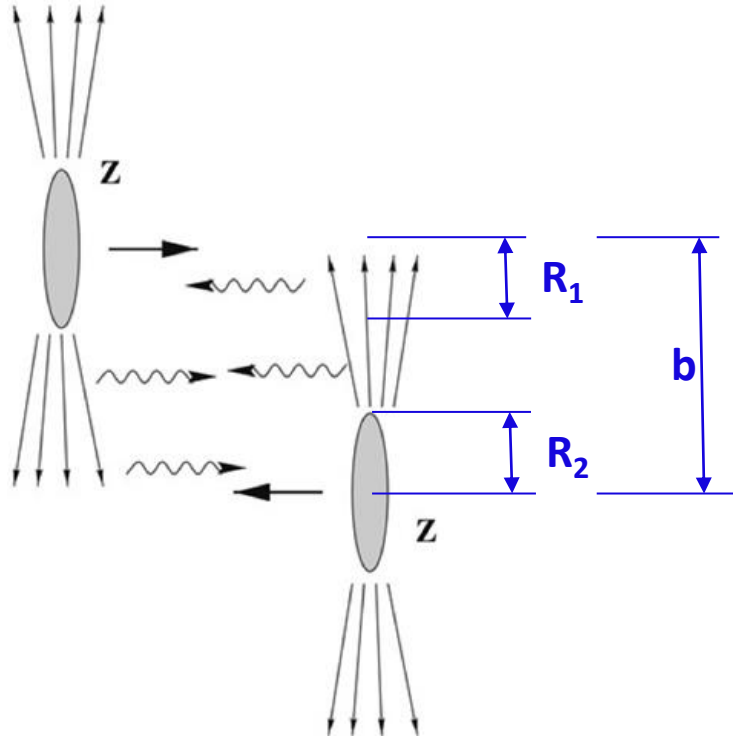


Исследование фотон-фотонных и фотон-ядерных взаимодействий в ультрапериферических столкновениях ядер на коллайдере LHC

Назар Бурмасов

Петербургский Институт Ядерной Физики им. Б.П. Константинова
НИЦ «Курчатовский институт»

LHC как фотон-фотонный и фотон-адронный коллайдер



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

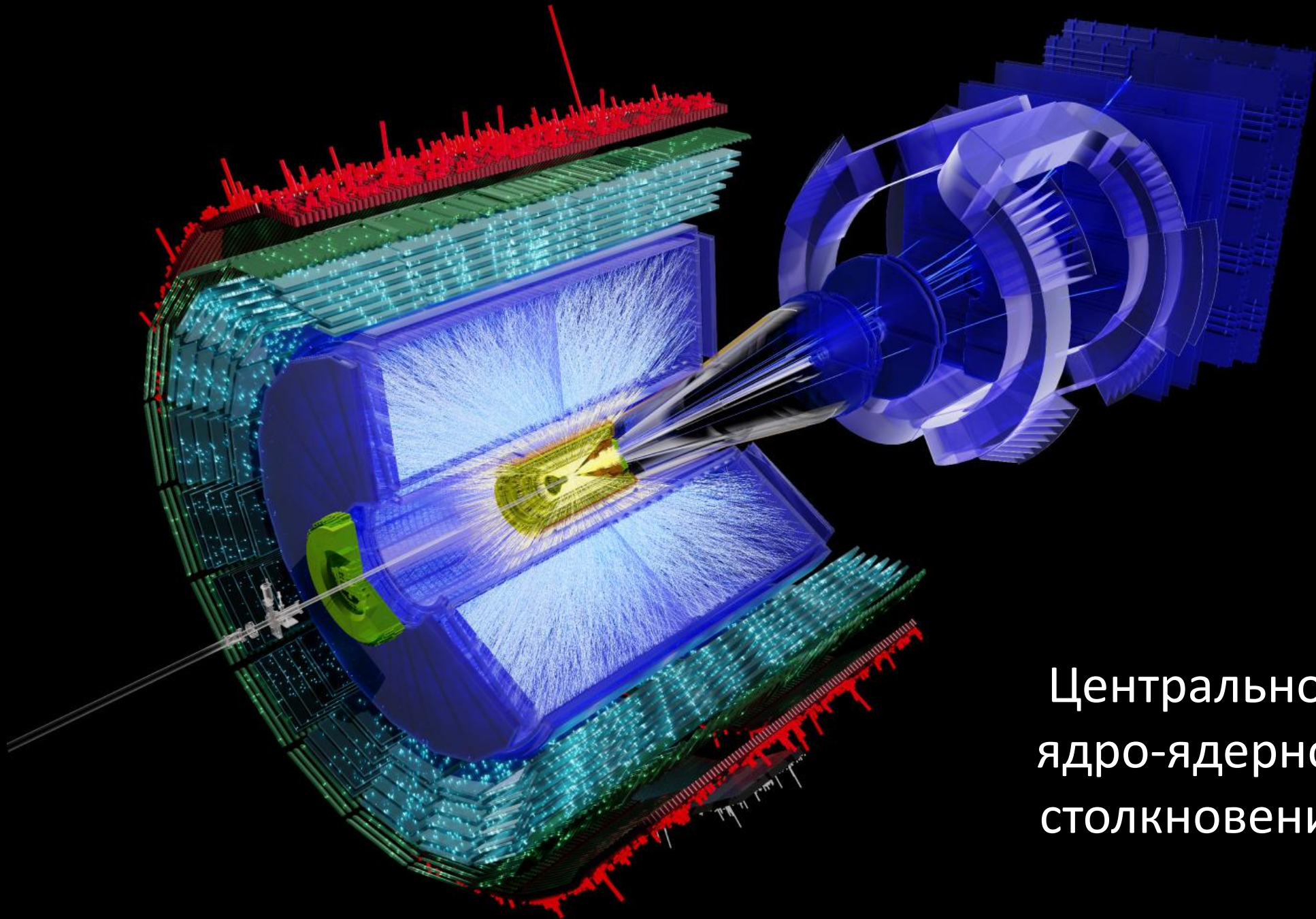
Ультрапериферические столкновения на LHC можно использовать для исследования $\gamma\gamma$, γp и γPb взаимодействий при высоких энергиях

