



Моделирование распада частиц скрытой массы

Басов Я.А., студент 4 курса ИЯФиТ НИЯУ МИФИ

Научный руководитель:

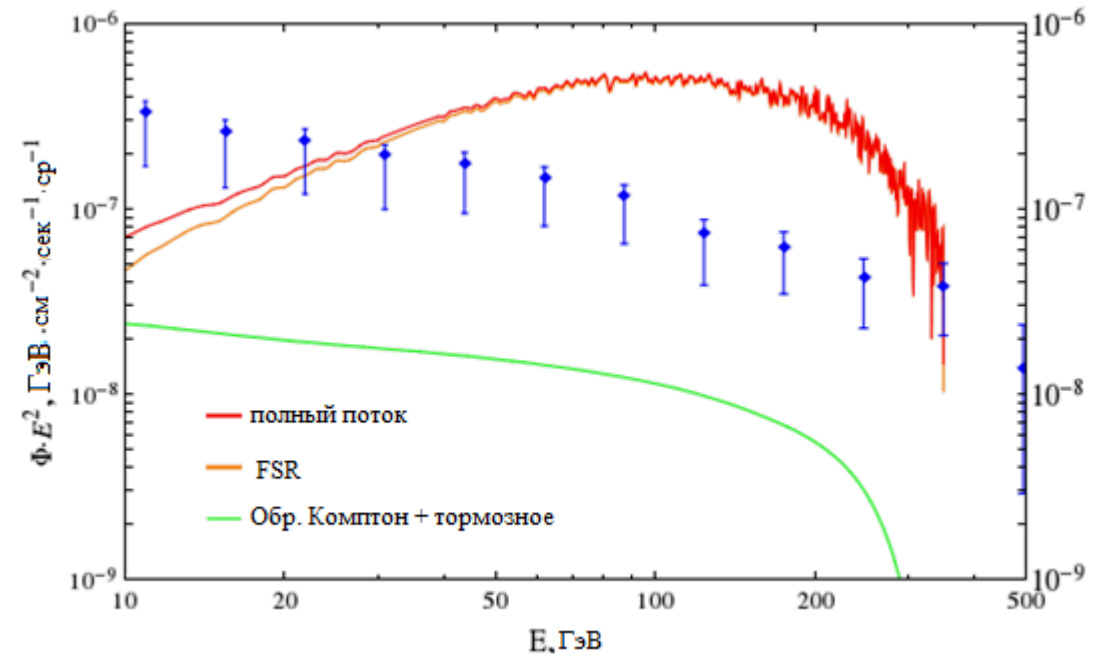
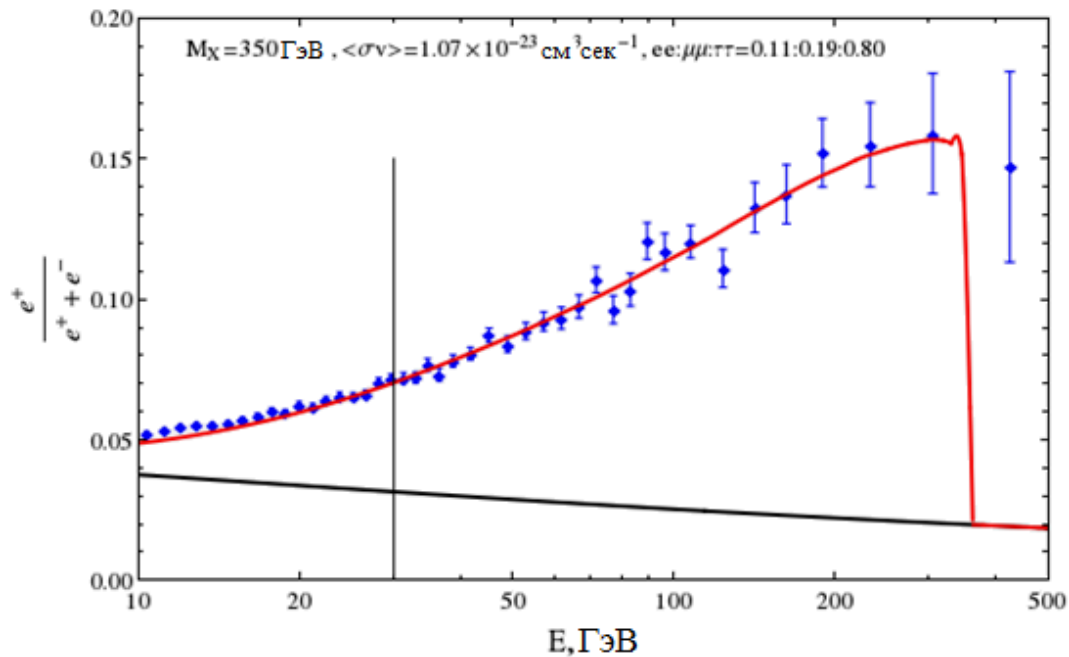
Белоцкий К.М., д.ф.-м.н., в. н. с. НИЯУ МИФИ

