

Редкие процессы в фотон-фотонных соударениях с использованием пучков проекта комптоновского источника Национального центра физики и математики

Андреева А. Д., филиал МГУ им. Ломоносова в г. Сарове

Боос Э.Э., д.ф.-м.н., проф., член-корр. РАН

ЯДРО-2025, 1–6 июля, Санкт-Петербург

2 июля 2025 г.

Содержание

- 1 Введение
- 2 Обратный эффект Комптона
- 3 Сечение обратного комптоновского рассеяния
- 4 Спектр энергии комптоновских фотонов
- 5 Фотон-фотонное рассеяние в КЭД
- 6 Рождение резонансных скаляра и псевдоскаляра
- 7 Заключение
- 8 Backup

В данной работе исследуются редкие процессы в фотон-фотонных соударениях, такие как фотон-фотонное рассеяние (рассеяние «света на свете») и рождение гипотетических скалярных и псевдоскалярных аксионоподобных (ALP) частиц с использованием фотонных пучков проекта будущего комптоновского источника ИКИ НЦФМ.

Мотивация данного исследования обусловлена тем, что фотон-фотонное рассеяние ранее не наблюдалось в диапазоне низких энергий в связи с малой вероятностью такого взаимодействия из-за низкого сечения рассеяния.

Обратный эффект Комптона

- α – угол между импульсами электрона и фотона до рассеяния
- θ – угол между импульсами начального электрона и рассеянного фотона
- Θ – угол между импульсами начального фотона и рассеянного фотона

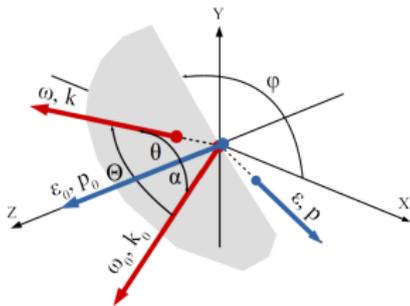


Рис. 1: Кинематика обратного комптоновского рассеяния

Выражение для энергии рассеянного фотона:

$$\omega = \frac{(\epsilon_0 + \sqrt{\epsilon_0^2 - m_e^2}) \omega_0}{\epsilon_0 - \sqrt{\epsilon_0^2 - m_e^2} + 2\omega_0} \approx \frac{4\epsilon_0^2 \omega_0}{4\epsilon_0 \omega_0 + m_e^2}$$

Таблица 1: Значения энергий комптоновских фотонов на ИКИ НЦФМ

ω_0 , ГэВ	ϵ_0 , ГэВ	ω_{max} , ГэВ	ω_{ch} , ГэВ
1.2e-9	0.07	9e-5	4.5e-5
	0.1	1.8e-4	9.2e-5
	0.5	4.5e-3	2.3e-3
	1	1.8e-2	9e-3
	1.5	4e-2	2e-2
	2	7.1e-2	3.5e-2

Предельный случай: $\alpha = \pi$. Тогда $\theta = 0$ и $\Theta = \pi$.

Сечение обратного комптоновского рассеяния

Дифференциальное сечение:

$$\frac{d\sigma_c}{dy} = \frac{2\pi\alpha^2}{\kappa m_e} \left[1 - y + \frac{1}{1-y} - \frac{4y}{\kappa(1-y)} \left(1 - \frac{y}{\kappa(1-y)} \right) - \xi_2 \zeta_{\parallel} \cdot \frac{y}{1-y} \left(\frac{2y}{\kappa(1-y)} - 1 \right) (2-y) \right],$$

где $\kappa = \frac{4\epsilon_0\omega_0}{m^2} \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)$, $y = \frac{\omega}{\epsilon_0}$, ξ_2 , ζ_{\parallel} — спиральность электронов и света.