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

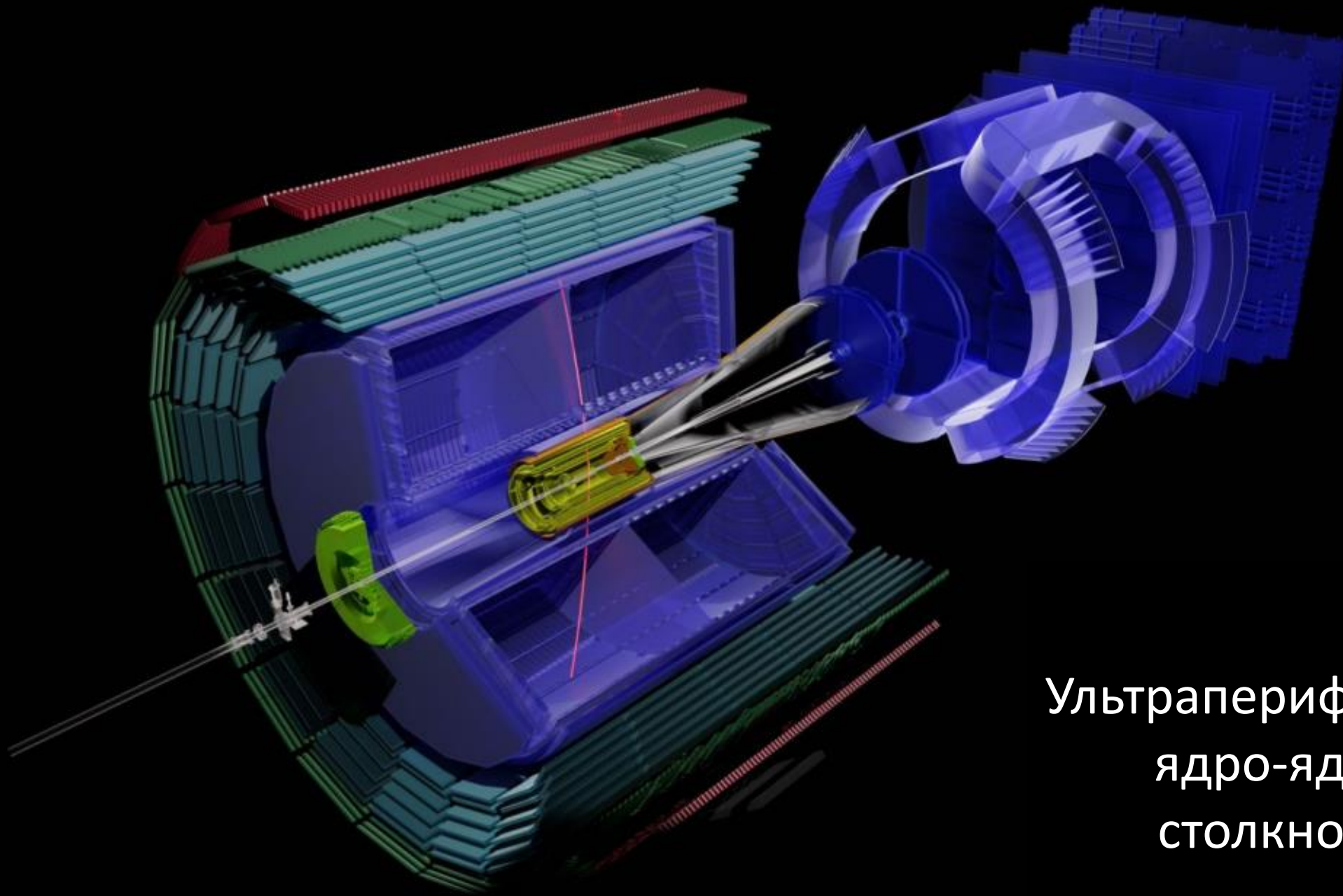


ALICE

Run 3 Pb-Pb

$\sqrt{s_{NN}} = 5.36 \text{ TeV}$

Центральное
ядро-ядерное
столкновение



ALICE

Run 3 Pb-Pb
 $\sqrt{s_{NN}} = 5.36 \text{ TeV}$

Ультрапериферическое
ядро-ядерное
столкновение

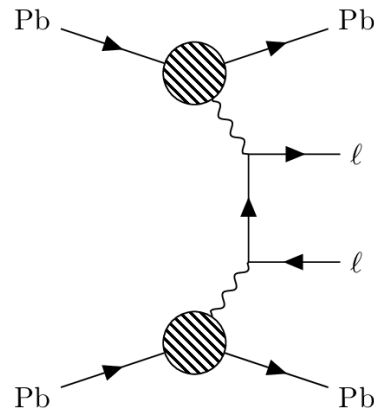
Фотон-фотонные взаимодействия*

The background of the slide is a dark blue gradient. From the center, a bright, multi-colored light source (appearing as a mix of yellow, green, and blue) emits a dense array of light rays that fan out towards the edges of the frame. The rays are most concentrated in the center and become more diffuse and blurred as they move outwards, creating a sense of depth and energy. The overall effect is reminiscent of a starburst or a high-speed light trail.

