

Генератор событий Ursgen для моделирования двухфотонных и фотоядерных процессов в ультрапериферических столкновениях тяжелых ионов

Н. Бурмасов, Е. Крышень

Ультрапериферические столкновения (УПС): $b > R_1 + R_2$

→ адронные взаимодействия подавлены

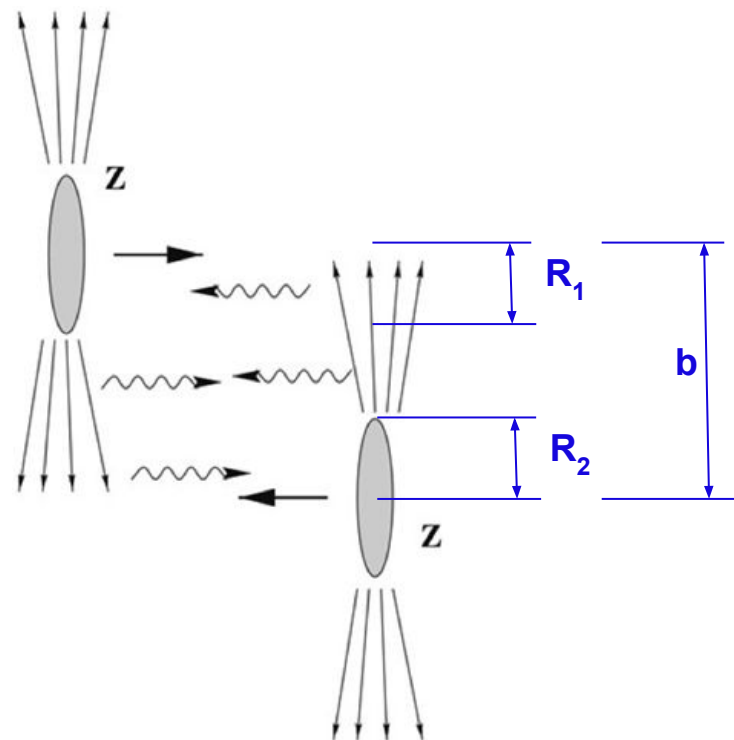
Поток фотонов:

→ можно описать в приближении

эквивалентных фотонов

→ $Q < 1/R \sim 30$ МэВ

→ пропорционален Z^2



Обзоры по физике УПС:

A.J. Baltz et al, Phys. Rept. 458 (2008) 1

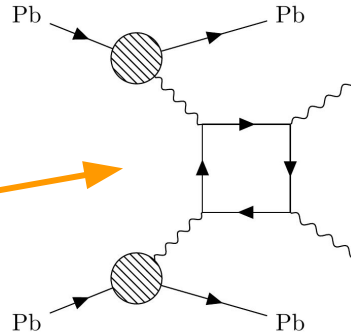
J.G. Contreras, J.D. Tapia Takaki. Int.J.Mod.Phys. A30 (2015) 1542012

S.Klein and P. Steinberg, Ann. Rev. Nuclear Part. Sci. 70 (2020) 323

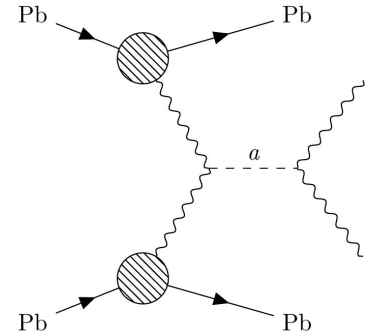
Ультрапериферические столкновения на ЛHC можно использовать для исследования $\gamma\gamma$, γp и γPb взаимодействий при высоких энергиях

Ультрапериферические столкновения

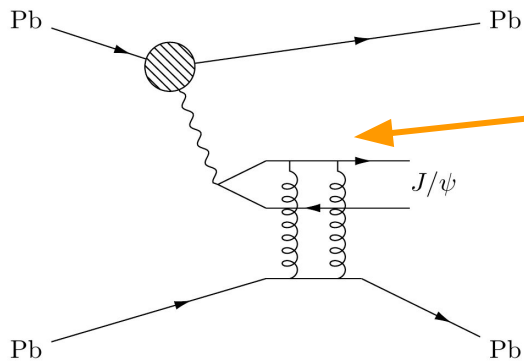
Поиск новой физики: суперсимметрия, слабо взаимодействующие частицы, новые резонансы...



Рассеяние света на свете



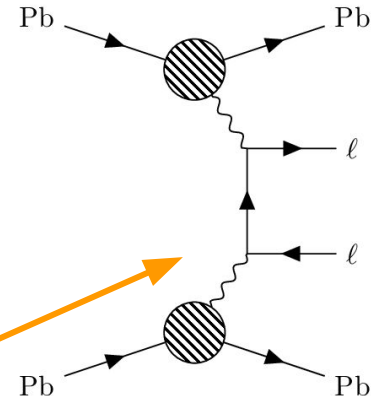
Аксиноподобные частицы



Фоторождение векторных мезонов

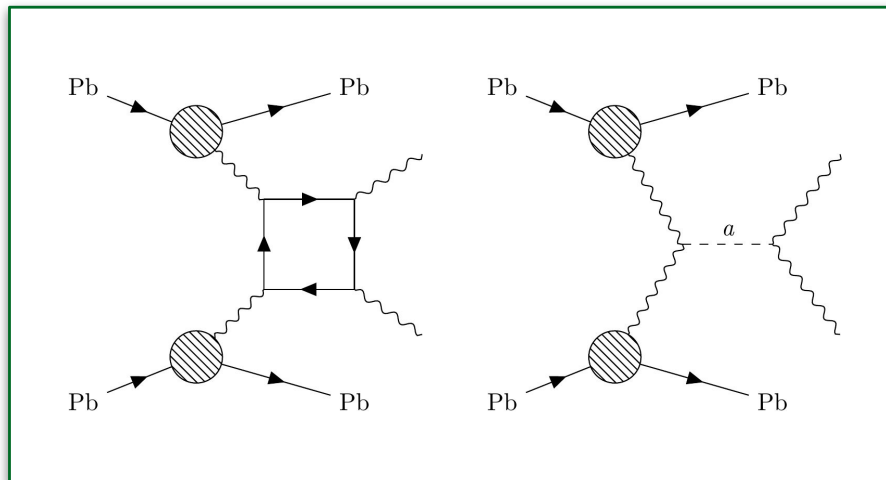
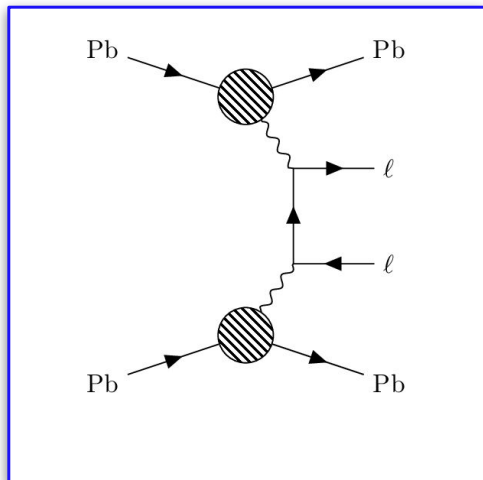
Исследование партонной плотности в ядрах при малых бьеркеновских x

Проверка описания сильных ЭМ полей в приближении эквивалентных фотонов, измерение аномальных магнитных моментов...



