



Моделирование распада частиц скрытой массы

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

Научный руководитель:

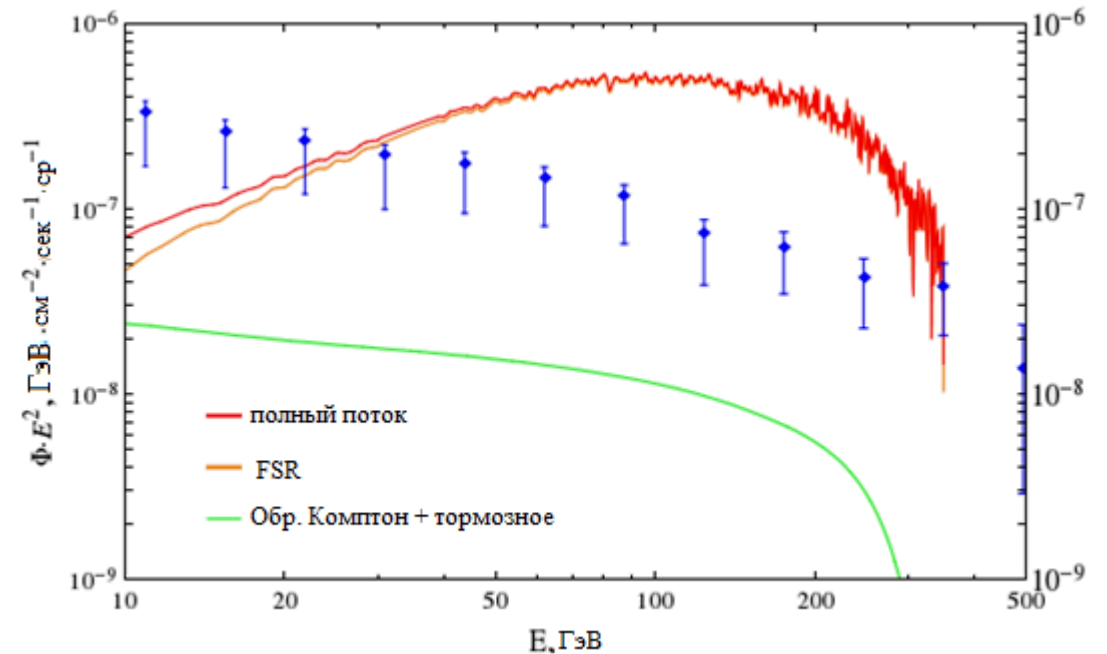
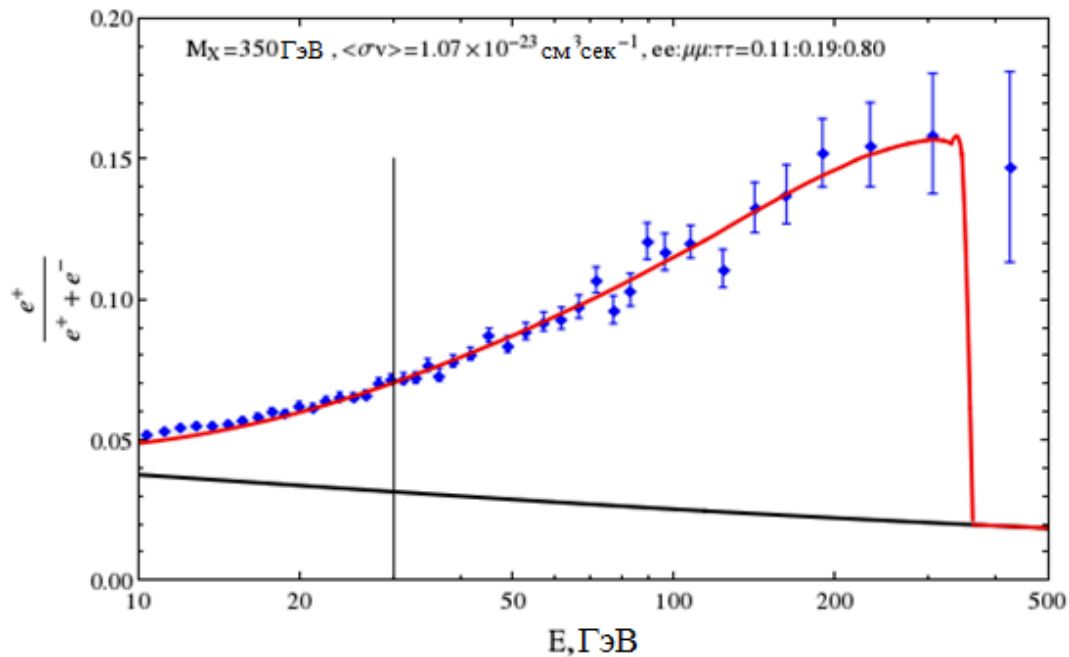
Белоцкий К.М., д.ф.-м.н., в. н. с. НИЯУ МИФИ