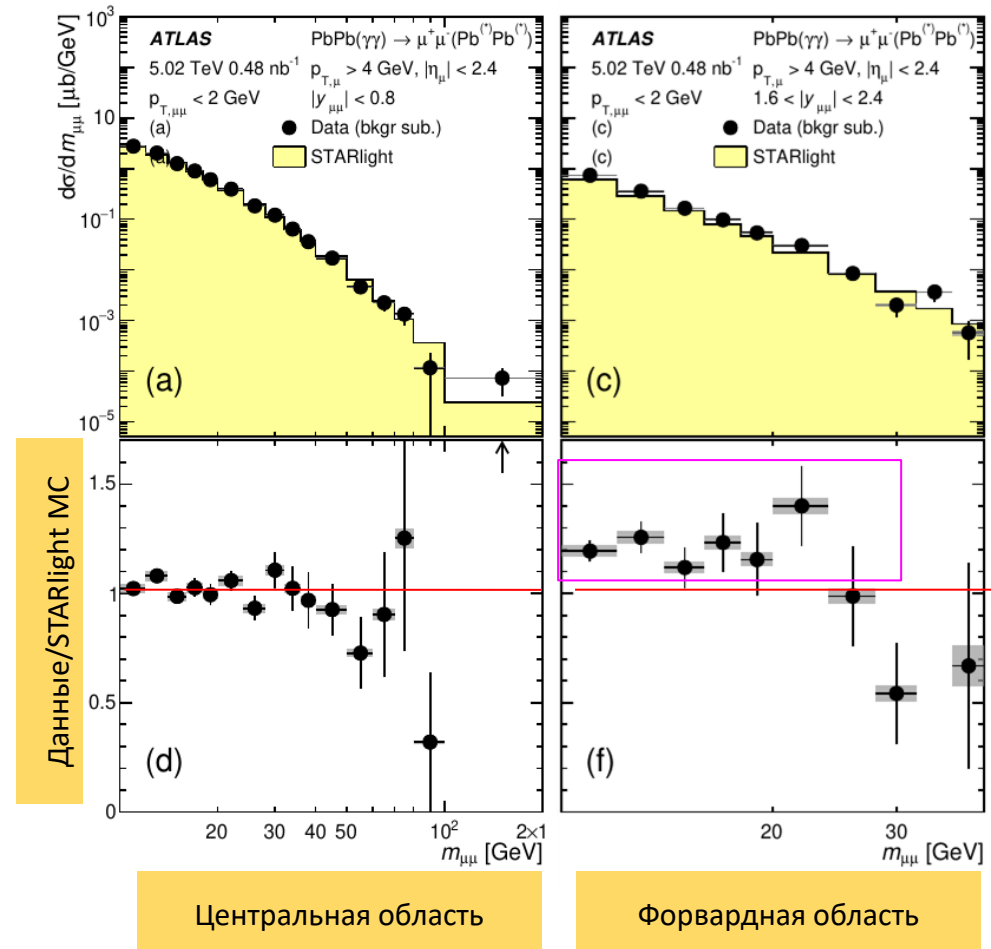
*в представлении Kandinski 2.2

Рождение пар лептонов

- Расхождения между экспериментом и моделями при измерениях димюонного континуума