Пары лептонов

Двухфотонные взаимодействия



Сечение двухфотонных взаимодействий

- Сечение в ультра-периферических столкновениях

$$\frac{d^2\sigma(AA \rightarrow AA + X)}{dY dM} = \frac{d^2N_{\gamma\gamma}}{dY dM} \sigma(\gamma\gamma \rightarrow X)$$

- Двухфотонная светимость

$$\frac{d^2N_{\gamma\gamma}}{dk_1 dk_2} = \iint d^2b_{\gamma_1} d^2b_{\gamma_2} \Gamma_{AA}(b) N_{\gamma A}(k_1, b_{\gamma_1}) N_{\gamma A}(k_2, b_{\gamma_2})$$

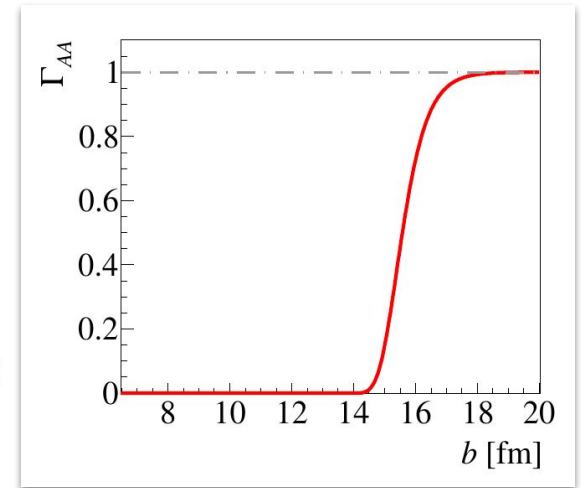
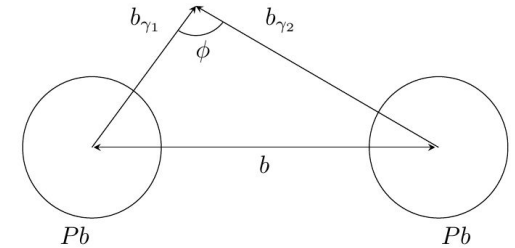
- Реалистичное моделирование вероятности отсутствия адронных взаимодействий

$$\Gamma_{AA}(b) = \exp\left(-\sigma_{NN}^{\text{tot}} \int d^2\vec{b}' T_A(|\vec{b}'|) T_A(|\vec{b} - \vec{b}'|)\right) \quad T_A(b) = \int dz \rho(b, z)$$

- Описание потоков фотонов

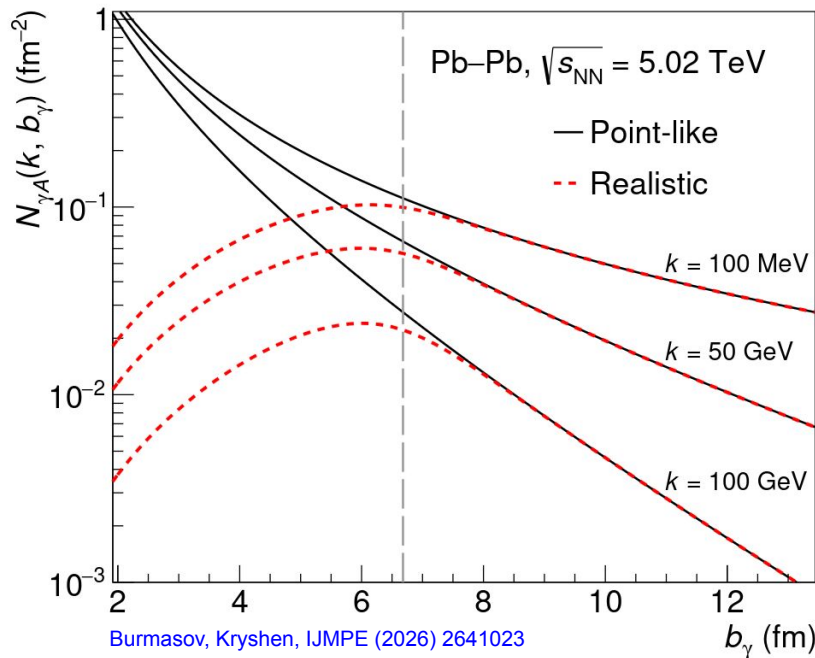
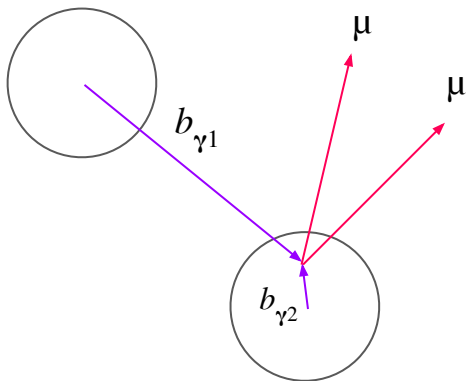
$$N_{\gamma A}(k, b_\gamma) = \frac{Z^2 \alpha k^2}{\gamma^2 \pi^2} \left[K_1^2(x) + \frac{1}{\gamma^2} K_0^2(x) \right] \longleftrightarrow N_{\gamma A}(k, b_\gamma) = \frac{Z^2 \alpha}{\gamma \pi^2} \left| \int \frac{dk_\perp k_\perp^2}{k_\perp^2 + k^2/\gamma^2} F_{\text{ch}}(k_\perp^2 + k^2/\gamma^2) J_1(b_\gamma k_\perp) \right|^2$$

$x = kb_\gamma/\gamma$



Потоки фотонов

CPC 277 (2022), 108388, arXiv: 2111.11383



Burmasov, Kryshen, IJMPPE (2026) 2641023

Точечный источник

$$N_{\gamma A}(k, b_{\gamma}) = \frac{Z^2 \alpha k^2}{\gamma^2 \pi^2} \left[K_1^2(x) + \frac{1}{\gamma^2} K_0^2(x) \right]$$

$$x = kb_{\gamma}/\gamma$$

Реалистичный форм-фактор

$$N_{\gamma A}(k, b_{\gamma}) = \frac{Z^2 \alpha}{\gamma \pi^2} \left| \int \frac{dk_{\perp} k_{\perp}^2}{k_{\perp}^2 + k^2/\gamma^2} F_{\text{ch}}(k_{\perp}^2 + k^2/\gamma^2) J_1(b_{\gamma} k_{\perp}) \right|^2$$

Vidovic et al. Phys.Rev.C 47 (1993) 2308-2319

Поляризация фотонов в начальном состоянии

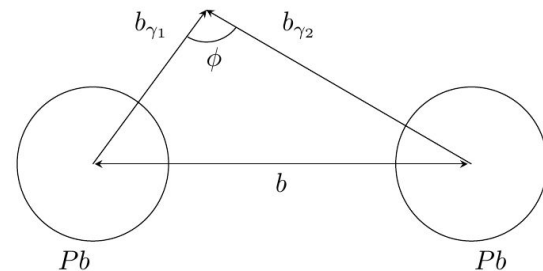
Сечение УПС

Параллельная
компонента

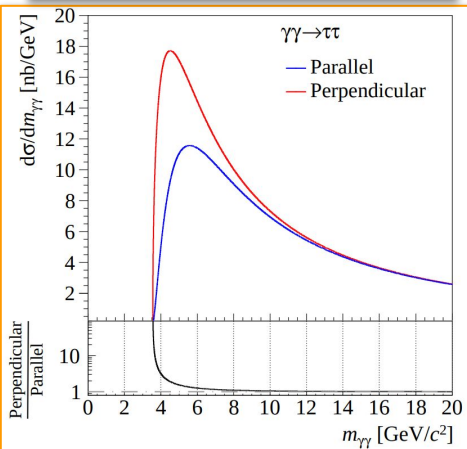
Перпендикулярная
компонента

$$\frac{d^2\sigma(AA \rightarrow AA + \ell\ell)}{dY dM} = \frac{d^2 N_{\gamma\gamma}^{\parallel}}{dY dM} \sigma^{\parallel}(\gamma\gamma \rightarrow \ell\ell) + \frac{d^2 N_{\gamma\gamma}^{\perp}}{dY dM} \sigma^{\perp}(\gamma\gamma \rightarrow \ell\ell)$$