24.12.2025



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

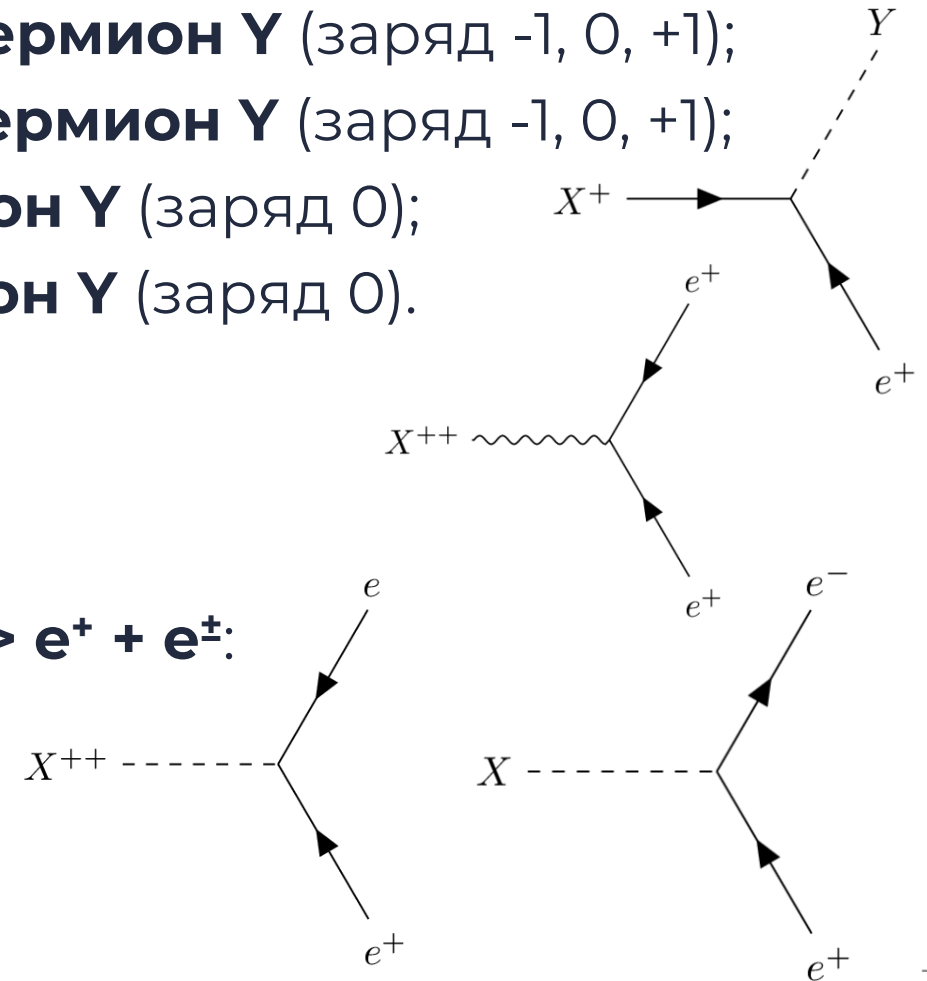
Частицы скрытой массы **X** и **Y** в распаде $X \rightarrow e^+ + Y$:

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

Масса **X** – 1000 ГэВ. Масса **Y** – 0.1 ГэВ.