Полное сечение:

$$\sigma_c = \sigma_c^{np} + \xi_2 \zeta_{\parallel} \sigma_1 = \frac{2\pi\alpha^2}{\kappa m_e} \left[\left(1 - \frac{4}{\kappa} - \frac{8}{\kappa^2} \right) \ln(1+\kappa) + \frac{8}{\kappa} - \frac{1}{2(\kappa+1)^2} + \frac{1}{2} + \xi_2 \zeta_{\parallel} \cdot \left(\left(1 + \frac{2}{\kappa} \right) \ln(1+\kappa) + \frac{1}{\kappa+1} - \frac{1}{2(\kappa+1)} - \frac{5}{2} \right) \right],$$

где $y < y_{max} = \frac{\kappa}{\kappa+1}$.

Энергетический спектр:

$$f_c(y) = \frac{1}{\sigma_c} \cdot \frac{d\sigma_c}{dy}$$

Ginzburg I.F., Kotkin G.L., Panfil S.L. et al. Colliding ye and ry beams based on single pass e⁺e⁻ accelerators. Part 2: Polarization effects // Nucl. Instr. Meth. A (1984) Vol.219, P.5-24.

Спектр энергии комптоновских фотонов

$$f_c(y) = \frac{\left[1 - y + \frac{1}{1-y} - \frac{4y}{\kappa(1-y)} \left(1 - \frac{y}{\kappa(1-y)}\right) - \xi_2 \zeta_{\parallel} \cdot \frac{y}{1-y} \left(\frac{2y}{\kappa(1-y)} - 1\right) (2-y)\right]}{\left[\left(1 - \frac{4}{\kappa} - \frac{8}{\kappa^2}\right) \ln(1+\kappa) + \frac{8}{\kappa} - \frac{1}{2(\kappa+1)^2} + \frac{1}{2} + \xi_2 \zeta_{\parallel} \cdot \left(\left(1 + \frac{2}{\kappa}\right) \ln(1+\kappa) + \frac{1}{\kappa+1} - \frac{1}{2(\kappa+1)} - \frac{5}{2}\right)\right]}$$

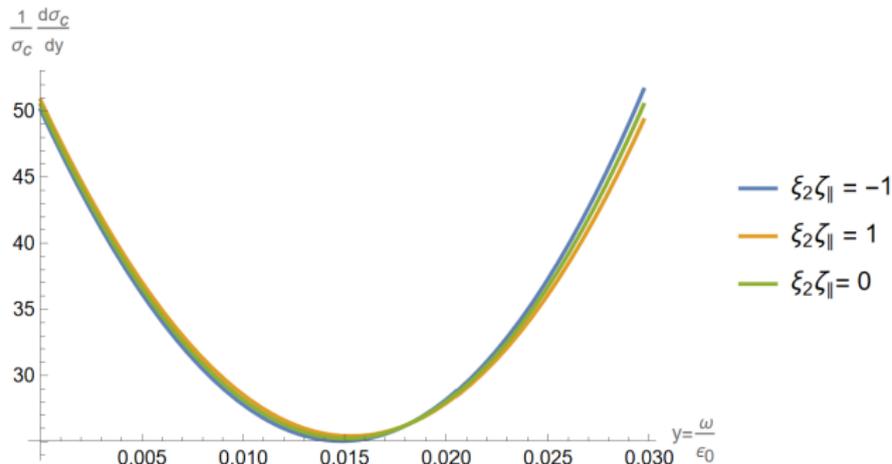


Рис. 2: Зависимость энергетического спектра комптоновского рассеяния при различных степенях поляризации света и электронного пучка для ИКИ НЦФМ, $\epsilon_0 = 2$ ГэВ

Сечение фотон-фотонного рассеяния в КЭД

Дифференциальное сечение рассеяния в произвольной системе отсчета

$$\frac{d\sigma_{\max}}{d\Omega_3} = \frac{139 \cdot 64 \alpha E_1^4 E_2^4 (E_1^2(-1 + \cos \theta_3)^2 + E_2^2(1 + \cos \theta_3)^2 + E_1 E_2(1 - \cos^2 \theta_3))^2}{(180\pi)^2 m_e^8 (E_1 + E_2 + (E_2 - E_1) \cos \theta_3)^6}$$