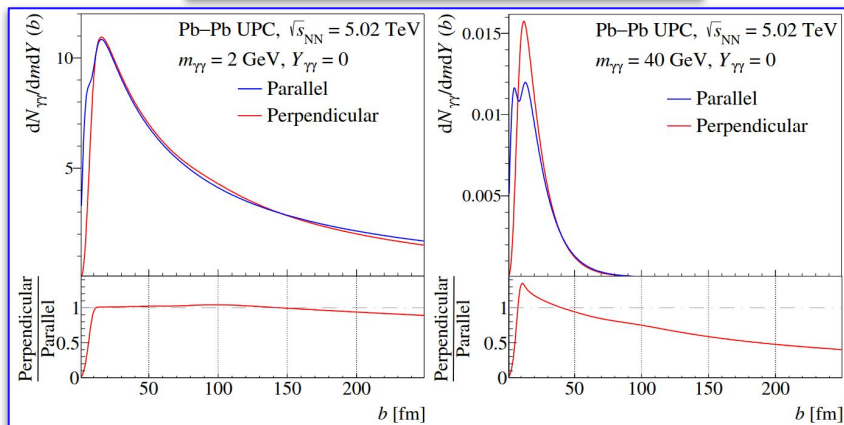
$$\frac{d^2 N_{\gamma\gamma}^{[\parallel, \perp]}}{dk_1 dk_2} = \int \int d^2 b_{\gamma_1} d^2 b_{\gamma_2} \Gamma_{AA}(b) N_{\gamma A}(k_1, b_{\gamma_1}) N_{\gamma A}(k_2, b_{\gamma_2}) \left[\frac{|\vec{b}_{\gamma_1} \cdot \vec{b}_{\gamma_2}|^2}{b_{\gamma_1}^2 b_{\gamma_2}^2}, \frac{|\vec{b}_{\gamma_1} \times \vec{b}_{\gamma_2}|^2}{b_{\gamma_1}^2 b_{\gamma_2}^2} \right]$$



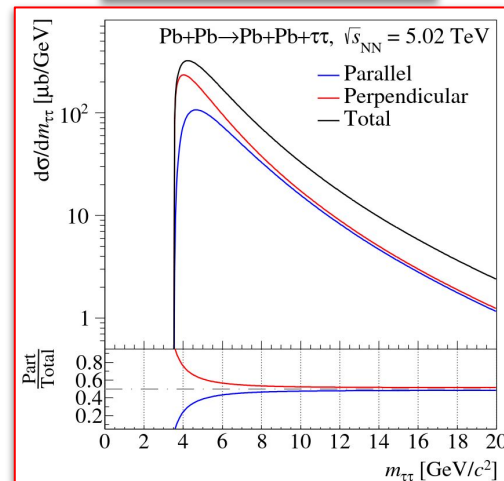
Элементарный процесс



Двухфотонная светимость



Сечение УПС



Поляризация фотонов в начальном состоянии

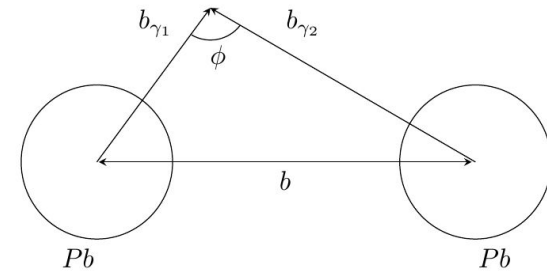
Сечение УПС

Параллельная
компонента

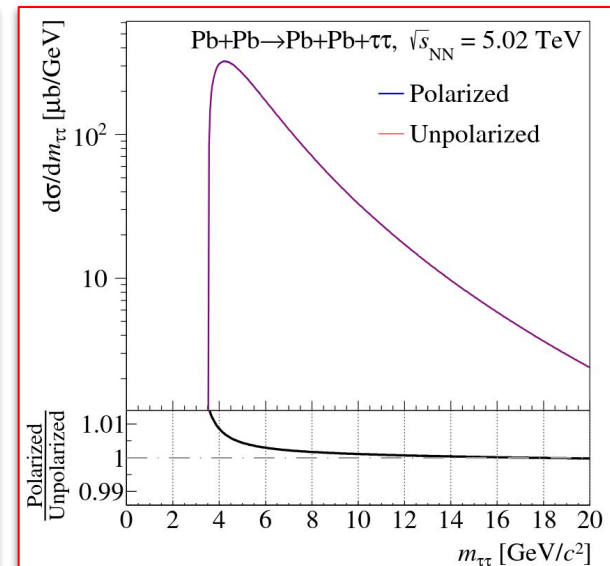
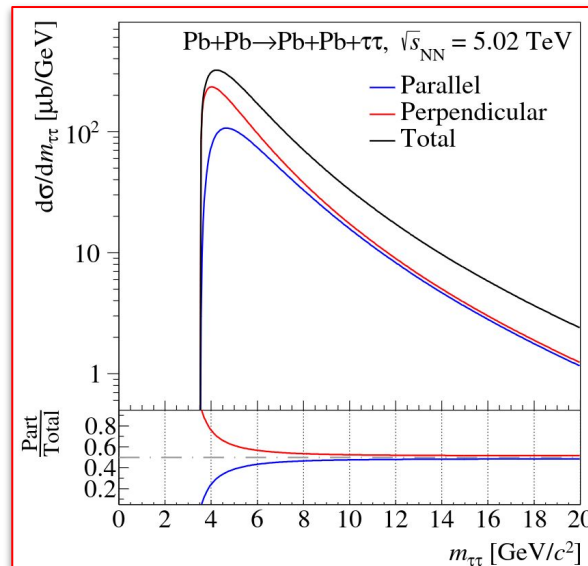
Перпендикулярная
компонента

$$\frac{d^2\sigma(AA \rightarrow AA + \ell\ell)}{dY dM} = \frac{d^2 N_{\gamma\gamma}^{\parallel}}{dY dM} \sigma^{\parallel}(\gamma\gamma \rightarrow \ell\ell) + \frac{d^2 N_{\gamma\gamma}^{\perp}}{dY dM} \sigma^{\perp}(\gamma\gamma \rightarrow \ell\ell)$$

$$\frac{d^2 N_{\gamma\gamma}^{[\parallel, \perp]}}{dk_1 dk_2} = \int \int d^2 b_{\gamma_1} d^2 b_{\gamma_2} \Gamma_{AA}(b) N_{\gamma A}(k_1, b_{\gamma_1}) N_{\gamma A}(k_2, b_{\gamma_2}) \left[\frac{|\vec{b}_{\gamma_1} \cdot \vec{b}_{\gamma_2}|^2}{b_{\gamma_1}^2 b_{\gamma_2}^2}, \frac{|\vec{b}_{\gamma_1} \times \vec{b}_{\gamma_2}|^2}{b_{\gamma_1}^2 b_{\gamma_2}^2} \right]$$



- В сечении $\gamma\gamma \rightarrow \ell\ell$ доминирует перпендикулярная компонента
- Учет поляризационных эффектов приводит к небольшому росту УПС сечения при малых массах в $\gamma\gamma \rightarrow \ell\ell$



Эксклюзивное рождение дилептонов

Элементарное сечение

$$\frac{d\sigma(\gamma\gamma \rightarrow \ell\ell)}{dz} = \frac{2\pi}{64\pi^2 s} \frac{|\vec{p}_\ell|}{|\vec{p}_\gamma|} \frac{1}{4} \sum_{\text{spin}} |\mathcal{M}|^2$$

$$z = \cos\theta$$

Амплитуда

$$\mathcal{M} = (-i) \epsilon_{1\mu} \epsilon_{2\nu} \bar{u}(p_3) \left(i\Gamma^{(\gamma\ell\ell)\mu}(p_1) \frac{i(p_t + m_\ell)}{p_t^2 - m_\ell^2 + i\epsilon} i\Gamma^{(\gamma\ell\ell)\nu}(p_2) + i\Gamma^{(\gamma\ell\ell)\nu}(p_2) \frac{i(p_u + m_\ell)}{p_u^2 - m_\ell^2 + i\epsilon} i\Gamma^{(\gamma\ell\ell)\mu}(p_1) \right) v(p_4)$$

