

Перспективы поиска новой физики в фотон-фотонных соударениях с использованием пучков комптоновского источника Национального центра физики и математики

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

Семинар памяти профессора Б.С. Ишханова
"Фотоядерные исследования. Состояние и перспективы"

24 октября 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 настоящее время процессы фотон-фотонных соударений представляют значительный интерес в физике элементарных частиц, особенно в связи с редкими нелинейными эффектами квантовой электродинамики (КЭД). Осуществление таких процессов позволяет не только проверять фундаментальные предсказания КЭД, но и исследовать возможность существования экзотических объектов, таких как гипотетические псевдоскалярные аксионоподобные частицы (АПЧ) или скалярные частицы. Такие частицы могут возникать как «голдстоуновские бозоны» в результате спонтанного нарушения каких-либо новых глобальных симметрий, что делает их потенциальными кандидатами для объяснения проявлений новой физики, включая тёмную материю.

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

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

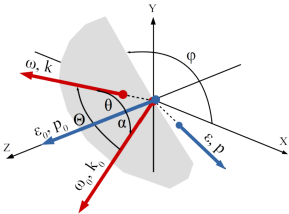


Рис. 1: Кинематика обратного комптоновского рассеяния

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

Выражение для энергии рассеянного фотона:

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

Таблица 1: Значения энергий комптоновских фотонов на ИКИ НЦФМ

ω_0 , эВ	ϵ_0 , ГэВ	ω_c , ГэВ	ω_{ref} , ГэВ
1.2	0.07	$9 \cdot 10^{-5}$	$4.5 \cdot 10^{-5}$
	0.1	$1.8 \cdot 10^{-4}$	$9.2 \cdot 10^{-5}$
	0.5	$4.5 \cdot 10^{-3}$	$2.3 \cdot 10^{-3}$
	1	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-3}$
	1.5	$4 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
	2	$7.1 \cdot 10^{-2}$	$3.5 \cdot 10^{-2}$

Сечение обратного комптоновского рассеяния

Дифференциальное сечение:

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

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

Полное сечение:

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

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 γe and $\gamma\gamma$ 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

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

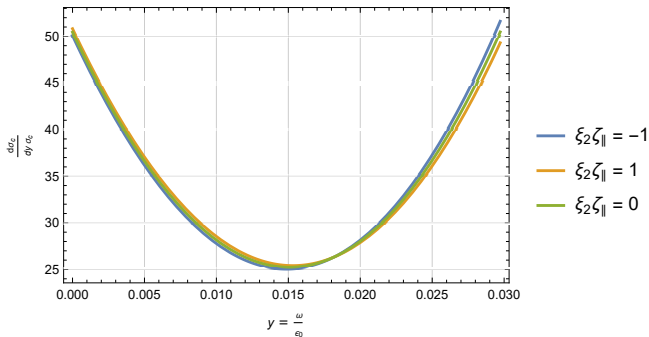


Рис. 2: Зависимость энергетического спектра комптоновского рассеяния при различных степенях поляризации света и электронного пучка для ИКИ НЦФМ, $\epsilon_0 = 2$ ГэВ

Сечение фотон-фотонного рассеяния в КЭД

Дифференциальное сечение рассеяния в произвольной системе отсчета

$$\frac{d\sigma_{\max}}{d\Omega_3} = \frac{139 \cdot 64 \alpha^4 \omega_1^4 \omega_2^4 [\omega_1^2(1 - \cos \theta_3)^2 + \omega_1 \omega_2(1 - \cos^2 \theta_3) + \omega_2^2(1 + \cos \theta_3)^2]^2}{(180\pi)^2 m_e^8 [\omega_1(1 - \cos \theta_3) + \omega_2(1 + \cos \theta_3)]^6}$$

ω_1, ω_2 — энергии комптоновского и лазерного фотонов, θ_3 — угол вылета третьего фотона

Интегральное сечение рассеяния:

$$\sigma_{\max} = \frac{937 \alpha^4 \omega_{c.m.}^6}{10125 \pi m_e^8}.$$

Свертка со спектром комптоновских фотонов:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_3} = \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} dy f_c(y) \frac{d\sigma_{\max}(y)}{d\Omega_3},$$