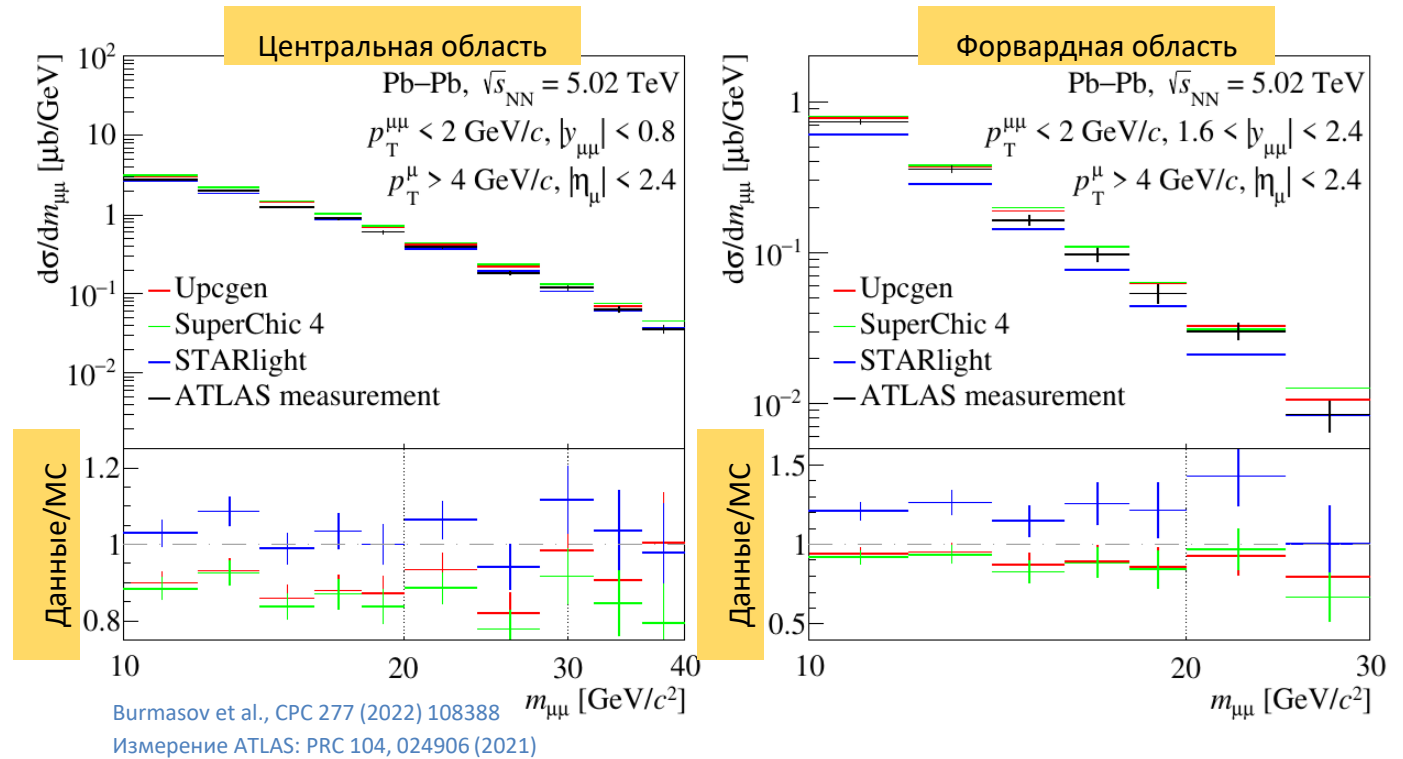


PRC, 104, 024906, 2021



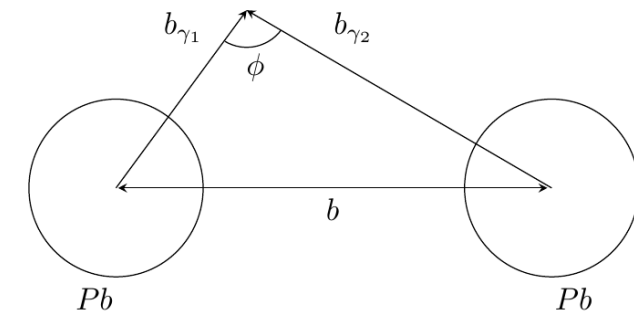