θ_3 — угол вылета третьего фотона

Интегральное сечение рассеяния:

$$\sigma_{\max} = \frac{973\alpha^4 E_1^3 E_2^3}{10125\pi m^8}$$

Свертка со спектром комptonовских фотонов:

$$\sigma = \frac{973\alpha^4 E_1^3 E_2^3}{10125\pi m^8} \int_0^{\frac{\kappa}{\kappa+1}} dy \frac{\left(y^3 - y^4 + \frac{y^3}{1-y} - \frac{4y^4}{\kappa(1-y)} + \frac{4y^5}{\kappa^2(1-y)^2}\right)}{\left(\left(1 - \frac{4}{\kappa} - \frac{8}{\kappa^2}\right) \ln(1+\kappa) + \frac{8}{\kappa} - \frac{1}{2(\kappa+1)^2} + \frac{1}{2}\right)}$$

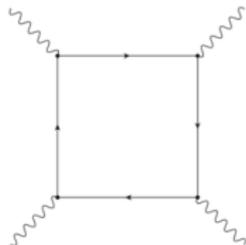
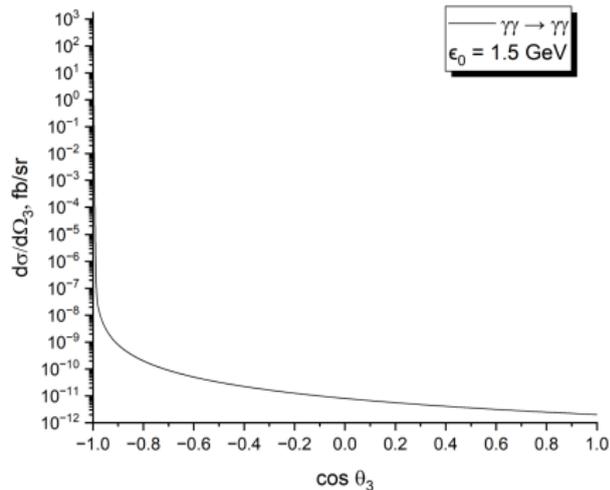
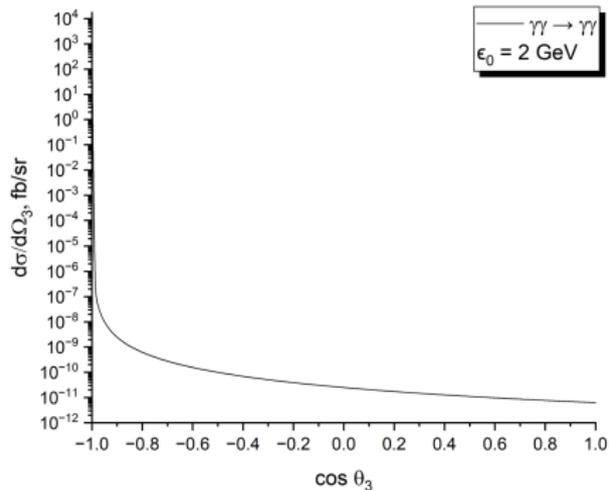
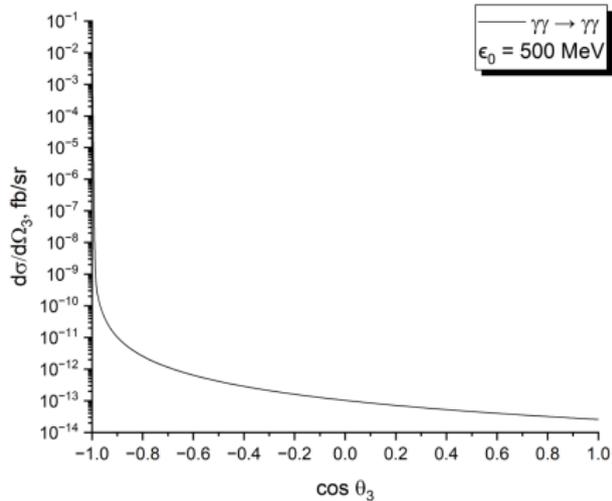
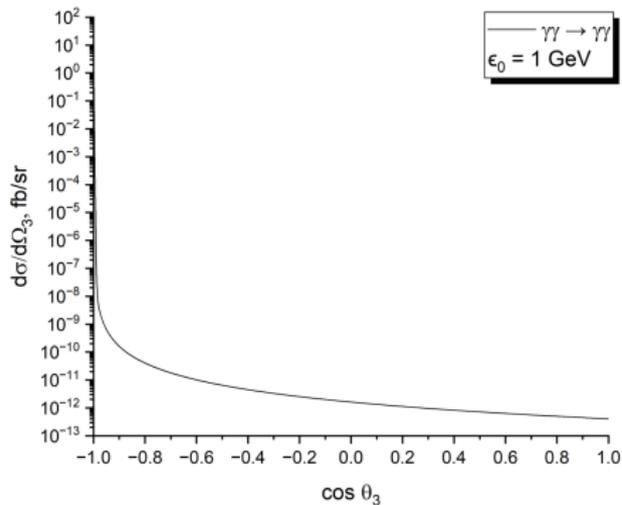