08.05.2026



Позитронная аномалия

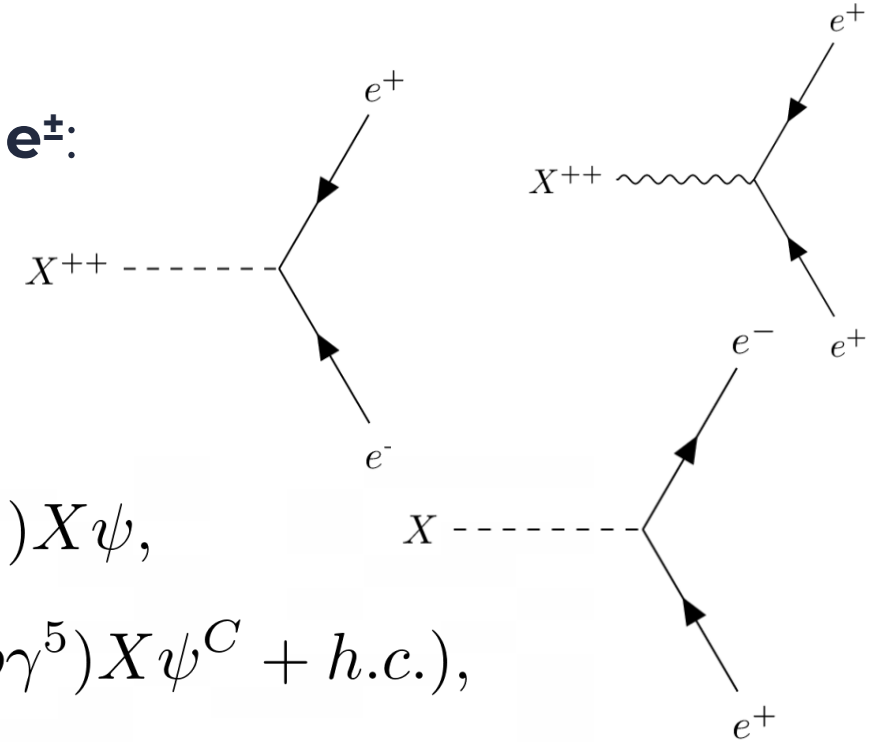
Цель работы: поиск возможного решения проблемы позитронной аномалии путем рассмотрения подавления гамма-излучения в моделях распада частиц скрытой массы разных типов.



Рассматриваемая модель

Частицы скрытой массы \mathbf{X} в распаде $\mathbf{X} \rightarrow \mathbf{e}^+ + \mathbf{e}^\pm$:

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



$$\mathcal{L}_{X^0 scalar} = \frac{1}{2} \partial_\mu X \partial^\mu X - \frac{1}{2} M_X^2 X^2 - \bar{\psi} (a + b\gamma^5) X \psi,$$

$$\mathcal{L}_{X^{++} scalar} = D_\mu X^\dagger D^\mu X - M_X^2 X^\dagger X - (\bar{\psi} (a + b\gamma^5) X \psi^C + h.c.),$$

$$\mathcal{L}_{X^0 vector} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \frac{1}{2} M_X^2 X_\mu X^\mu - \bar{\psi} (a + b\gamma^5) \gamma^\mu X_\mu \psi,$$

$$\mathcal{L}_{X^{++} vector} = -\frac{1}{2} F_{\mu\nu}^\dagger F^{\mu\nu} + M_X^2 X_\mu^\dagger X^\mu - (\bar{\psi} (a + b\gamma^5) \gamma^\mu X_\mu \psi^C + h.c.).$$

Зарядово сопряженные частицы

$$\psi(x) = \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} \frac{1}{\sqrt{2E_p}} \sum_s (a_p^s u^s(p) e^{-ipx} + b_p^{s\dagger} v^s(p) e^{ipx}),$$

$$\bar{\psi}(x) = \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} \frac{1}{\sqrt{2E_p}} \sum_s (b_p^s \bar{v}^s(p) e^{-ipx} + a_p^{s\dagger} \bar{u}^s(p) e^{ipx}),$$

$$\psi^C = C(\bar{\psi})^T$$

$$\bar{\psi}^C = (C(\bar{\psi})^T)^\dagger \gamma_0 = \psi^T C$$

$$\psi^C(x) = \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} \frac{1}{\sqrt{2E_p}} \sum_s (b_p^s u^s(p) e^{-ipx} + a_p^{s\dagger} v^s(p) e^{ipx}),$$

$$\bar{\psi}^C(x) = \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} \frac{1}{\sqrt{2E_p}} \sum_s (a_p^s \bar{v}^s(p) e^{-ipx} + b_p^{s\dagger} \bar{u}^s(p) e^{ipx}).$$

