



Исследование возможности подавления фотонов конечного состояния в распадах частиц скрытой массы

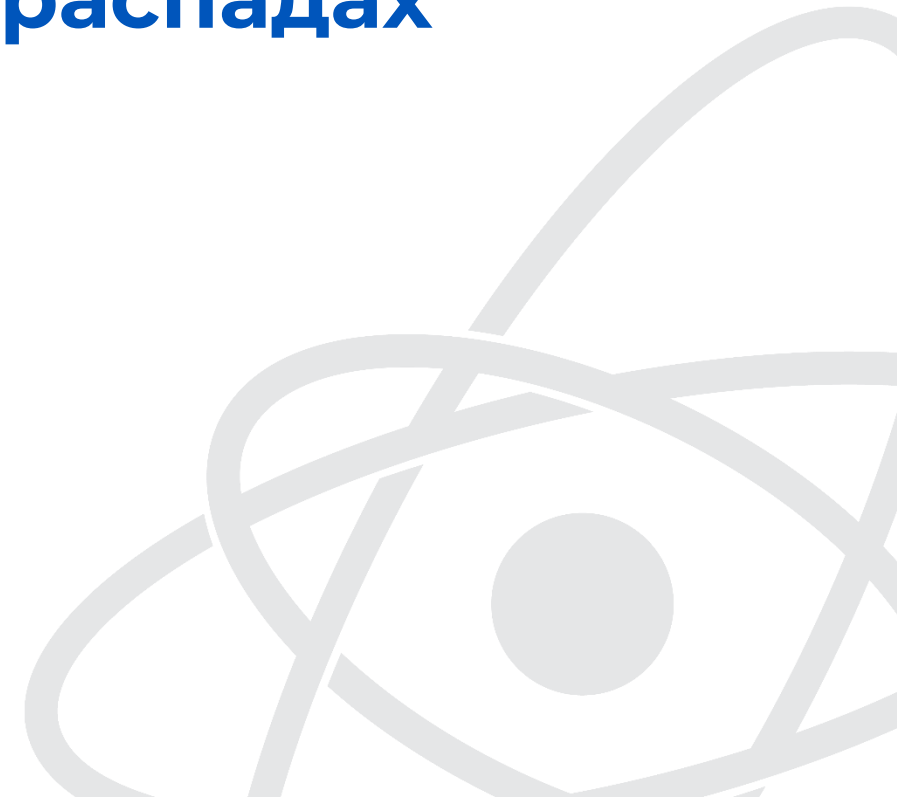
Выполнил: **Басов Я.А.**

Группа: Б22-102

Научный руководитель:

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

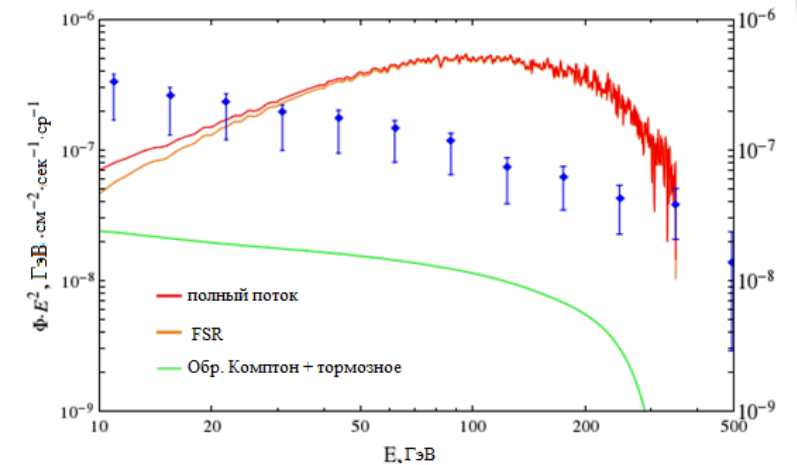
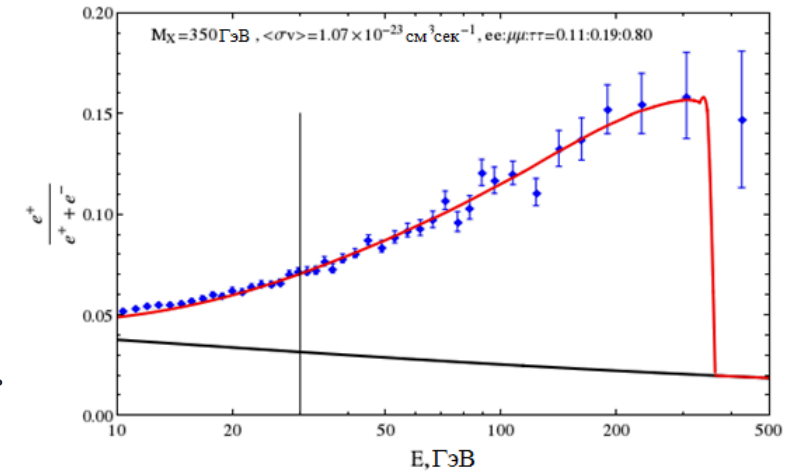
25.06.2026