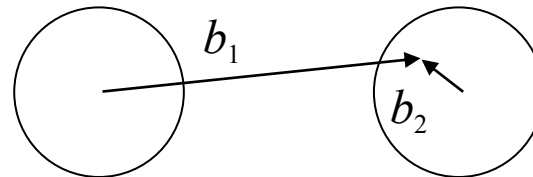
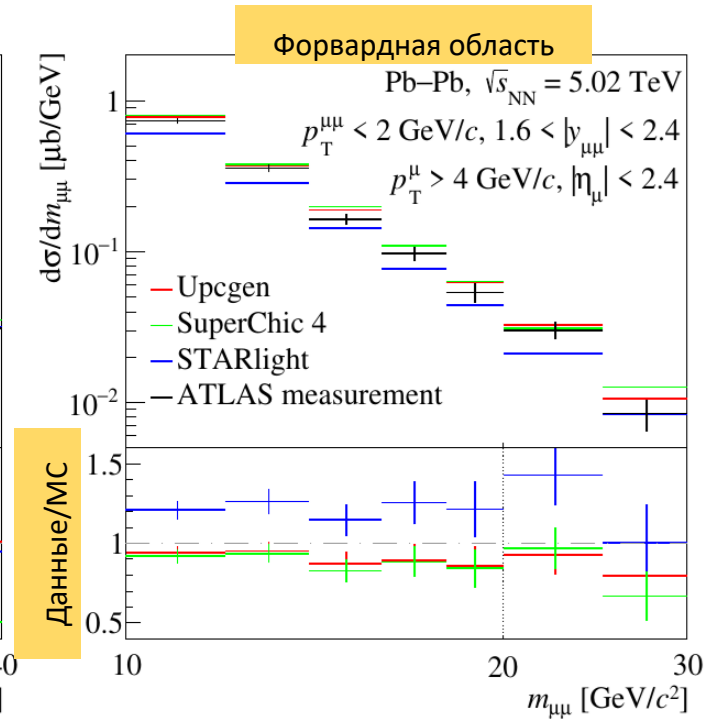
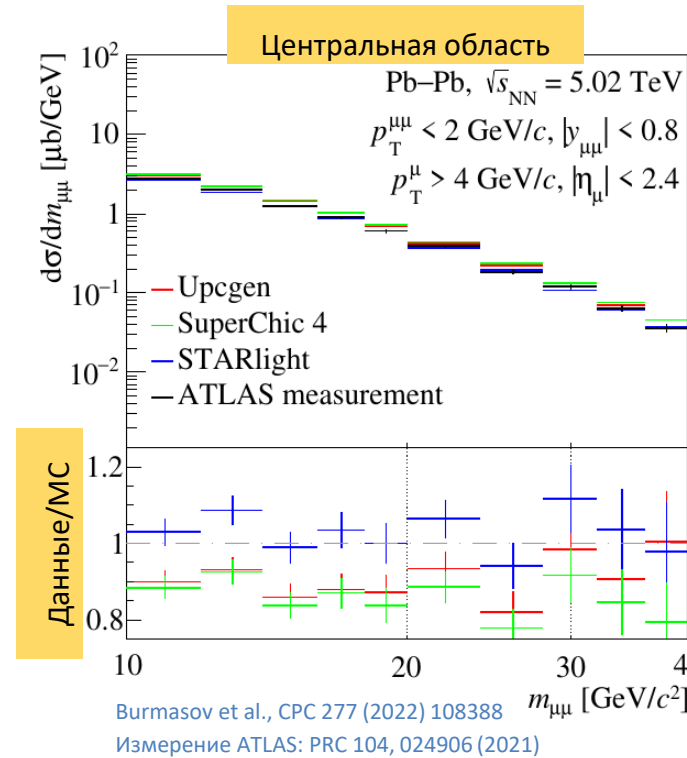
Рождение пар лептонов