Вершинная функция

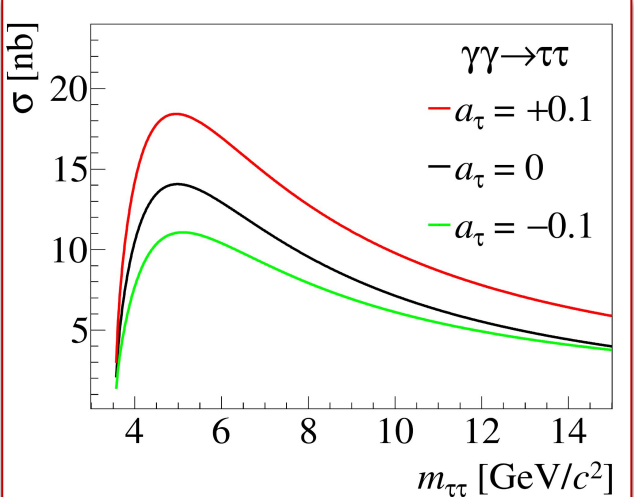
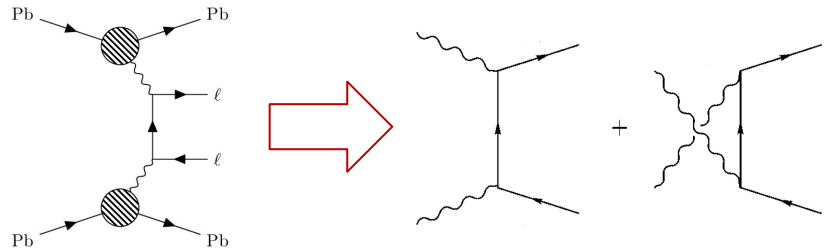
$$i\Gamma_\mu^{(\gamma\ell\ell)}(q) = -ie \left[\gamma_\mu F_1(q^2) + \frac{i}{2m_\ell} \sigma_{\mu\nu} q^\nu F_2(q^2) \right]$$

При малых q , что применимо к УПС:

$$q^2 \rightarrow 0 \quad F_1(0) = 1 \quad F_2(0) = a_\ell$$

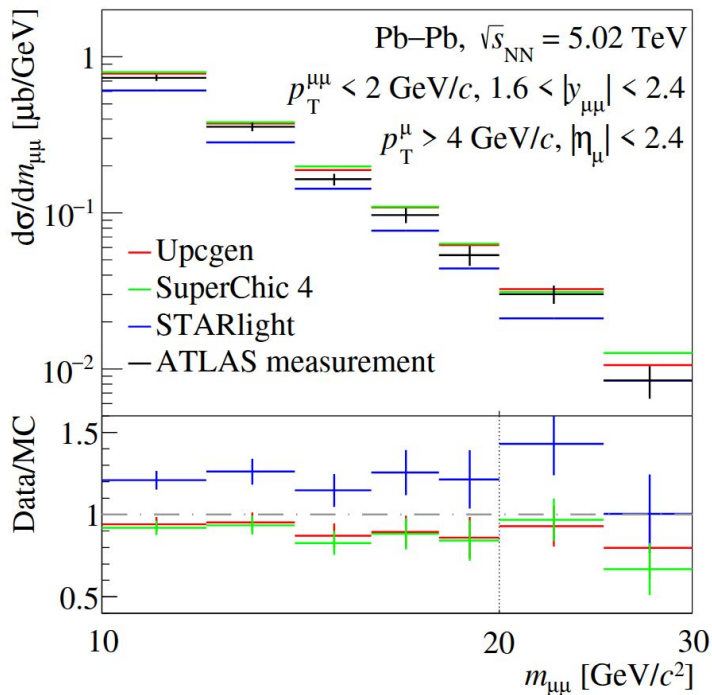
Сводится к формуле Брейта-Уилера при $a_\ell = 0$

$$\frac{d\sigma}{dz} = \frac{\pi\alpha^2}{s} \beta \left(2 + 4\beta^2 \frac{\beta^2(1-z^2)z^2 + 1 - \beta^2}{(1 - \beta^2 z^2)^2} \right) \quad \beta^2 = 1 - \frac{4m_\ell^2}{s}$$

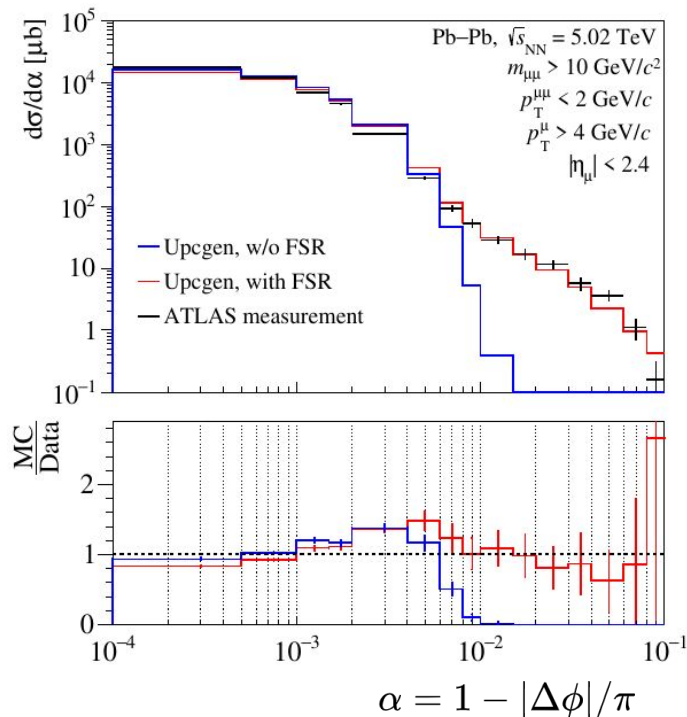


Эксклюзивное рождение пар мюонов в ATLAS

Burmasov, Kryshen et al. CPC 277 (2022), 108388



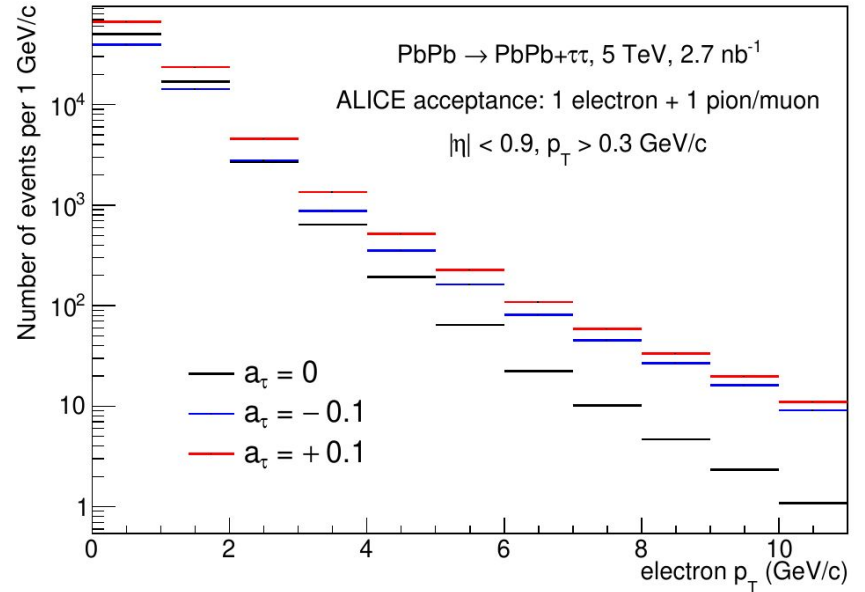
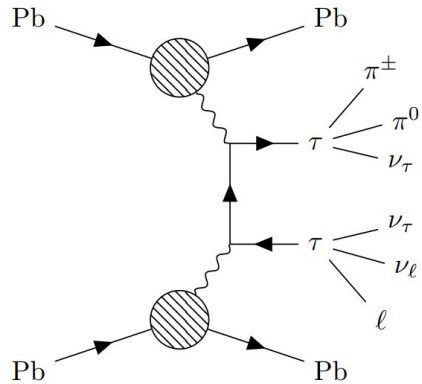
Burmasov, Kryshen et al. CPC 277 (2022), 108388