Введение

Цель работы: поиск принципиальной возможности подавления гамма-излучения в моделях распада частиц скрытой массы для решения проблемы позитронной аномалии в КЛ.

Актуальность: позитронная аномалия не имеет общепринятого объяснения, модели со скрытой массой имеют проблемы по превышению гамма-фона из-за сопутствующего излучения.



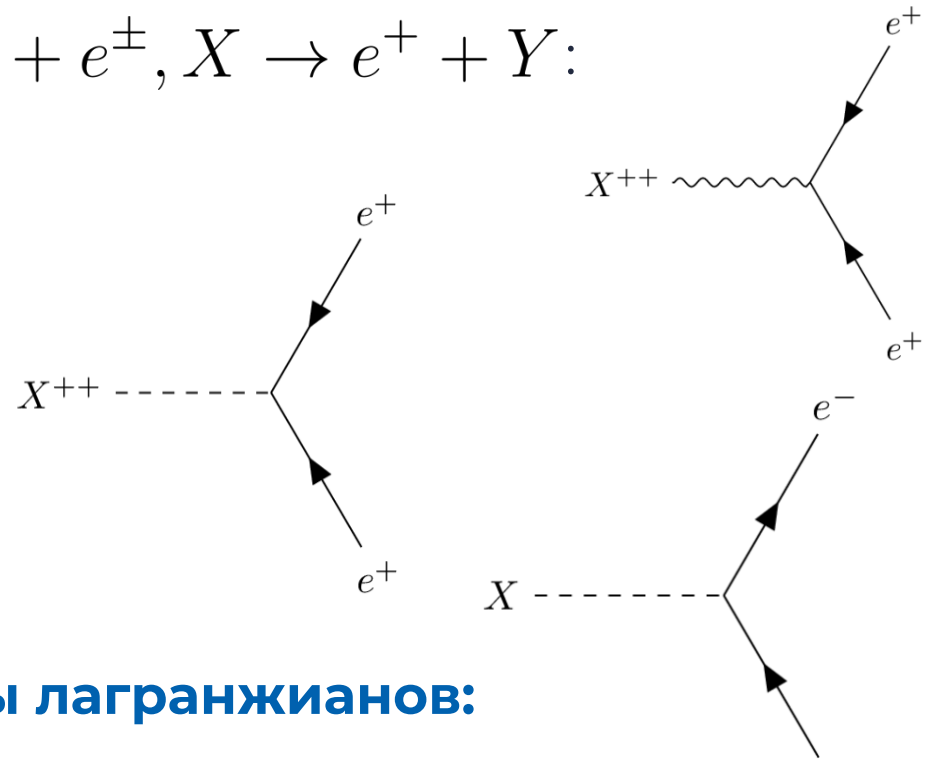
Рассматриваемые модели

Частицы скрытой массы **X** и **Y** в распадах $X \rightarrow e^+ + e^\pm$, $X \rightarrow e^+ + Y$:

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

Возможные причины подавления γ/e^+ :

- Увеличение выхода e^+ ;
- Тождественность частиц;
- Запрет Паули;
- Однофотонная теорема;
- Отсутствие классического дипольного излучения.



Типы лагранжианов:

$$\mathcal{L}_{\text{Int}}^{\text{Scalar}} \supset \bar{\psi}(a + b\gamma^5)X\psi,$$

$$\mathcal{L}_{\text{Int}}^{\text{Vector}} \supset \bar{\psi}(a + b\gamma^5)\gamma^\mu X_\mu\psi$$

