состоянии. Для случая X_{vector}^0 наблюдается слабое подавление высокоэнергетических фотонов из-за спинового взаимодействия частиц в конечном состоянии.

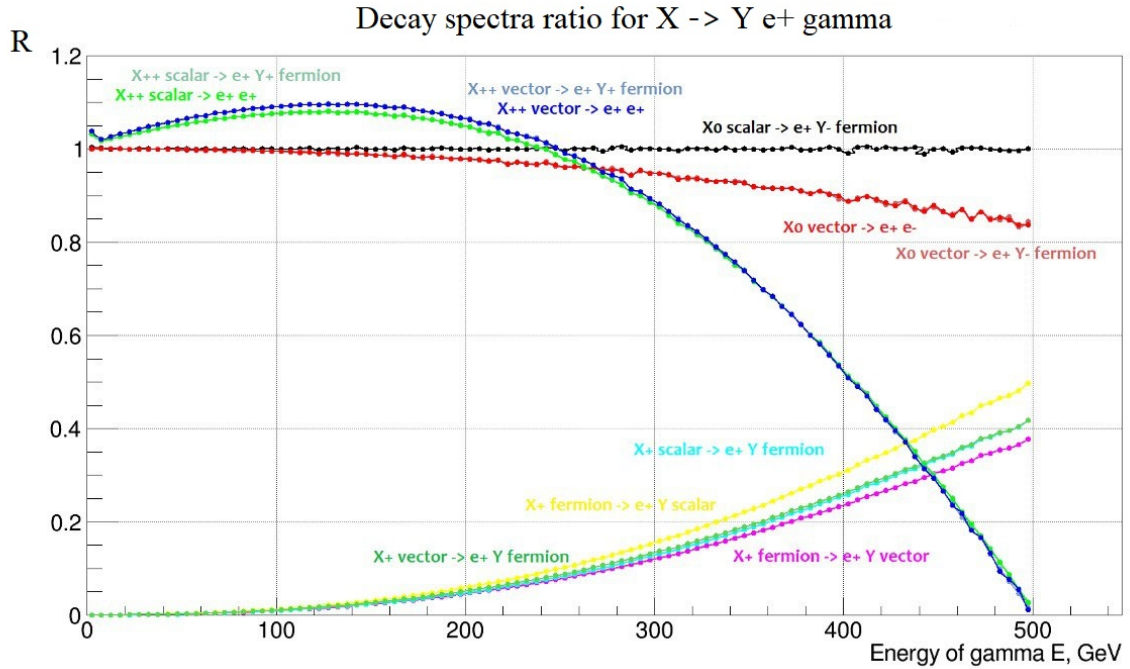


Рисунок 1 — Зависимость отношений пар энергетических спектров мод распада от энергии фотона в конечном состоянии.

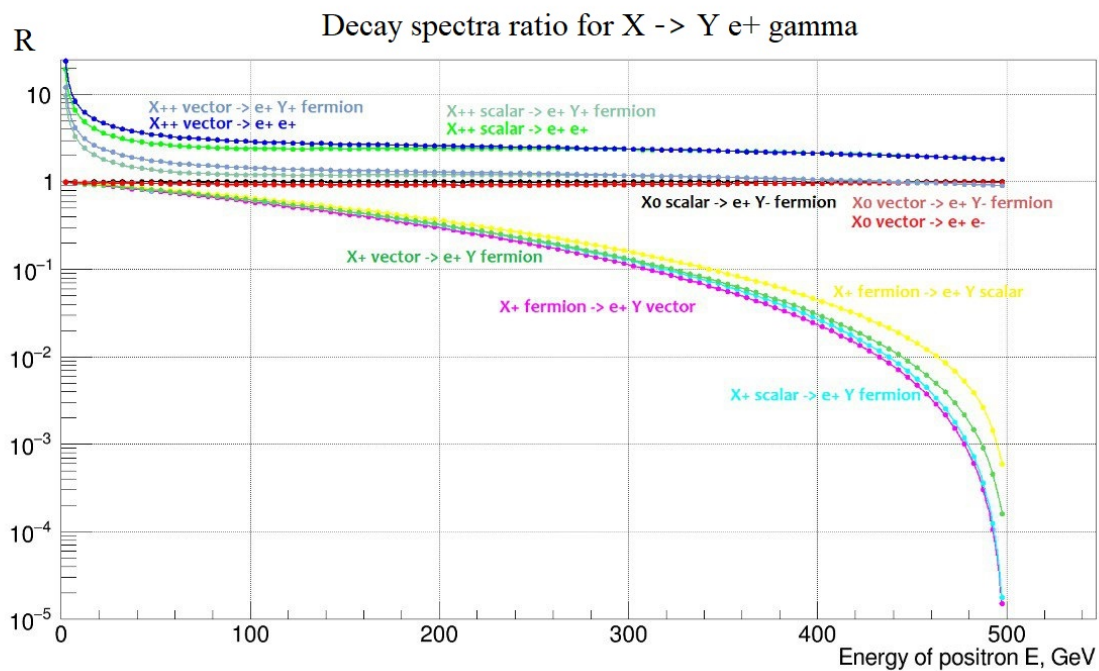


Рисунок 2 — Зависимость отношений пар энергетических спектров мод распада от энергии позитрона в конечном состоянии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проводилось исследование возможных вариантов моды распада бозонных и фермионных частиц скрытой массы. Рассмотрены 12 моделей существования заряженных и незаряженных частиц скрытой массы и их мод распадов с и без испускания фотона высокой энергии. Произведено моделирование процессов распада частиц и получены энергетические спектры. При исследовании всех моделей также производилась проверка согласования работы Монте-Карло генераторов и сравнение их точности в расчетах процессов распада частиц.

В результате замечено, что в случае однозаряженной частицы наблюдается наименьшее количество гамма-излучения, что позволяет продолжить рассмотрение этой модели для объяснения позитронной аномалии. Другие моды распадов могут быть уточнены и использованы для объяснения других наблюдаемых экспериментально эффектов.

Продолжением работы может являться поиск аналитического решения и физических приближений для оценки влияния тонких эффектов.

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 / К. М. 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.
6. Peskin M. E., Schroeder D. V. An Introduction to Quantum Field Theory. — Boulder, CO: Westview Press, 1995. — С. 864.