Частицы скрытой массы **X** в распаде $X \rightarrow e^+ + e^\pm$:

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

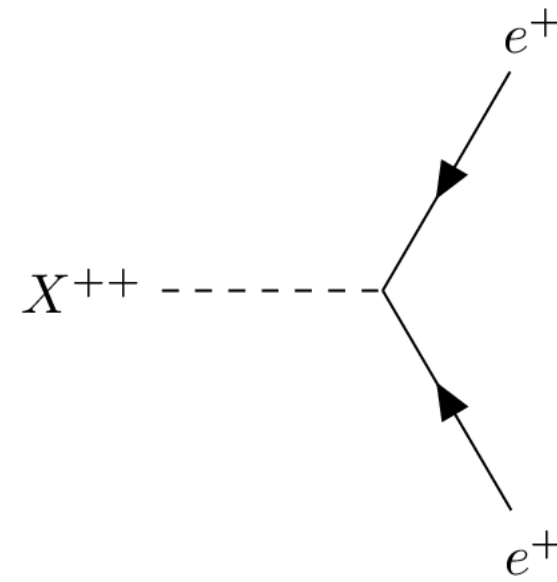
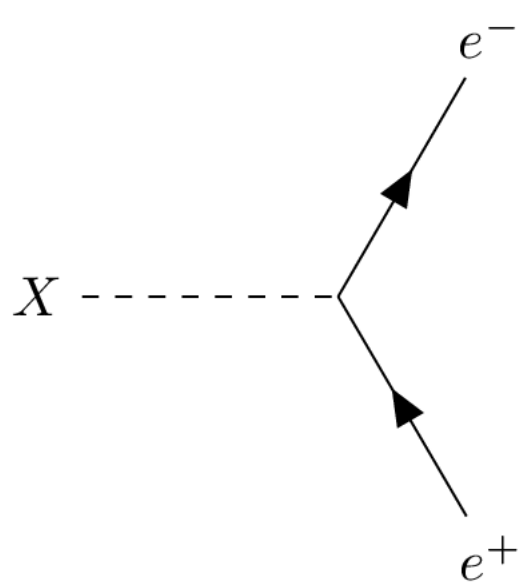


Рассматриваемая модель

Лагранжианы частицы X в модели взаимодействия e - e

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

$$\mathcal{L}_{X^{++} scalar} = D_\mu X^\dagger D^\mu X - M_X^2 X^\dagger X - \lambda \bar{\psi} X \psi^C - \lambda \bar{\psi}^C X^\dagger \psi.$$



Зарядово сопряженные частицы

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

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

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

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

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

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

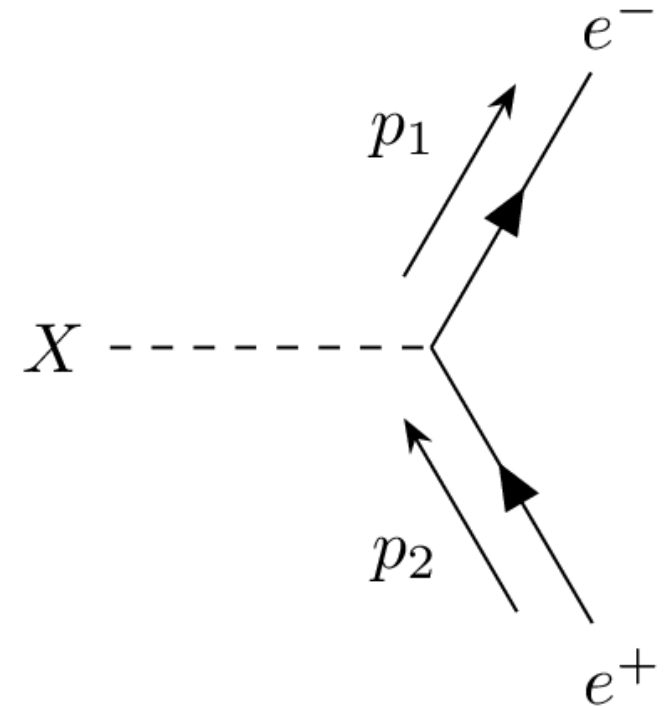
Зарядово сопряженная частица **аналогична частице**