Зарядово сопряженные частицы

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

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

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

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

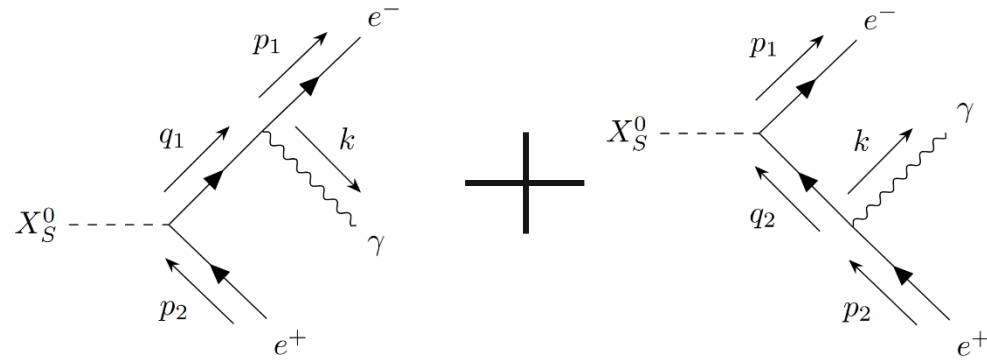
$$\psi^C(x) = \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} \frac{1}{\sqrt{2E_p}} \sum_s (b_p^s u^s(p) e^{-ipx} + a_p^{s\dagger} v^s(p) e^{ipx}),$$

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

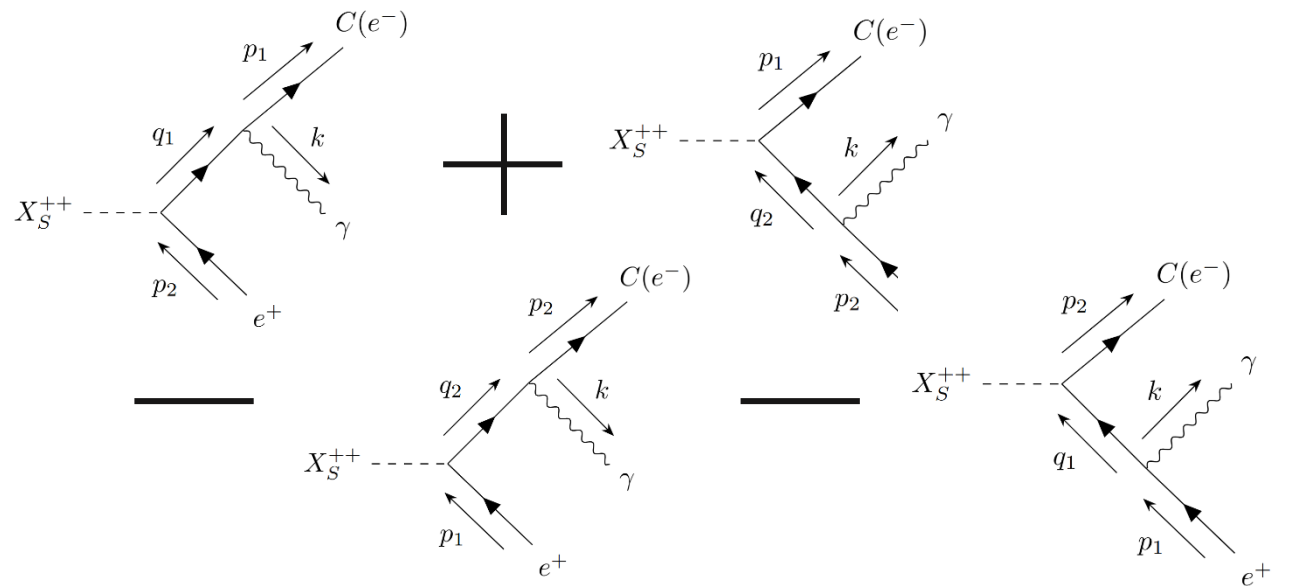
Зарядово сопряженная частица **аналогична частице**
(меняется только заряд)

Расчет распада X на e^+e^\pm и фотон

Диаграммы Фейнмана для распада $X^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$:



Диаграммы Фейнмана для распада $X^{++} \rightarrow e^+e^+\gamma$:



Расчет распада X на e⁺e⁻ и фотон

Получены кинематические пределы на энергию позитрона в зависимости от энергии фотона:

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

Получена формула дифференциальной ширины распада (спектр фотонов):

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

Моделирование

Моделирование распадов производилось в Монте-Карло генераторах **MadGraph 5** и **CompHEP**.