Рис. 3:
Диаграмма
фотон-фотонного
рассеяния

Угловое распределение фотон-фотонного рассеяния





Параметры комптоновского источника

$$f_{rep} = 80 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1} \quad \text{— частота столкновений пучков,}$$

$$G < 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \quad \text{— геометрический фактор,}$$

$$N_{ph} < 5.2 \cdot 10^{17}, \quad N_{\gamma} < 1 \cdot 10^7$$

— выход первичных фотонов и фотонов от обратного комптоновского рассеяния за одно взаимодействие.

Светимость фотон-фотонных столкновений:

$$L_{\gamma,ph} = f_{rep} \cdot N_{ph} \cdot N_{\gamma} \cdot G < 2.1 \cdot 10^{36} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$$

Таблица 2: Сечение фотон-фотонного рассеяния и число событий в секунду на ИКИ НЦФМ

E_1 , ГэВ	ϵ_0 , ГэВ	$\omega_{c.m.}$, ГэВ	\sqrt{s} , ГэВ	σ_{max} , фб	σ , фб	N, с ⁻¹
1.2e-9	0.07	2.2e-7	4.3e-7	9.4e-12	2.6e-12	5.4e-15
	0.1	3.1e-7	6.1e-7	8e-11	2.1e-11	4.6e-14
	0.5	1.5e-6	3.1e-6	1.2e-6	3.3e-7	7e-10
	1	3.1e-6	6.1e-6	7.6e-5	2.1e-5	4.4e-8
	1.5	4.6e-6	9.1e-6	8.4e-4	2.3e-4	4.7e-7
	2	6.1e-6	1.2e-5	1.2e-5	4.6e-3	2.6e-6

Сечение рождения резонансных скаляра и псевдоскаляра

Лагранжианы взаимодействия с фотонами:

$$\mathcal{L}_{\text{int},s} = -\frac{1}{4}g_{s\gamma\gamma}sF^{\mu\nu}F_{\mu\nu}, \quad \mathcal{L}_{\text{int},a} = -\frac{1}{4}g_{a\gamma\gamma}aF^{\mu\nu}\tilde{F}_{\mu\nu},$$

где s , a — скалярное и псевдоскалярное поля, $F^{\mu\nu}$ — тензор электромагнитного поля, $g_{s\gamma\gamma}$, $g_{a\gamma\gamma}$ — константы взаимодействия, $\tilde{F}_{\mu\nu} = \frac{1}{2}\varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma}F^{\rho\sigma}$.

Квадраты амплитуд рассеяния:

$$|M_{s,a}|^2 = g_{s,a\gamma\gamma}^2 \cdot 2(k_1 \cdot k_2)^2 = g_{s,a\gamma\gamma}^2 \cdot \frac{m_{s,a}^4}{2}$$

Ширина распада:

$$\Gamma_{s,a \rightarrow \gamma\gamma} = \frac{1}{64\pi} g_{s,a\gamma\gamma}^2 m_{s,a}^3$$