Расчет распада X на e^-e^+

$$i\mathcal{M} = (-i\lambda)\bar{u}^{s_1}(p_1)v^{s_2}(p_2),$$

$$\sum_{s_1, s_2} |\mathcal{M}|^2 = 2\lambda^2 M_X^2 \left(1 - \frac{4m_e^2}{M_X^2} \right),$$

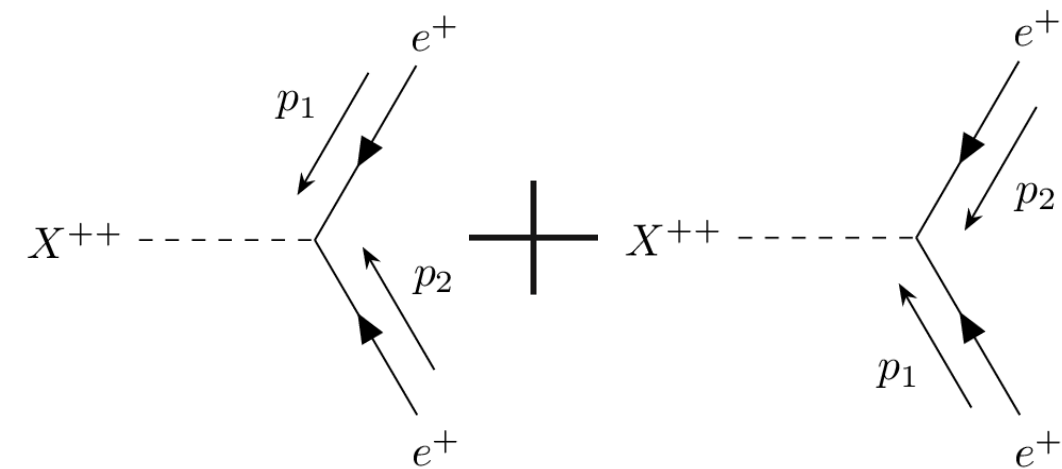
$$\Gamma = \frac{\lambda^2 M_X}{8\pi} \sqrt{1 - \frac{4m_e^2}{M_X^2}} \left(1 - \frac{4m_e^2}{M_X^2} \right).$$



Расчет распада X на e^+e^+

$$i\mathcal{M} = (-i\lambda)\bar{u}^{s_1}(p_1)v^{s_2}(p_2) + (-i\lambda)\bar{u}^{s_2}(p_2)v^{s_1}(p_1),$$

$$\sum_{s_1, s_2} |\mathcal{M}|^2 = \lambda^2 \sum_{s_1, s_2} (\bar{u}^{s_1}(p_1)v^{s_2}(p_2)\bar{v}^{s_2}(p_2)u^{s_1}(p_1) + \bar{u}^{s_2}(p_2)v^{s_1}(p_1)\bar{v}^{s_1}(p_1)u^{s_2}(p_2) + \\ + \bar{u}^{s_1}(p_1)v^{s_2}(p_2)\bar{v}^{s_1}(p_1)u^{s_2}(p_2) + \bar{u}^{s_2}(p_2)v^{s_1}(p_1)\bar{v}^{s_2}(p_2)u^{s_1}(p_1)),$$