Для значений $m_e = 100$ ГэВ, $M_X = 1000$ ГэВ, $m_Y = 0,1$ ГэВ, $a = 10^{-6}$, $b = 10^{-1}$ получены ширины распадов на 2 частицы:

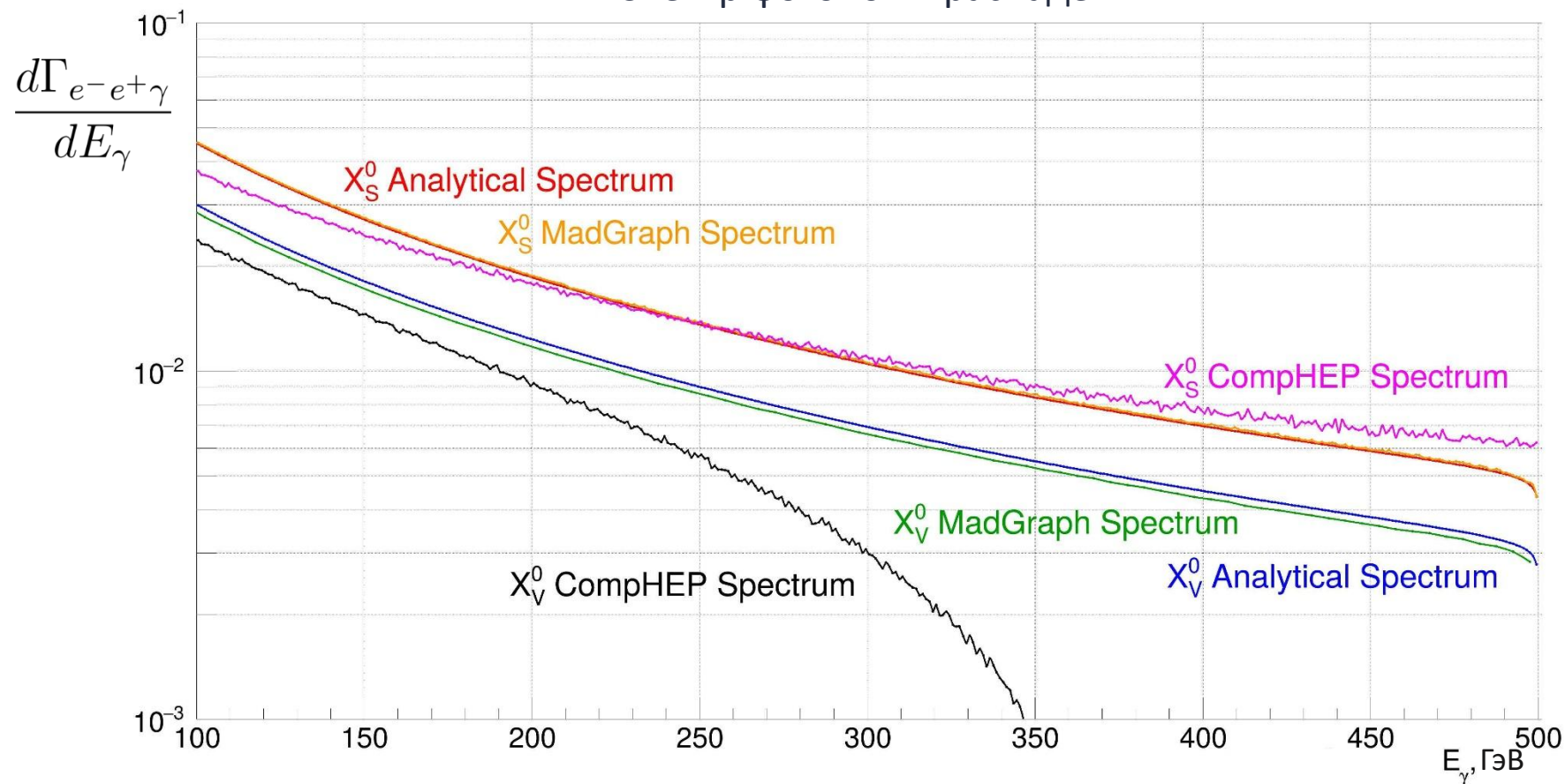
Распад	CompHEP, ГэВ	MadGraph 5, ГэВ	Аналитическая, ГэВ
$X \rightarrow e^- + e^+$	0,3898	0,3898	0,3898
$X \rightarrow Y + e^+$	0,3900	0,3900	0,3900
$X \rightarrow e^+ + e^+$	0,1949	0,7485	0,7485

В случае зарядового сопряжения в CompHEP **неправильно** учитываются перестановки тождественных частиц.