Сечение рассеяния:

$$\sigma(\gamma\gamma \rightarrow s, a \rightarrow \gamma\gamma) = \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} dy f_c(y) \frac{4\pi^2}{m_{s,a}^3} \Gamma_{s,a \rightarrow \gamma\gamma} \text{Br}(s, a \rightarrow \gamma\gamma)$$

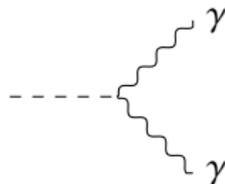


Рис. 4:
Диаграмма
Фейнмана:
 $s, a \rightarrow \gamma\gamma$

Jikia G., Soldner-Rembold S. *Light Higgs Production at a Photon Collider* // arXiv preprint hep-ex/0101056. – 2001

Ограничения на параметры скаляра и псевдоскаляра

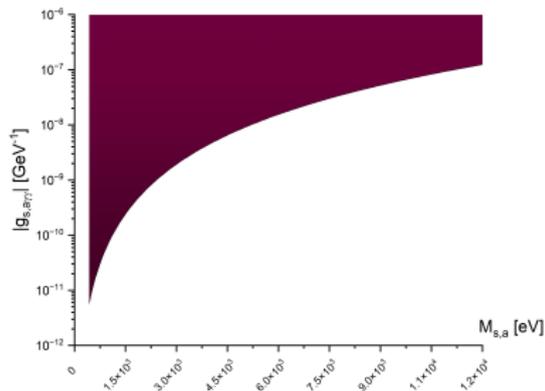


Рис. 5: Axion-photon coupling

Таблица 3: Зависимость массы и ширины распада скалярной и псевдоскалярной частицы от энергий фотонов и первичного электрона

E_1 , ГэВ	ϵ_0 , ГэВ	$m_{s,a}$, ГэВ	$\Gamma_{s,a \rightarrow \gamma\gamma}$, ГэВ
1.2e-9	0.07	4.3e-7	9.2e-36
	0.1	6.1e-7	2.7e-35
	0.5	3.1e-6	3.3e-33
	1	6.1e-6	2.6e-32
	1.5	9.1e-6	8.7e-32
	2	1.2e-5	2e-31