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

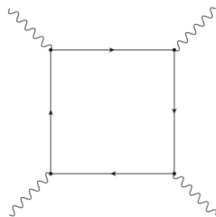
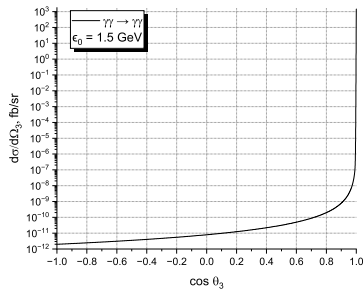
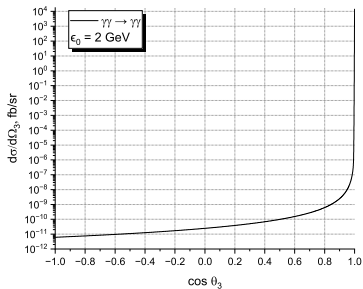
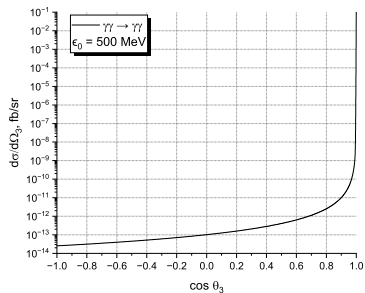
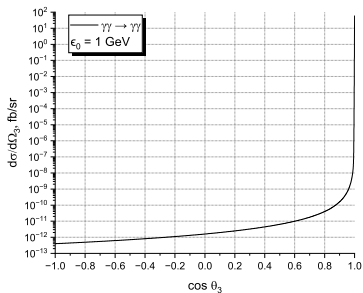


Рис. 3: Диаграмма фотон-фотонного рассеяния

Угловое распределение фотон-фотонного рассеяния





Параметры комптоновского источника

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

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

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

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

Светимость фотон-фотонных столкновений:

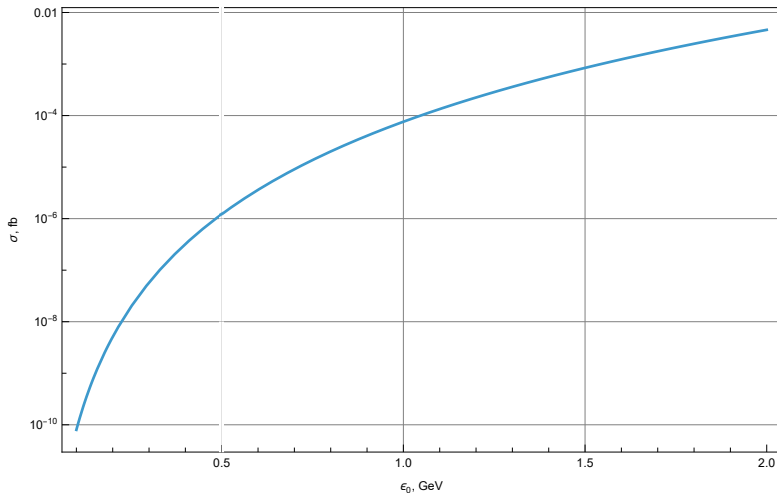
$$L_{\gamma,ph} = f_{\text{rep}} \cdot N_{ph} \cdot N_{\gamma} \cdot G < 2.1 \cdot 10^{36} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$$

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

ω_0 , эВ	ϵ_0 , ГэВ	$\omega_{c.m.}$, ГэВ	\sqrt{s} , ГэВ	σ_{max} , фб	σ , фб	N, с ⁻¹
1.2	0.07	$2.2 \cdot 10^{-7}$	$4.3 \cdot 10^{-7}$	$9.4 \cdot 10^{-12}$	$2.6 \cdot 10^{-12}$	$5.4 \cdot 10^{-15}$
	0.1	$3.1 \cdot 10^{-7}$	$6.1 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-11}$	$2.1 \cdot 10^{-11}$	$4.6 \cdot 10^{-14}$
	0.5	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$3.1 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$3.3 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-10}$
	1	$3.1 \cdot 10^{-6}$	$6.1 \cdot 10^{-6}$	$7.6 \cdot 10^{-5}$	$2.1 \cdot 10^{-5}$	$4.4 \cdot 10^{-8}$
	1.5	$4.6 \cdot 10^{-6}$	$9.1 \cdot 10^{-6}$	$8.4 \cdot 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-4}$	$4.7 \cdot 10^{-7}$
	2	$6.1 \cdot 10^{-6}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$4.6 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$2.6 \cdot 10^{-6}$