Сравнение средств (способов) расчета – 1

Для распада $X^0 \rightarrow e^- e^+ \gamma$ получены спектры фотонов конечного состояния для случаев скалярной и векторной частицы:

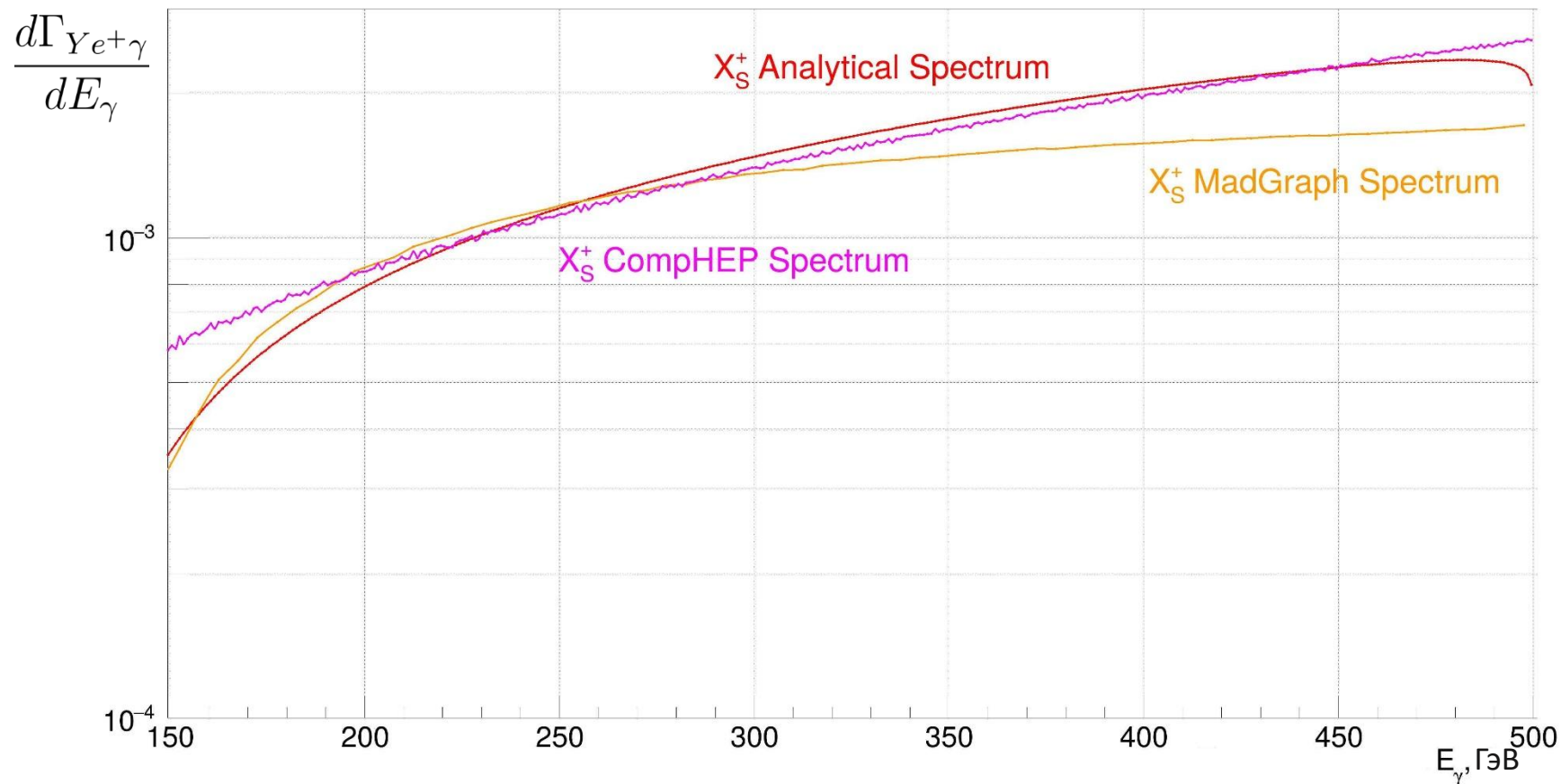
Спектр фотонов в распаде X



Сравнение средств (способов) расчета – 2

Для распада $X^+ \rightarrow Y e^+ \gamma$ получены спектры фотонов конечного состояния для случаев скалярной и векторной частицы:

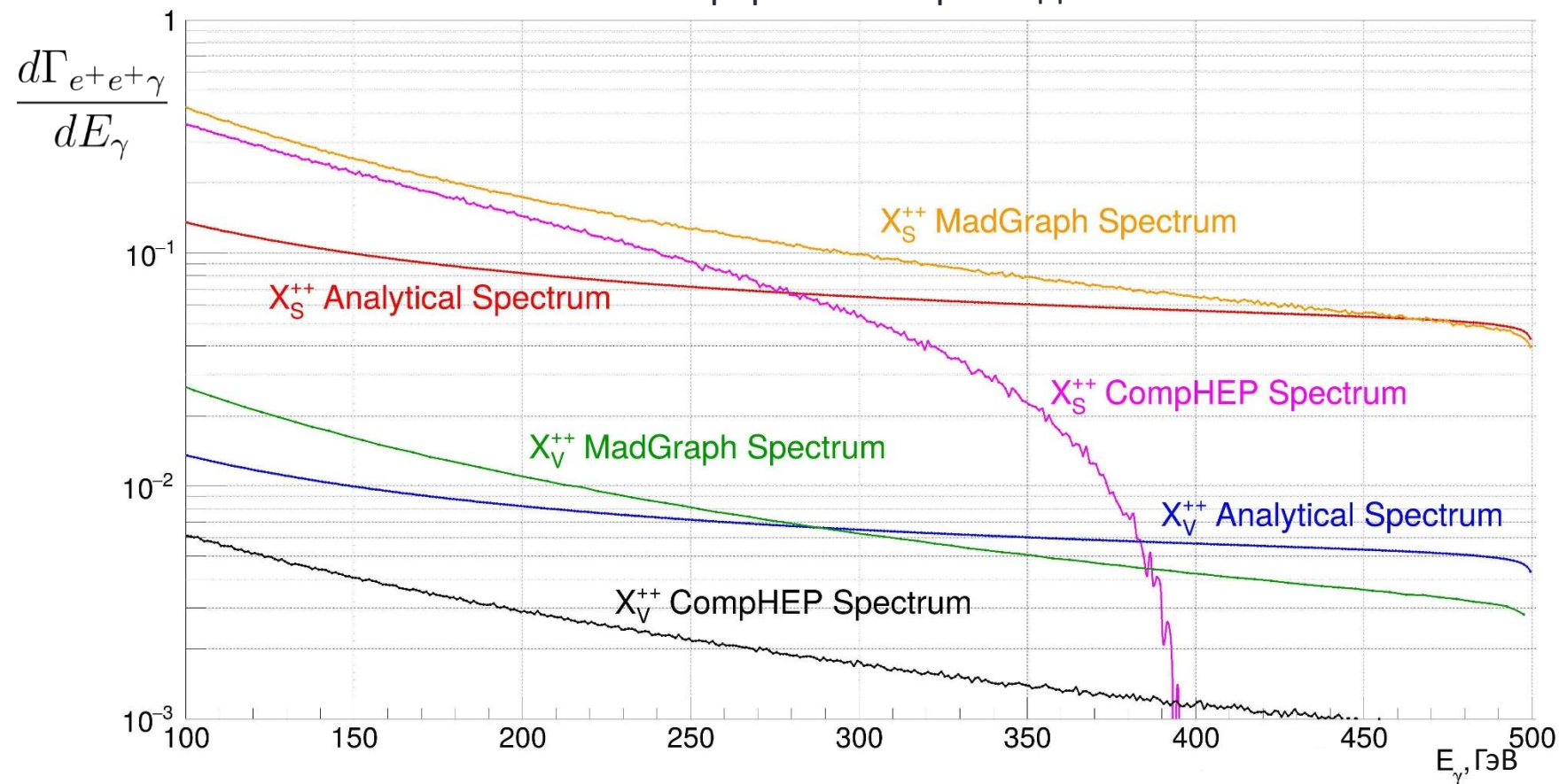
Спектр фотонов в распаде X



Сравнение средств (способов) расчета – 3

Для распада $X^{++} \rightarrow e^+ e^+ \gamma$ получены спектры фотонов конечного состояния для случаев скалярной и векторной частицы:

Спектр фотонов в распаде X

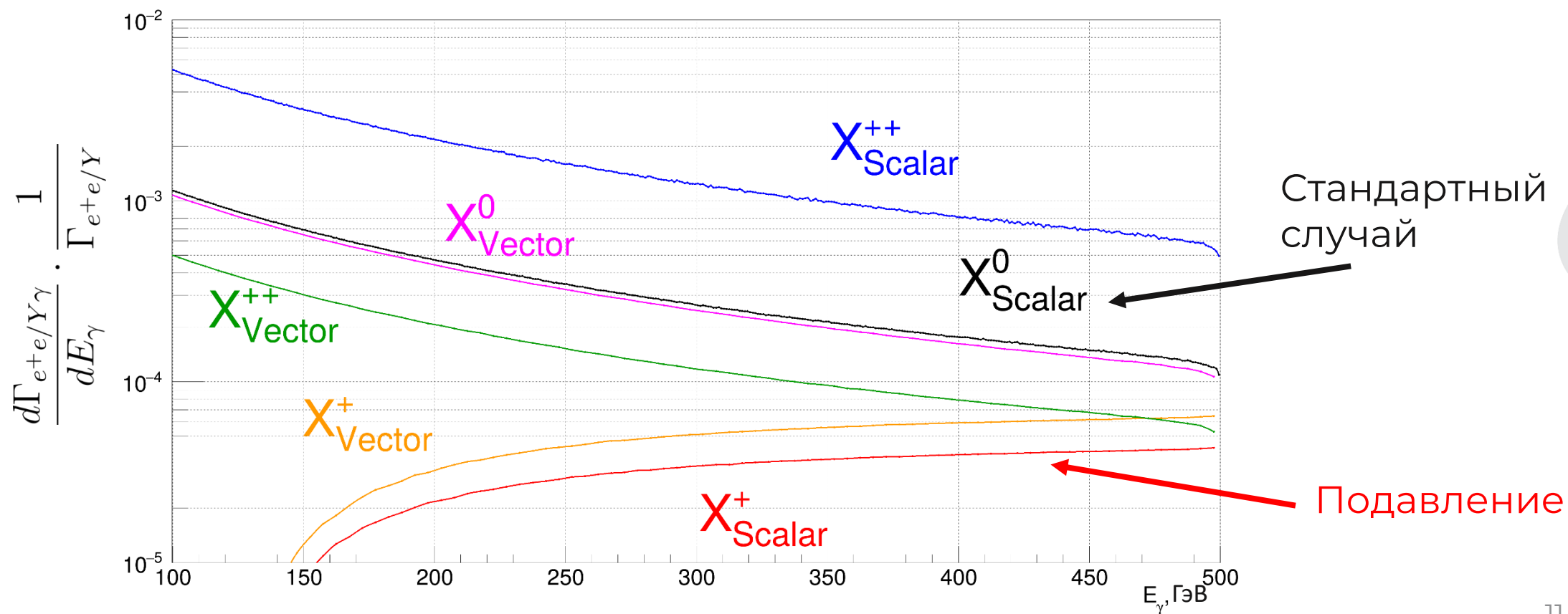


Сравнение выхода фотонов во всех моделях

Спектры получены в программе **MadGraph 5**.

Программа ComrHEP **некорректно** работает в случаях с зарядовым сопряжением (получена отрицательная ширина распада).

Спектр фотонов, нормированный на один распад X



Заключение

Разработаны **модели распада** скрытой массы, включающие скалярные и векторные бозоны с **зарядами 0, +1 и +2**.

Получены **аналитические** выражения для дифференциальных ширин трехчастичного распада для каждого типа частиц. С помощью Монте-Карло генераторов MadGraph 5 и CompHEP **проведено моделирование** процессов распада. Обнаружены **систематические недостатки** в работе программы CompHEP.

Для моды распада бозона с **зарядом +1** зафиксировано **подавление** выхода фотонов с энергией выше 100 ГэВ **в 200 раз** по отношению к распаду нейтральной скалярной частицы. Эта модель наиболее перспективна для разрешения позитронной аномалии, но требует физической интерпретации.

Полученные в настоящей работе энергетические спектры могут быть использованы для **моделирования рождения частиц** в распадах скрытой массы и **распространения** космических лучей по Галактике.

Заключение

В ходе решения начальной задачи были подняты другие важные физические вопросы, требующие качественного объяснения в дальнейшем:

- Реакции $1 \rightarrow 2$ и $2 \rightarrow 2$ неэквивалентны, несмотря на кинематику;
- Инфракрасная расходимость отсутствует в случае заряда $+1$;
- Расхождение результатов моделирования и аналитического расчета в случае с зарядовым сопряжением.