Зарядово сопряженная частица **аналогична частице**
(меняется только заряд)

Расчет распада X на e^+e^-

$$\Gamma_{X^0 scalar} = \frac{M_X}{8\pi} \sqrt{1 - \frac{4m_e^2}{M_X^2}} \left(a^2 \left(1 - \frac{4m_e^2}{M_X^2} \right) + b^2 \right),$$

$$\Gamma_{X^{++} scalar} = \frac{M_X}{4\pi} \sqrt{1 - \frac{4m_e^2}{M_X^2}} \left(a^2 \left(1 - \frac{4m_e^2}{M_X^2} \right) + b^2 \right),$$

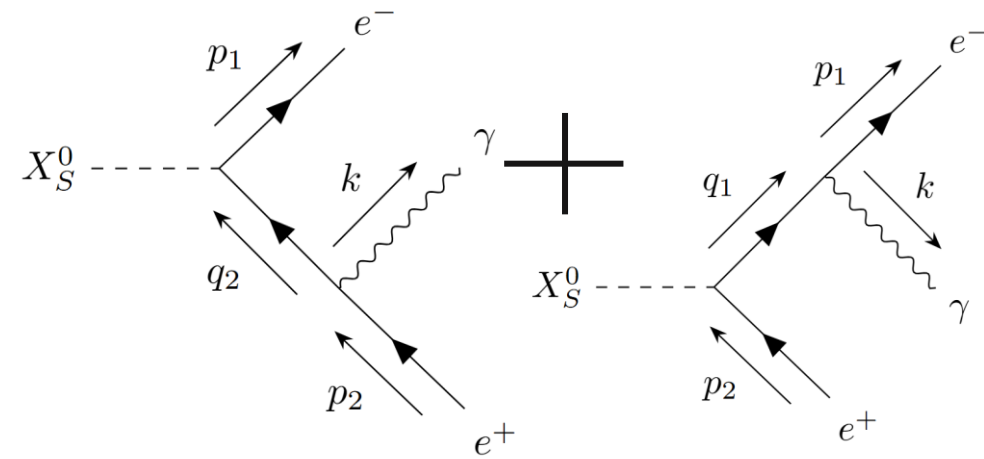
$$\Gamma_{X^0 vector} = \frac{M_X}{12\pi} \sqrt{1 - \frac{4m_e^2}{M_X^2}} \left(a^2 \left(1 + \frac{2m_e^2}{M_X^2} \right) + b^2 \left(1 - \frac{4m_e^2}{M_X^2} \right) \right),$$

$$\Gamma_{X^{++} vector} = \frac{M_X}{6\pi} \sqrt{1 - \frac{4m_e^2}{M_X^2}} \left(b^2 \left(1 - \frac{4m_e^2}{M_X^2} \right) \right).$$

Расчет распада X^0 (скаляр) на e^+e^- и фотон

$$i\mathcal{M} = i\mathcal{M}_A + i\mathcal{M}_B = -ie\bar{u}(p_1) \left(\gamma^\mu \frac{\hat{q}_1 + m_e}{2p_1 \cdot k} (a + b\gamma^5) + (a + b\gamma^5) \frac{-\hat{q}_2 + m_e}{2p_2 \cdot k} \gamma^\mu \right) \epsilon_\mu^*(k)v(p_2)$$

$$E_1^\pm = \frac{(E_{1m} - E_\gamma)(M_X - E_\gamma) \pm E_\gamma \sqrt{(E_{\gamma m} - E_\gamma)(A - E_\gamma)}}{M_X - 2E_\gamma},$$