- STARlight: точечный источник, отрезание потоков $b_Y = R_A$
- SuperChic, Upcgen: реалистичный форм-фактор
- Улучшение описания экспериментальных данных

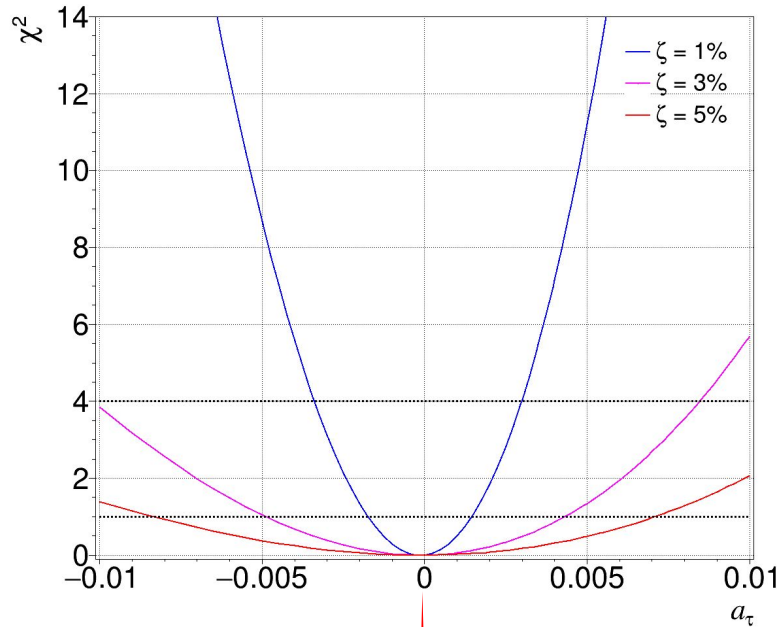
- Излучение в конечном состоянии (FSR) реализовано интеграцией с Pythia8, что улучшает описание кинематических распределений

Аномальный магнитный момент τ -лептона с ALICE



- Ursgen+Pythia 8 для моделирования распадов
- Расчет сечений $\gamma\gamma \rightarrow \ell\ell$ с произвольным значением a_ℓ
- **1 e + 1 π/μ** : $|\eta| < 0.9, p_T^e > 300 \text{ MeV}/c$

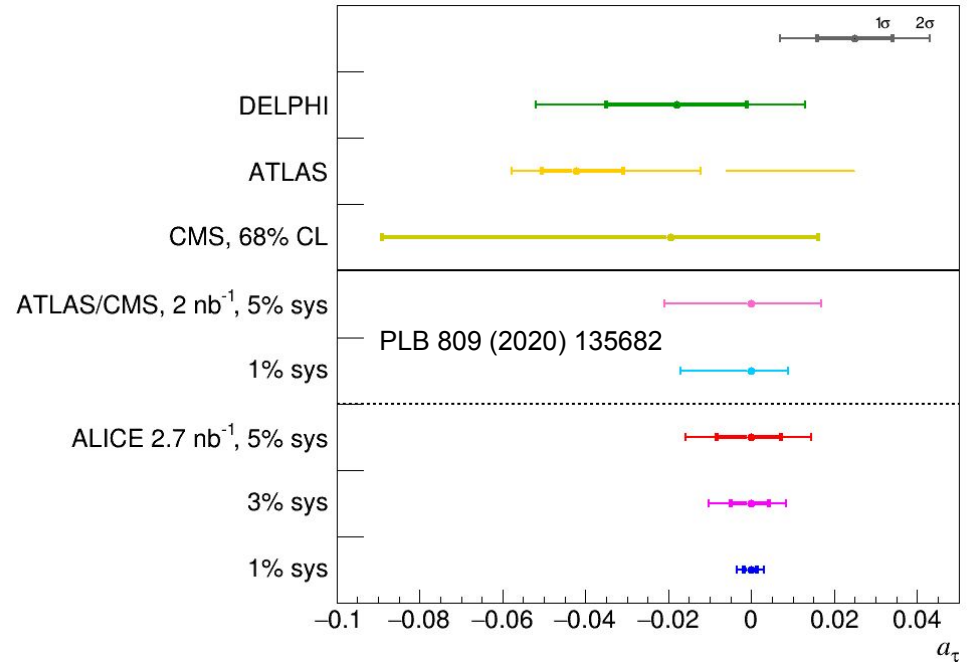
Аномальный магнитный момент τ -лептона с ALICE



Отклонение от CM

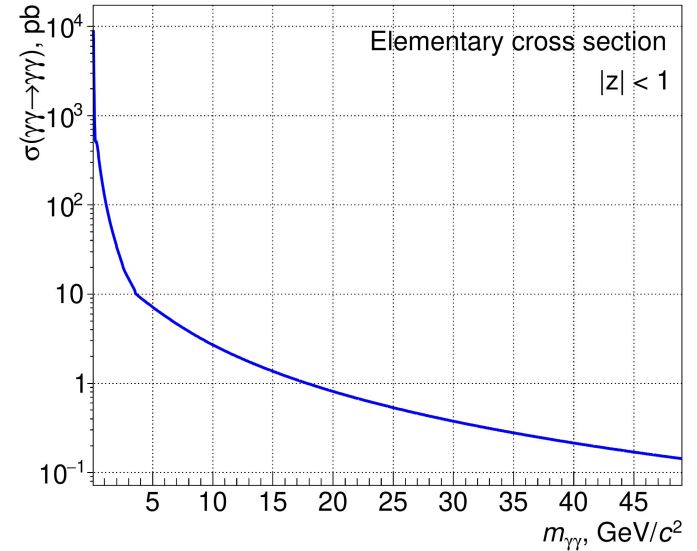
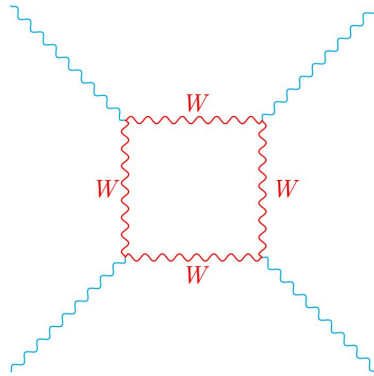
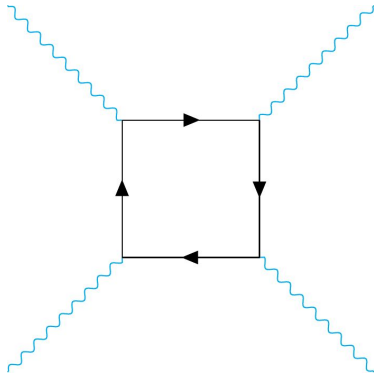
$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_{\text{bins}}} \frac{[S_i(0) - S_i(a_\tau)]^2}{\sigma_{\text{stat}}^2 + (\sigma_{\text{syst}}^{\text{uncorr}})^2}$$

- Возможные систематические ошибки: $\zeta = 1\%$, 3% , 5%
- Точность измерений ограничена систематикой