Зависимость полного сечения фотон-фотонного рассеяния от энергии электронов ϵ_0

$$\sigma_{\max}(\epsilon_0) \approx \frac{937.64 \alpha^4 \epsilon_0^6 \omega_0^6}{10125 \pi m_e^{14}}$$



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:

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

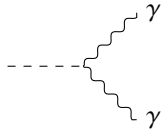


Рис. 4:
Диаграмма
Фейнмана:
 $s, a \rightarrow \gamma\gamma$

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

Ограничения на параметры скаляра и псевдоскаляра

Асимптотическая значимость:

$\delta_{compl} = \sqrt{2 \left[(s + b) \cdot \ln \left(1 + \frac{s}{b} \right) - s \right]}$, $\delta_{approx} = \frac{s}{\sqrt{b}}$ — приближение для случая малого по сравнению с фоном сигнала ($s \ll b$), s и b — число сигнальных и фоновых событий. $\tau = 10^7$ с.

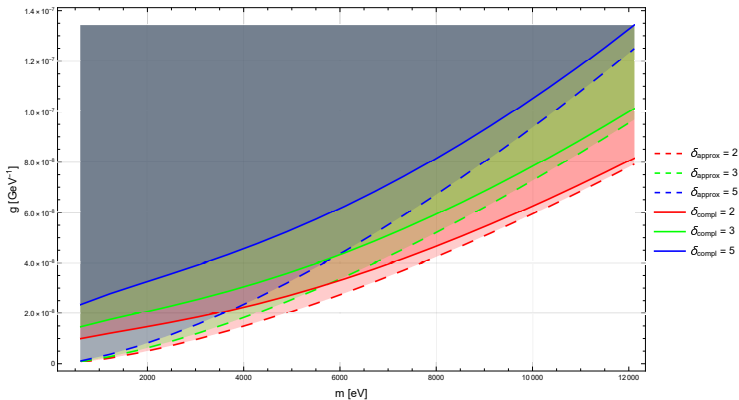


Рис. 5: Область ограничений для массы и константы связи с двумя фотонами скалярной и псевдоскалярной частицы при различных уровнях δ_{approx} , δ_{compl}

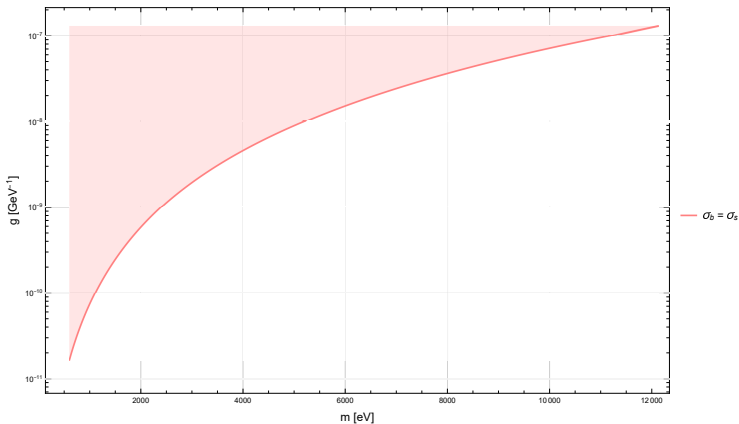


Рис. 6: Область ограничений для массы и константы связи с двумя фотонами скалярной и псевдоскалярной частицы, в которой $\sigma_b < \sigma_s$