- Расхождения между экспериментом и моделями при измерениях димюонного континуума



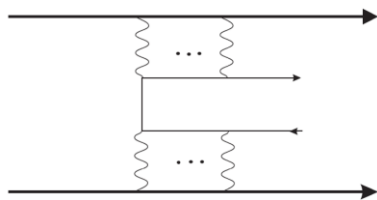
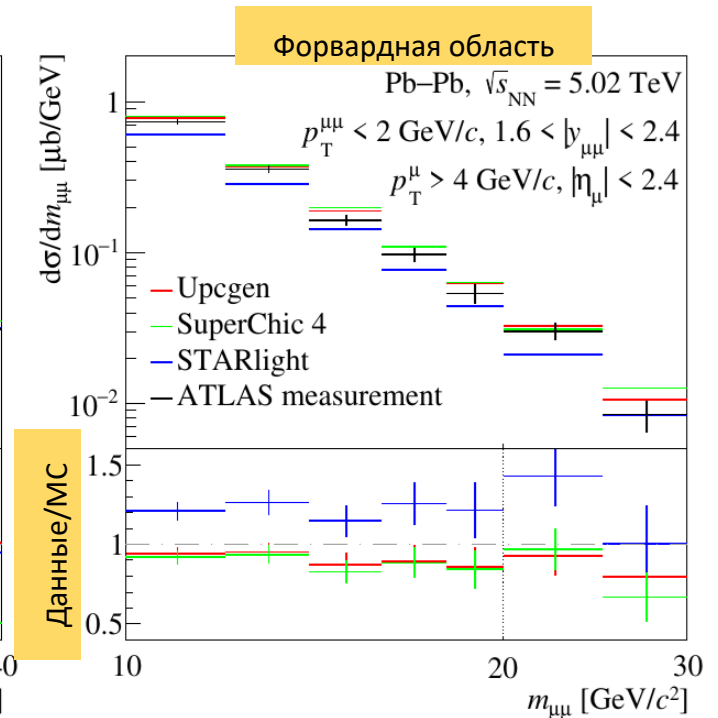
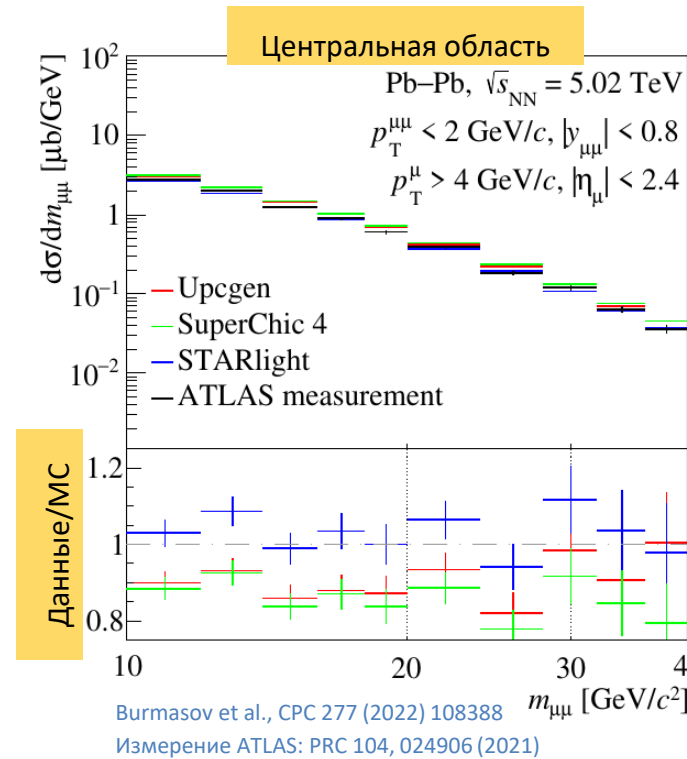
Рождение пар лептонов