Рассеяние света на свете в Урсген

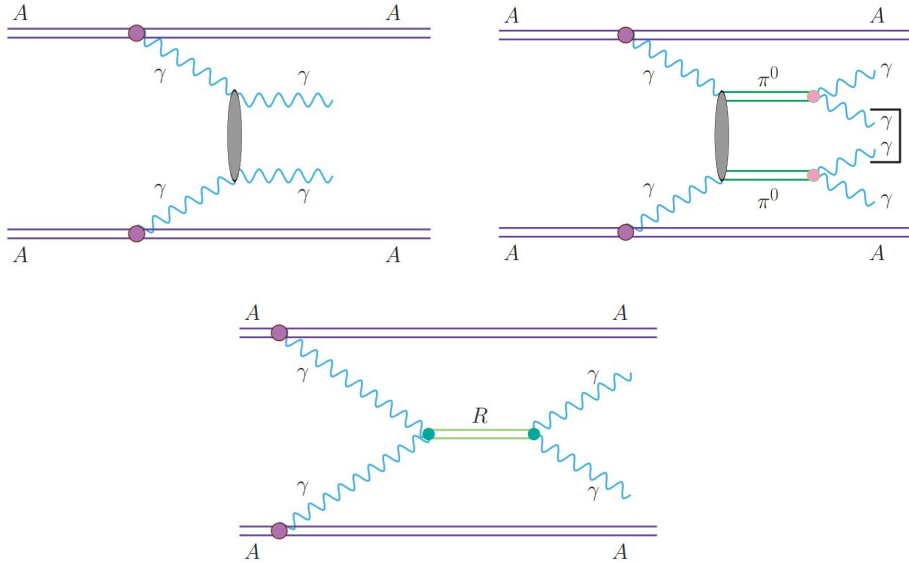
- Расчёт элементарного сечения в СМ с помощью FormCalc
- Расчёт на уровне однопетлевой диаграммы: лептоны, кварки, W



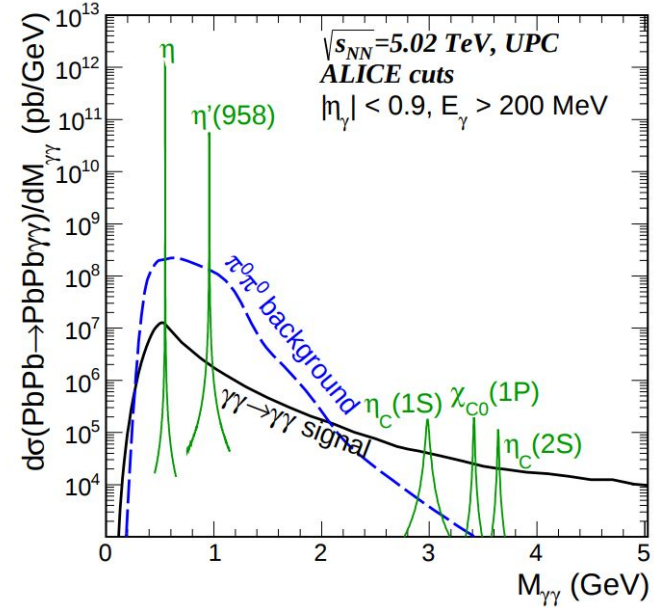
Трудности измерений

При малых массах пары фотонов:

- Комбинаторный фон из пар вторичных фотонов из распадов $\pi^0\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma\gamma\gamma$
- Фотоны из распадов резонансов

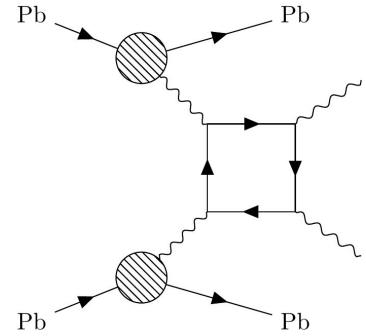


Klusek-Gawenda et al. PRD 99 (2019) 093013

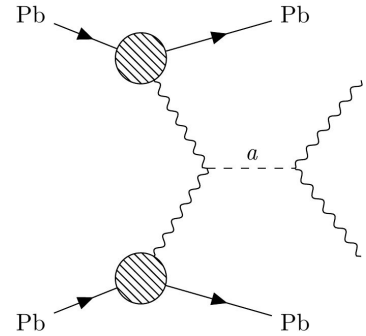


Рассеяние света на свете и поиск ALP

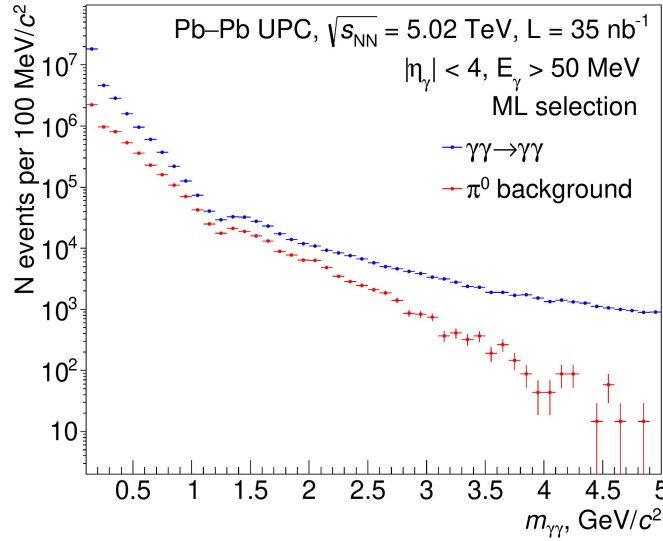
Пределы из ATLAS, JHEP 03, 243 (2021)
 Проекция для ATLAS/CMS из PRL 118 (2017), 171801
 Проекция для LHCb из EPJC 81 (2021), 522



Рассеяние света на свете (LbyL)



Рождение аксионоподобных частиц (ALP)

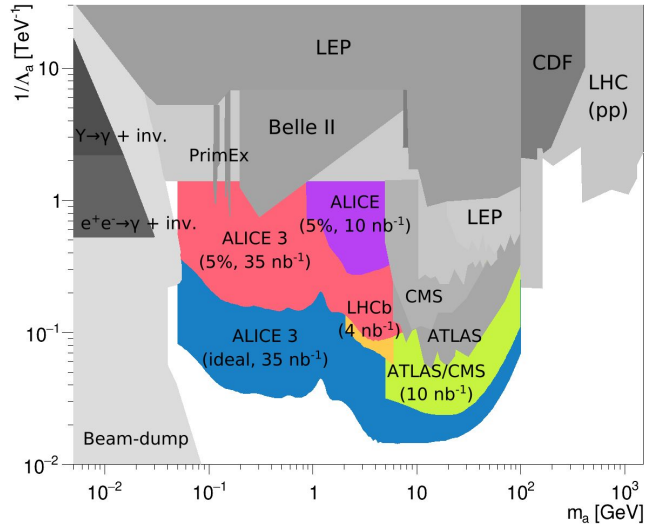


Рассеяния света на свете:

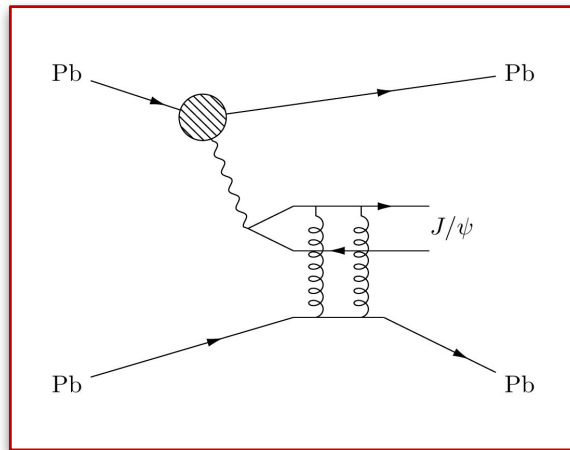
- Измерения при $m < 5 \text{ ГэВ}/c^2$

Поиск ALP:

- Возможность покрыть область $50 \text{ МэВ}/c^2 - 5 \text{ ГэВ}/c^2$
- Идеальный случай → калориметры?