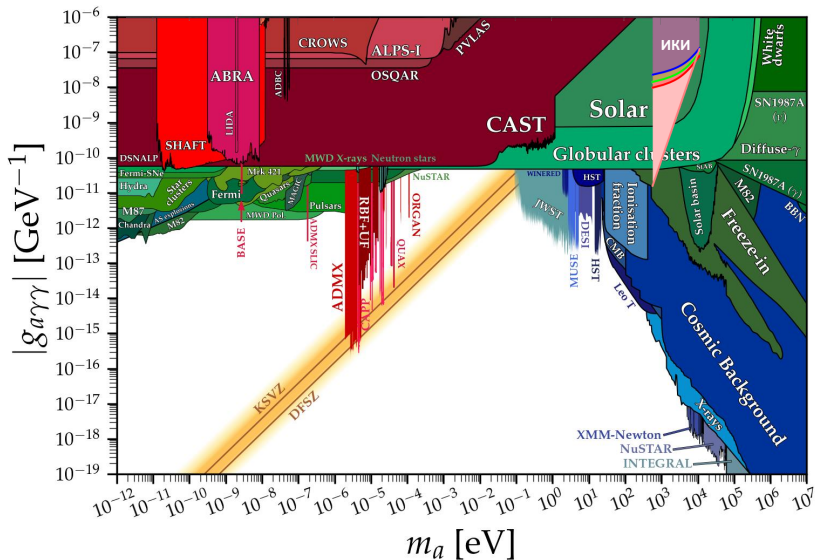


Рис. 7: Axion-photon coupling

Заключение

В работе исследовались перспективы поиска новой физики в фотон-фотонных соударениях с использованием фотонных пучков проекта будущего комптоновского источника ИКИ НЦФМ.

Были получены формула для сечения фотон-фотонного рассеяния в приближении малой инвариантной энергии столкновений в произвольной системе отсчета, предсказания для угловых распределений, числа ожидаемых событий при различных энергиях в процессе фотон-фотонного рассеяния.

Определена область параметров (масса и константа связи с двумя фотонами), в которой сигнал от рождения гипотетической скалярной или псевдоскалярной частицы превышает различные пороги статистической значимости над фоном, соответствующим рассеянию «света на свете» и в которой сечение сигнала превосходит сечение фона. Полученная теоретическая область пересекается с косвенными астрофизическими ограничениями, а реализация фотон-фотонных соударений с использованием пучков ИКИ НЦФМ позволила бы поставить прямые ограничения на константу связи с двумя фотонами в области масс в районе 10 кэВ.

Спектр комптоновских фотонов при высоких энергиях электрона

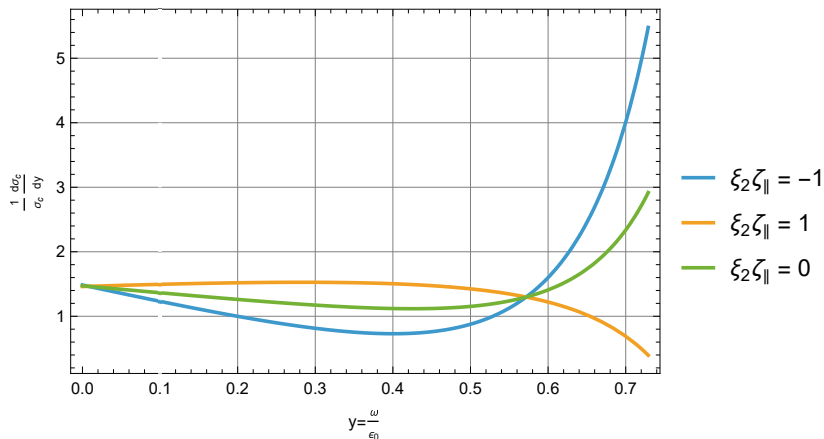


Рис. 8: Зависимость энергетического спектра комптоновского рассеяния при различных степенях поляризации света и электронного пучка при $\epsilon_0 = 100$ ГэВ, $\kappa = 2.69$

Влияние поляризационных эффектов

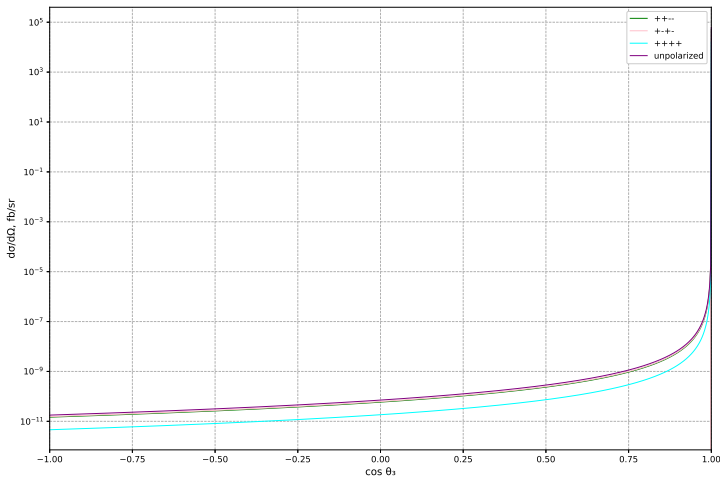


Рис. 9: Дифференциальное сечение фотон-фотонного рассеяния при различных спиральностях фотонов λ