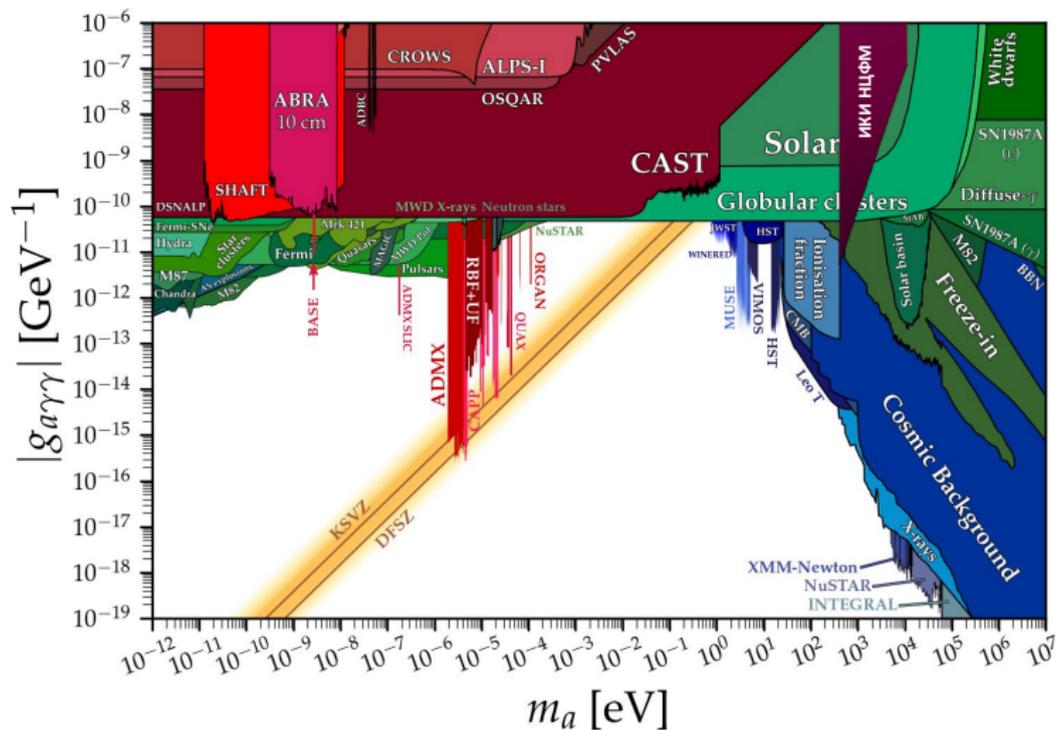


Рис. 6: Область ограничений для массы и константы связи псевдоскалярной частицы

Заключение

В рамках данного исследования была впервые получена формула для дифференциального сечения фотон-фотонного рассеяния в произвольной системе отсчета в низкоэнергетическом приближении, численно получены сечение фотон-фотонного рассеяния, число событий (выход гамма-квантов) и определена область параметров (массы и константы связи с двумя фотонами), при которых сечение рождения скалярной и псевдоскалярной (аксионоподобной) частицы сравнивается с сечением фотон-фотонного рассеяния. Оказалось, что полученные параметры воспроизводят имеющиеся косвенные астрофизические ограничения. Реализация фотон-фотонных соударений с использованием фотонных пучков ИКИ НЦФМ позволила бы поставить прямые ограничения в области масс порядка 6-12 кэВ, являющиеся предпочтительными.

Спектр комптоновских фотонов при высоких энергиях электрона

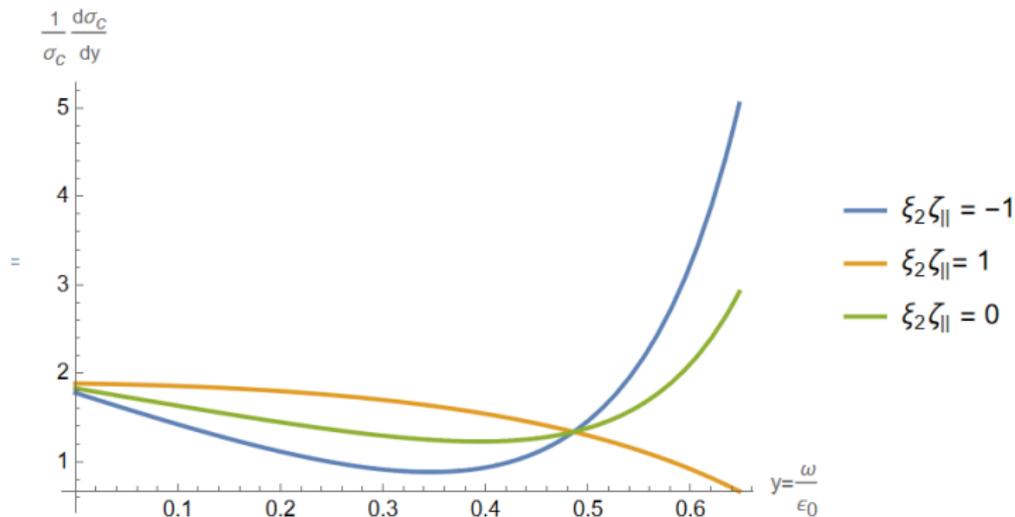


Рис. 7: Зависимость энергетического спектра комптоновского рассеяния при различных степенях поляризации света и электронного пучка при $\epsilon_0 = 100$ ГэВ, $\kappa = 2.69$