Когерентное фоторождение тяжелых векторных мезонов



Когерентное фоторождение векторных мезонов

Сечение

$$\frac{d\sigma_{AA \rightarrow AAV}(y)}{dy} = n_\gamma(y) \sigma_{\gamma A \rightarrow AV}(y) + n_\gamma(-y) \sigma_{\gamma A \rightarrow AV}(-y)$$

Поток фотонов

Фоторождение на ядре

$$\sigma_{\gamma A \rightarrow VA}(W_{\gamma p}) = R_g^2(x, \mu^2) \sigma_{\gamma A \rightarrow VA}^{\text{IA}}(W_{\gamma p})$$

Глюонная экранировка

$$R(x, \mu^2) = \frac{f_A(x, \mu^2)}{A f_N(x, \mu^2)}$$

Guzey, Zhilov, JHEP 10 (2013) 207 Frankfurt, Guzey, Strikman, Zhilov, JHEP 08 (2003) 043

$$W_{\gamma p} = \sqrt{2E_N m_V} e^{-y/2} \quad x = m_V^2 / W_{\gamma p}^2 \quad \mu^2 = \frac{m_V^2}{4}$$

Импульсное приближение - нет ядерных взаимодействий

$$\sigma_{\gamma A \rightarrow VA}^{\text{IA}}(W_{\gamma p}) = \left. \frac{d\sigma_{\gamma p \rightarrow Vp}(W_{\gamma p})}{dt} \right|_{t=0} \Phi_A(t_{\min})$$

Интеграл квадрата форм-фактора

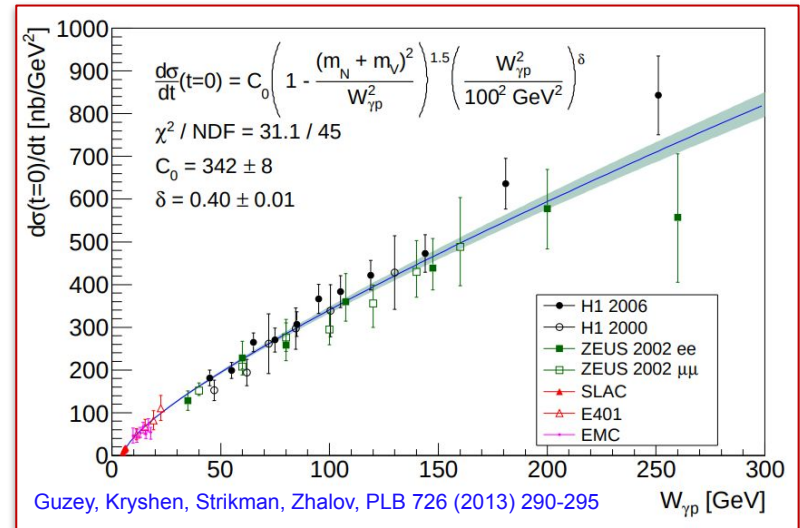
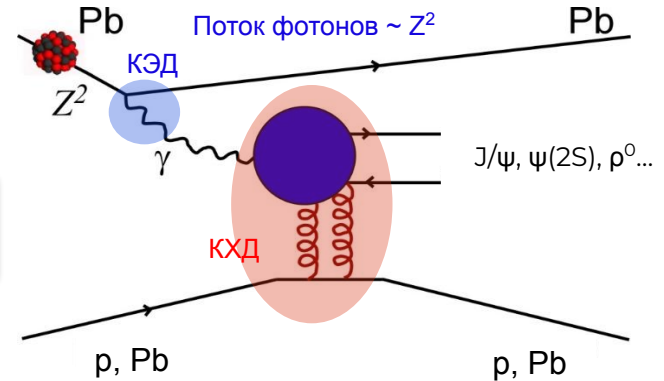
Фоторождение на протоне

$$\left. \frac{d\sigma_{\gamma p \rightarrow Vp}(W_{\gamma p})}{dt} \right|_{t=0} = C_p(\mu^2) \alpha_s^2(\mu^2) [x g_p(x, \mu^2)]^2$$

Ryskin, Z.Phys.C 57 (1993) 89-92

Глюонная плотность в протоне

Параметризация

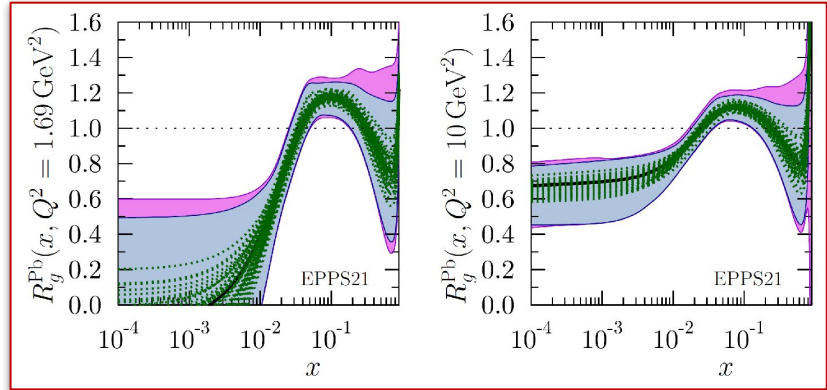
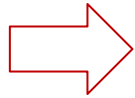
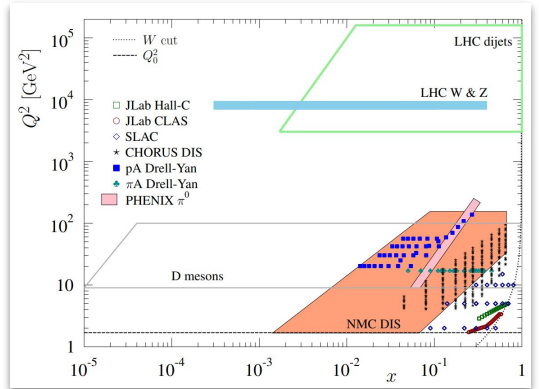


Guzey, Kryshen, Strikman, Zhilov, PLB 726 (2013) 290-295

Глюонные экранировки

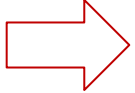
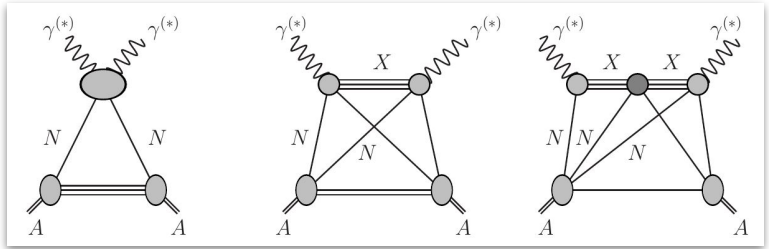
- Экранировка ~ подавление сечений при фоторождении на ядре по сравнению с протонами

Eskola et al., EPJC 82 (2022) 413

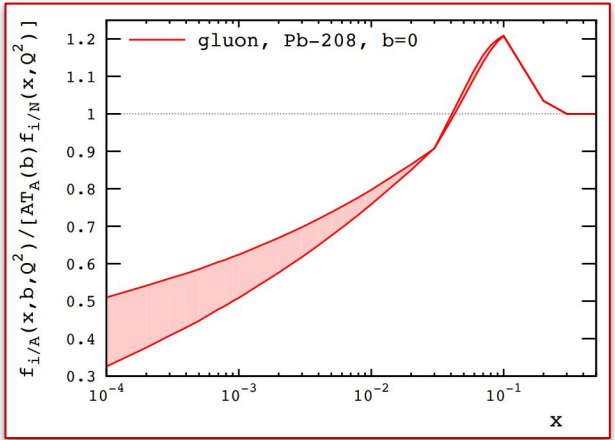


Frankfurt, Guzey, Stasto, Strikman, Rept.Prog.Phys. 85 (2022) 12, 126301
 Frankfurt, Guzey, Strikman, Phys. Rept. 512 (2012) 255-393

Аппроксимация данных по процессу Дрелла-Яна и глубоко неупругому рассеянию (EPS09)



Приближение лидирующих твистов (LTA)
 → Формализм Глаубера-Грибова



→ перерассеяние на нуклонах + учет дифракционных состояний

Сравнение с экспериментами на БАК

→ Импульсное приближение сильно завышает оценку сечения

При больших быстротах:

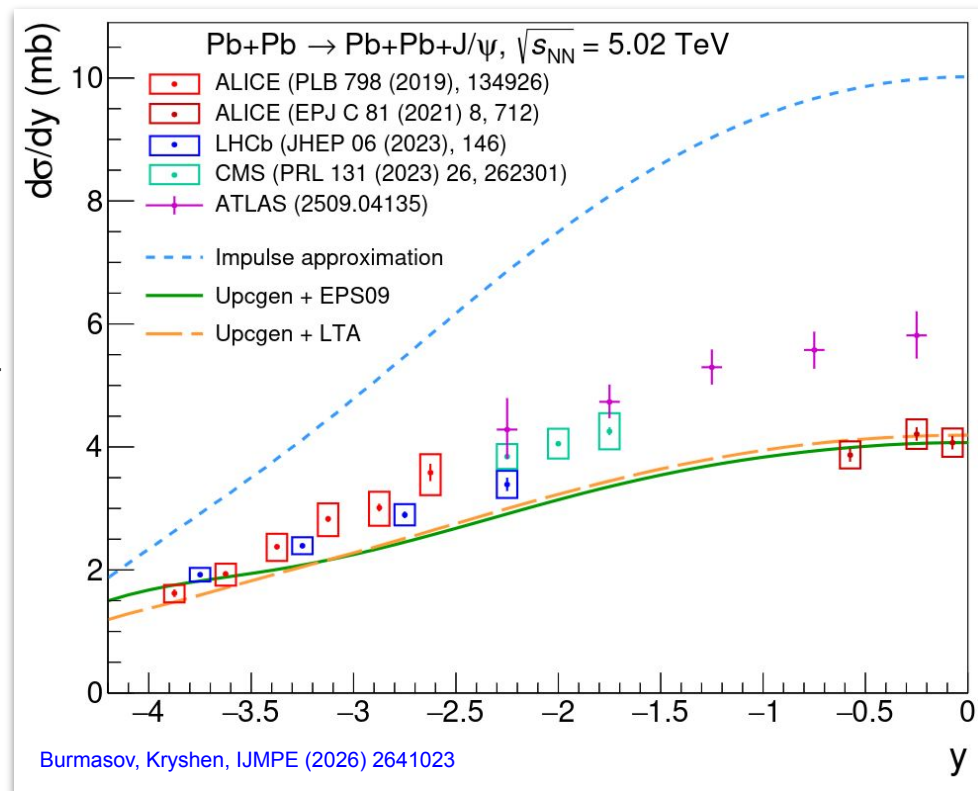
→ Расчет с параметризацией глюонной экранировки EPS09 лучше импульсного приближения

→ Приближение лидирующих твистов также дает хорошее описание

При промежуточных/центральных быстротах:

→ Результаты ATLAS сильно выше относительно EPS09 и LTA

→ Заметное расхождение ATLAS и ALICE



Заключение

- **Разработан и реализован генератор событий Ursgen:** Двухфотонные и фотоядерные процессы в ультрапериферических столкновениях
 - $\gamma\gamma \rightarrow \ell\ell$ с произвольным значением аномального магнитного момента лептона
 - Реализовано моделирование $\gamma\gamma \rightarrow \ell\ell$ с учетом поляризации фотонов, что существенно для планирования прецизионных измерений
 - Новая физика и редкие процессы: $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$ и $\gamma\gamma \rightarrow a \rightarrow \gamma\gamma$
 - Моделирование фоторождения векторных мезонов на основе лидирующего порядка КХД с глюонными экранировками (EPS09 и LTA)
 - Реализована интеграция с генератором Pythia для моделирования распадов и FSR
- **Предназначен для анализа и интерпретации экспериментальных данных БАК:**
 - Использован для анализа результатов по когерентному фоторождению векторных мезонов
 - Использован для определения чувствительности ALICE к измерениям a_τ , рассеяния света на свете и поиску аксионоподобных частиц — результаты вошли в физическую программу ALICE 3
 - Используется в CMS:
H. Zongsheng, CMS Collaboration // Measurements of photon-induced processes with the CMS detector, PoS EPS-HEP2025 (2026) 065

Доклады

Конференции

- Ядро-2020, Санкт-Петербург, “Central Diffraction and Ultra-Peripheral Collisions in ALICE in Run 3 and 4”
- Ядро-2021, Санкт-Петербург, “Feasibility studies of tau-lepton anomalous magnetic moment measurements with ultra-peripheral collisions at the LHC”
- Ядро-2022, Москва, “Searches for new physics with ultra-peripheral collisions at the LHC”
- PhysicA.SPb, 2022, Санкт-Петербург, “Prospects of light-by-light scattering measurements and axion-like particle searches at the LHC”
- International Conference on New Frontiers in Physics, 2022, Крит, Греция, Perspectives of tau g-2 measurements with ALICE
- Ломоносовская конференция по физике элементарных частиц, 2023, МГУ, Россия, Results and prospects of two-photon interaction studies with the ALICE experiment at the LHC
- Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН, 2024, Дубна, Исследование фотон-фотонных и фотон-ядерных взаимодействий в ультрапериферических столкновениях ядер на коллайдере LHC
- 42nd International Conference on High Energy Physics, 2024, Прага, Чехия, Quarkonia photoproduction and dilepton production in UPCs with ALICE
- Ядро-2025, Санкт-Петербург, “Urcgen: an event generator for two-photon and photoproduction processes in ultraperipheral collisions”

Семинары ОФВЭ

- 31.05.2022, “Поиск новой физики в ультра-периферических столкновениях на Большом Адронном Коллайдере”
- 17.09.2024, “Исследование когерентного фоторождения векторных мезонов и димьюонного континуума в эксперименте ALICE на LHC”
- 16.09.2025, “Исследование фотон-фотонных и фотон-ядерных взаимодействий в ультрапериферических столкновениях ядер на Большом Адронном Коллайдере”

Публикации и препринты

- N. Burmasov, E. Kryshen, P. Bühler, R. Lavička, *Comput.Phys.Commun.* 277 (2022), 108388, arXiv: 2111.11383 [\[Q1, 17 ссылок\]](#)
- P. Bühler, N. Burmasov, R. Lavička, E. Kryshen, *EPJ Web Conf.* 262 (2022), 01021
- N. Burmasov, E. Kryshen, P. Bühler, R. Lavička, Feasibility of tau g-2 measurements in ultra-peripheral collisions of heavy ions, arXiv: 2203.00990
- ALICE 3 Letter of Intent, arXiv: 2211.02491
- N. Burmasov, Search for New Physics in Ultraperipheral Collisions at the Large Hadron Collider, *Phys.Atom.Nucl.* 85 (2022) 6, 942-950
- N. Burmasov, E. Kryshen, P. Bühler, R. Lavička, Feasibility Studies of Tau-Lepton Anomalous Magnetic Moment Measurements in Ultraperipheral Collisions at the LHC, *Phys.Part.Nucl.* 54 (2023) 4, 590-594
- D. d'Enterria, ..., N. Burmasov, E. Kryshen, ... et al., “Opportunities for new physics searches with heavy ions at colliders”, *J.Phys.G* 50 (2023) 5, 050501, arXiv: 2203.05939 [\[Q1\]](#)
- N. Burmasov, Prospects of light-by-light scattering measurements and axion-like particle searches at the LHC, *St.Petersburg Polytech.Univ.J.Phys.Math.* 16 (2023) 1.2, 308-314
- N. Burmasov, Perspectives of tau g-2 measurements with the ALICE experiment at the LHC, *Int. J. Mod. Phys. A* (2024) 35, 2443023 [\[Q2\]](#)
- N. Burmasov, E. Kryshen, P. Bühler, R. Lavička, Feasibility of tau g-2 measurements in ultra-peripheral collisions of heavy ions, *SciPost Phys. Proc.* 16, (2025) 022, arXiv: 2203.00990
- N. Burmasov, E. Kryshen, Update on Upcgen, an event generator for two-photon and photoproduction processes in ultraperipheral collisions, *Int. J. Mod. Phys. E* (2026) 2641023. [\[Q3\]](#)