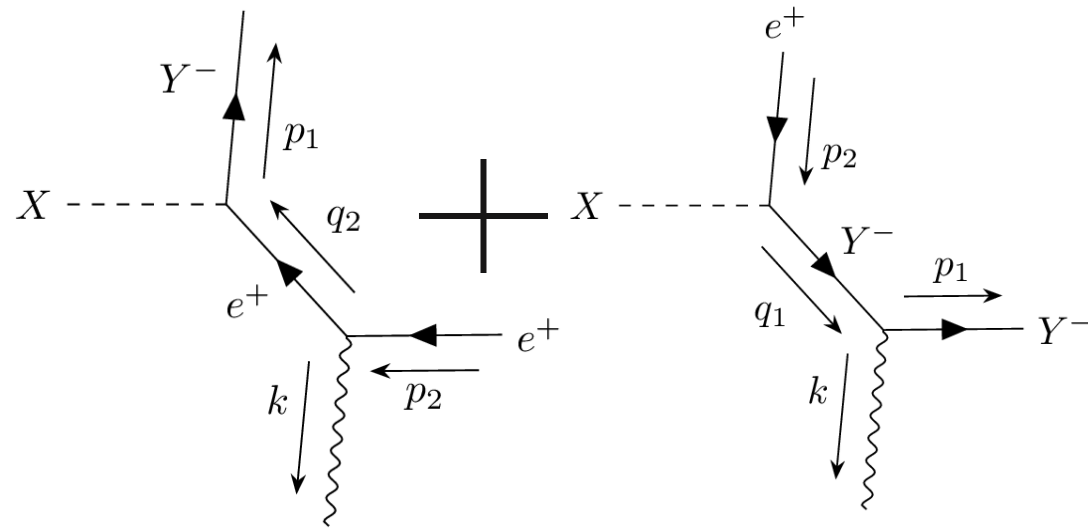


$$\Gamma = \frac{\lambda^2 M_X}{4\pi} \sqrt{1 - \frac{4m_e^2}{M_X^2}} \left(1 + \frac{4m_e^2}{M_X^2} \right).$$

Расчет распадов X на Y^- e^+ и фотон

$$i\mathcal{M} = i\mathcal{M}_A + i\mathcal{M}_B = -ie\lambda \bar{u}(p_1) \left(\gamma^\mu \frac{\not{q}_1 + m_y}{2p_1 \cdot k} + \frac{-\not{q}_2 + m_e}{2p_2 \cdot k} \gamma^\mu \right) \epsilon_\mu^*(k) v(p_2)$$

$$|\mathcal{M}|^2 = \frac{-(e\lambda)^2}{4} \left(\frac{T_{11}}{(p_1 \cdot k)^2} + \frac{T_{12} + T_{21}}{(p_1 \cdot k)(p_2 \cdot k)} + \frac{T_{22}}{(p_2 \cdot k)^2} \right)$$



$$T_{11} = \text{Tr} \left((\not{p}_1 + m_y) \gamma^\mu (\not{q}_1 + m_y) (\not{p}_2 - m_e) (\not{q}_1 + m_y) \gamma_\mu \right),$$

$$T_{12} = \text{Tr} \left((\not{p}_1 + m_y) \gamma^\mu (\not{q}_1 + m_y) (\not{p}_2 - m_e) \gamma_\mu (-\not{q}_2 + m_e) \right),$$

$$T_{21} = \text{Tr} \left((\not{p}_1 + m_y) (-\not{q}_2 + m_e) \gamma^\mu (\not{p}_2 - m_e) (\not{q}_1 + m_y) \gamma_\mu \right),$$

$$T_{22} = \text{Tr} \left((\not{p}_1 + m_y) (-\not{q}_2 + m_e) \gamma^\mu (\not{p}_2 - m_e) \gamma_\mu (-\not{q}_2 + m_e) \right).$$