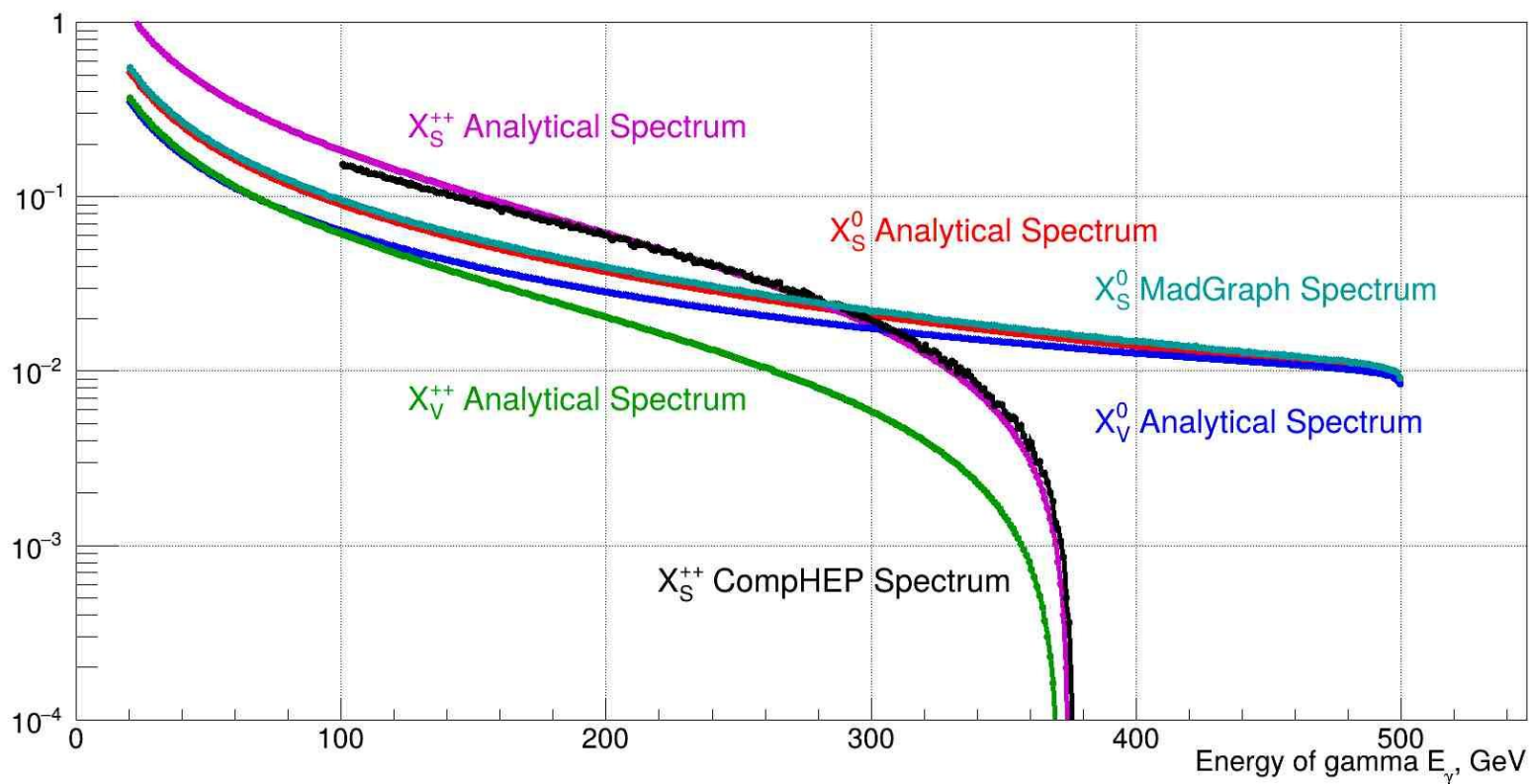


$$\frac{d\Gamma}{dE_\gamma} = \frac{e^2}{2M_X^2(2\pi)^3} \left(m_e^2 \left(a^2 E_{\gamma m} + b^2 \frac{M_X}{2} \right) \left(\frac{1}{E_1 + E_\gamma + E_{2m} - M_X} - \frac{1}{E_{1m} - E_1} \right) + \right. \\ \left. + \frac{M_X}{E_\gamma} \left(a^2 (E_\gamma^2 - 2E_\gamma E_{\gamma m} + 2E_{\gamma m} E) + b^2 (E_\gamma^2 - M_X E_\gamma + M_X E) \right) \ln \frac{E_1 + E_\gamma + E_{2m} - M_X}{E_{1m} - E_1} \right) \Bigg|_{E_1^-}^{E_1^+}.$$

Моделирование

Моделирование распадов производилось в программах **MadGraph5** и **CompHEP**. Для распада $X \rightarrow e^\pm + e^\pm + \gamma$ получены спектры фотона конечного состояния:

Spectrum of gamma for decay $X \rightarrow e^+ e^+ \gamma$



Полученные результаты

При аналитическом расчете и в программе ComrHEP в случае зарядового сопряжения возникает проблема отрицательной ширины распада.

Подавление излучения ожидается только в случае зарядового сопряжения частиц, однако стандартные методы квантовой теории не подходят для расчетов таких процессов.

Спасибо за внимание