Влияние поляризационных эффектов

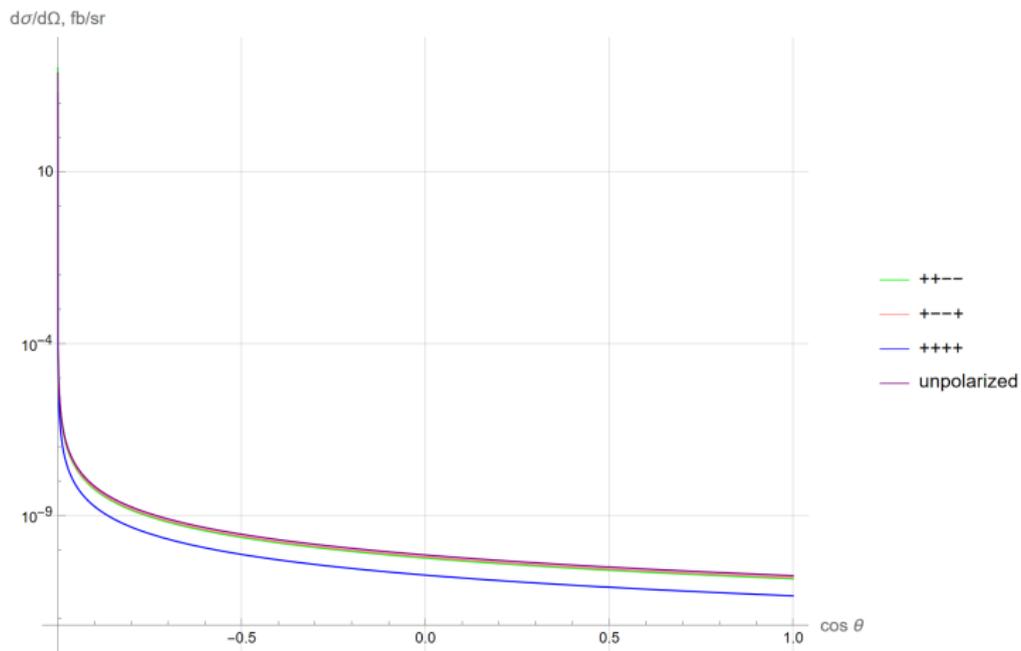


Рис. 8: Дифференциальное сечение фотон-фотонного рассеяния при различных спиральностях фотонов λ

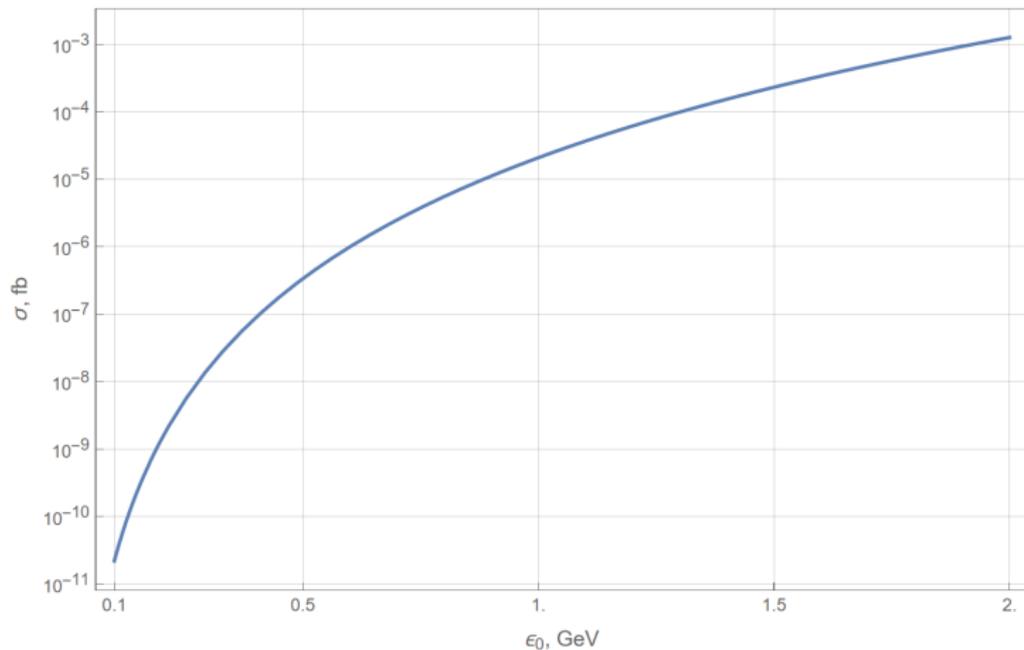


Рис. 9: Зависимость полного сечения фотон-фотонного рассеяния от энергии электронов ϵ_0