Расчет распадов X на Υ - e^+ и фотон

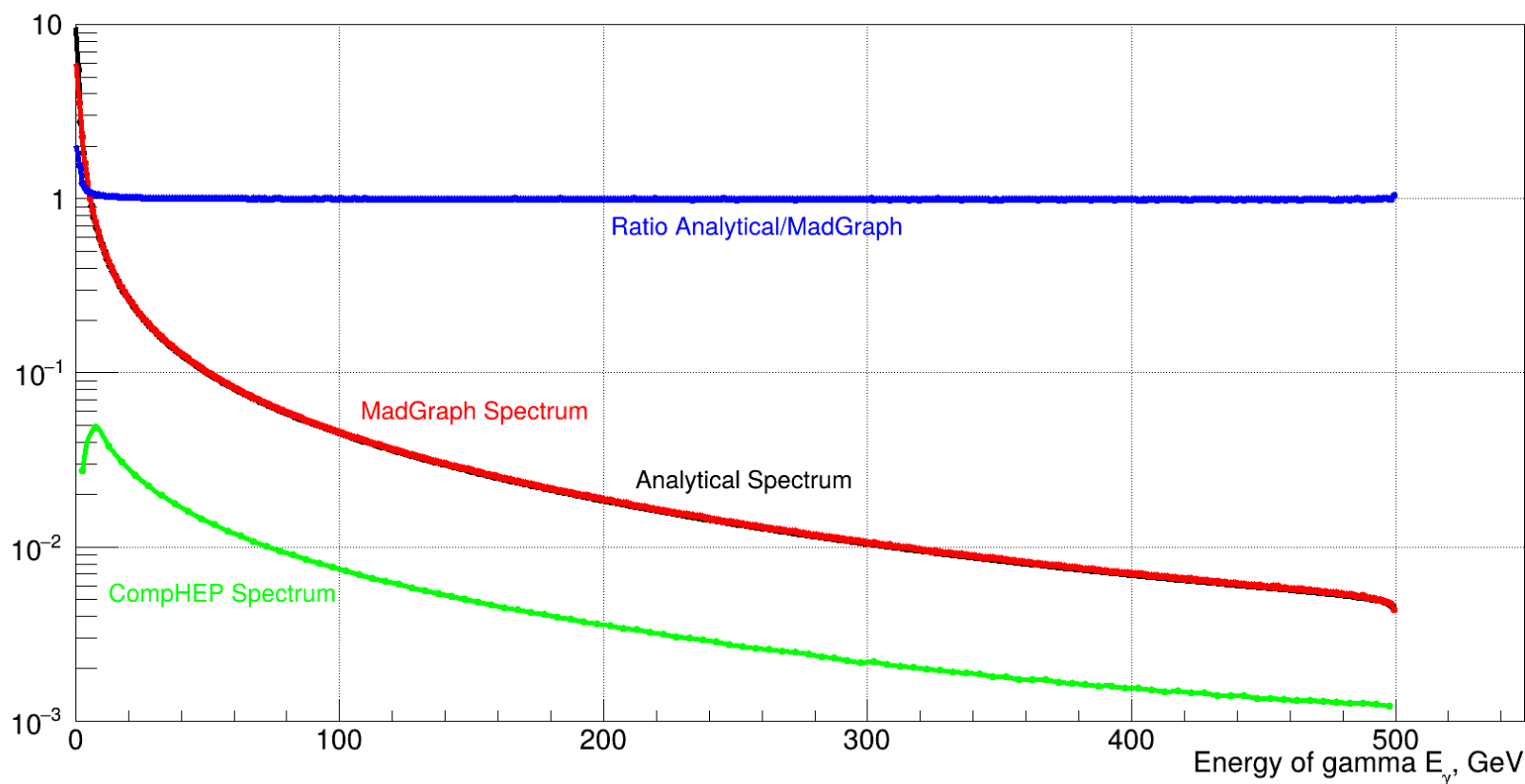
$$E_1^\pm = \frac{(E_{1m} - E_\gamma)(M_X - E_\gamma) \pm E_\gamma \sqrt{(E_{\gamma m} - E_\gamma)(A - E_\gamma)}}{M_X - 2E_\gamma},$$

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

Моделирование

Моделирование распадов производилось в программах **MadGraph5** и **CompHEP**. Для распада $X \rightarrow e^- + e^+ + \gamma$ получено **отношение спектров** моделирования и аналитического решения:

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



Моделирование

Сравнение ширины распада в разных программах при двух массах

$$m_e = 5,11 \cdot 10^{-4} \text{ ГэВ}$$

Вид распада	CompHEP, ГэВ	MadGraph 5, ГэВ	Аналитическая, ГэВ
$X \rightarrow e^+ + e^-$	39,79	39,79	39,79
$X \rightarrow e^+ + e^+$	19,89	79,58	79,58

$$m_e = 100 \text{ ГэВ}$$

Вид распада	CompHEP, ГэВ	MadGraph 5, ГэВ	Аналитическая, ГэВ
$X \rightarrow e^+ + e^-$	37,43	37,43	37,43
$X \rightarrow e^+ + e^+$	18,71	74,85	81,09

Полученные результаты

CompuNER подходит для получения численного значения ширины распада в простых случаях, но не подходит для рассмотрения случаев с испусканием фотонов в конечном состоянии.

Спектры из MadGraph 5 при наличии большой статистики совпадают с аналитическим расчетом в первом порядке теории возмущений.

В случае зарядово сопряженных частиц расчет усложняется увеличением числа диаграмм, а Монте-Карло генераторы не учитывают нестандартные эффекты квантовой теории при расчете.

Спасибо за внимание