Спасибо за внимание



Замечания рецензента

1. Не объяснено, почему выбран именно этот масштаб масс, и насколько критичны результаты к его изменению (например, $M = 0,5$ или $2,0$ ТэВ).
Для объяснения избытка высокоэнергетичных позитронов.
2. Не приведена аргументация в выборе представленных значений констант a и b ;
Взяты малые значения для применения теории возмущений, при этом получены результаты в общем виде. Для численных оценок рассмотрены крайние случаи отношения a/b , не обнаружено значимого эффекта (поэтому рассмотрен 1 случай). Влияние a и b будет более подробно изучено.
3. На рисунках не указаны подпись и единицы измерения по оси ординат; отсутствует легенда к рисунку; **Согласен с замечанием.**
4. В работе нет оценки времени жизни частиц скрытой массы с учетом полученных значений ширины и констант связи;
В модели есть свободные параметры, возможно получить необходимое время жизни для данных наблюдений. В данной задаче исследовалось относительное подавление, не зависящее от значения ширины распада.
5. Отсутствует информация о количестве сгенерированных событий;
Упущено в тексте работы, значение 200 миллионов событий для каждого распада.
6. В тексте присутствуют незначительные опечатки. **Согласен с замечанием.**

Лагранжианы моделей

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

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

$$\mathcal{L}_{X_{\text{Scalar}}^+} = D_\mu X^\dagger D^\mu X - M_X^2 X^\dagger X + \bar{Y}(i\gamma^\mu \partial_\mu Y - m_Y)Y - (\bar{\psi}(a + b\gamma^5)XY + h.c.),$$

$$\mathcal{L}_{X_{\text{Vector}}^+} = -\frac{1}{2}F_{\mu\nu}^\dagger F^{\mu\nu} + M_X^2 X_\mu^\dagger X^\mu + \bar{Y}(i\gamma^\mu \partial_\mu Y - m_Y)Y - (\bar{\psi}(a + b\gamma^5)\gamma^\mu X_\mu Y + h.c.),$$

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

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

Расчет распада X на 2 частицы

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

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

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

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

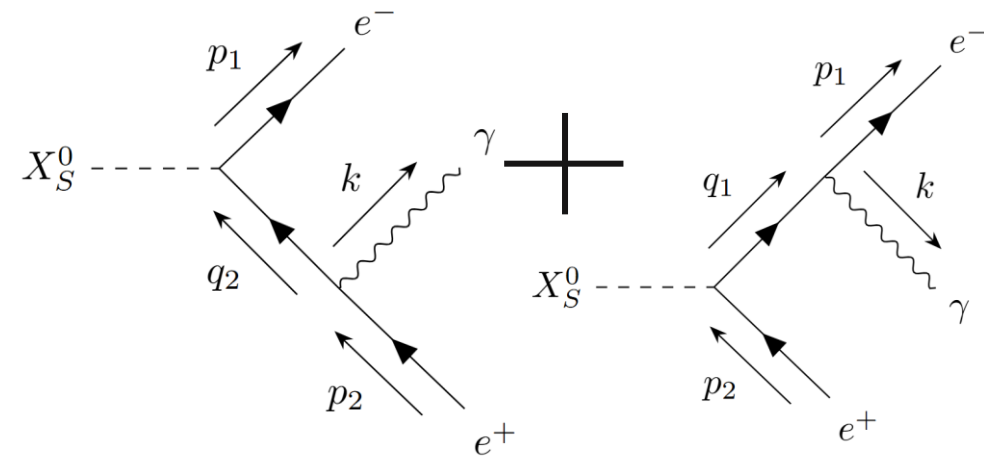
$$\Gamma_{X_S^+} = \frac{M_X}{8\pi} \sqrt{\left(1 - \frac{(m_e + m_Y)^2}{M_X^2} \right) \left(1 - \frac{(m_e - m_Y)^2}{M_X^2} \right)} \left(a^2 \left(1 - \frac{(m_e + m_Y)^2}{M_X^2} \right) + b^2 \left(1 - \frac{(m_e - m_Y)^2}{M_X^2} \right) \right),$$

$$\Gamma_{X_V^+} = \frac{M_X}{12\pi} \sqrt{\left(1 - \frac{(m_e + m_Y)^2}{M_X^2} \right) \left(1 - \frac{(m_e - m_Y)^2}{M_X^2} \right)} \cdot \left(a^2 \left(1 - \frac{m_e^2 - 6m_e m_Y + m_Y^2}{2M_X^2} - \frac{(m_e^2 - m_Y^2)^2}{2M_X^4} \right) + b^2 \left(1 - \frac{m_e^2 + 6m_e m_Y + m_Y^2}{2M_X^2} - \frac{(m_e^2 - m_Y^2)^2}{2M_X^4} \right) \right).$$

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

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

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



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