- Расхождения между экспериментом и моделями при измерениях димюонного континуума
- Приближение эквивалентных фотонов
 - STARlight: жесткий кат на прицельные параметры фотонов
 - SuperChic, Urcgen: форм-фактор ядра

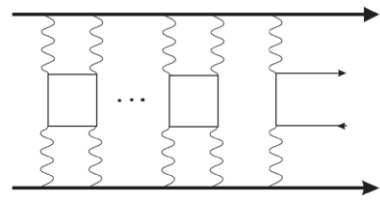


Рождение пар лептонов

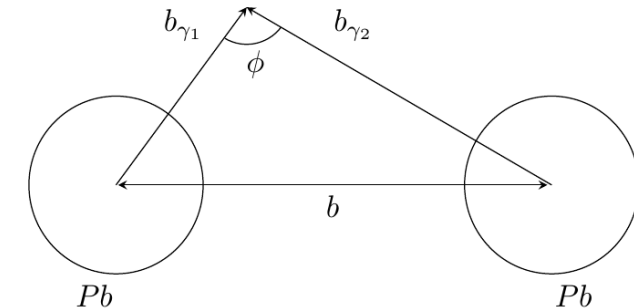
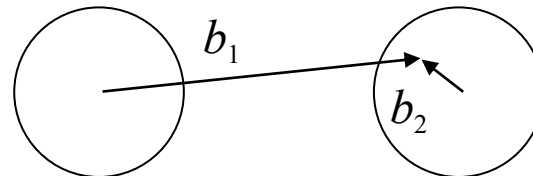
- Расхождения между экспериментом и моделями при измерениях димюонного континуума
- Приближение эквивалентных фотонов
 - STARlight: жесткий кат на прицельные параметры фотонов
 - SuperChic, Urcgen: форм-фактор ядра
- Поправки более высоких порядков?
 - Обмен фотонами между ядрами и лептонами в конечном состоянии
 - Унитарность взаимодействий



Кулоновские поправки



Унитарность



Hencken et al. PRC 75 (2007) 034903
 Zha et al. JHEP 08 (2021) 083

Аномальный магнитный момент τ

Аномальный магнитный момент τ

- Аномальный магнитный момент мюона \rightarrow отклонение на $\sim 4\sigma$ от SM

Аномальный магнитный момент τ

- Аномальный магнитный момент мюона \rightarrow отклонение на $\sim 4\sigma$ от СМ

Предсказание: $a_{\tau}^{\text{SM}} = 0.00117721(5)$

Эксперимент: $-0.052 < a_{\tau} < 0.013$ (95% CL) DELPHI, EPJC, 35, 159, 2004

Аномальный магнитный момент τ

- Аномальный магнитный момент мюона \rightarrow отклонение на $\sim 4\sigma$ от СМ

Предсказание: $a_\tau^{\text{SM}} = 0.00117721(5)$

Эксперимент: $-0.052 < a_\tau < 0.013$ (95% CL) DELPHI, EPJC, 35, 159, 2004

- Тау-лептон – короткоживущая частица \rightarrow стандартные методы не работают, можно проводить измерение сечений $\gamma\gamma \rightarrow \tau\tau$, чувствительных к a_τ
- F.del Aguila et al., PLB, 271, 256-260, 1991: [Pb-Pb УПС для измерения \$a_\tau\$](#)

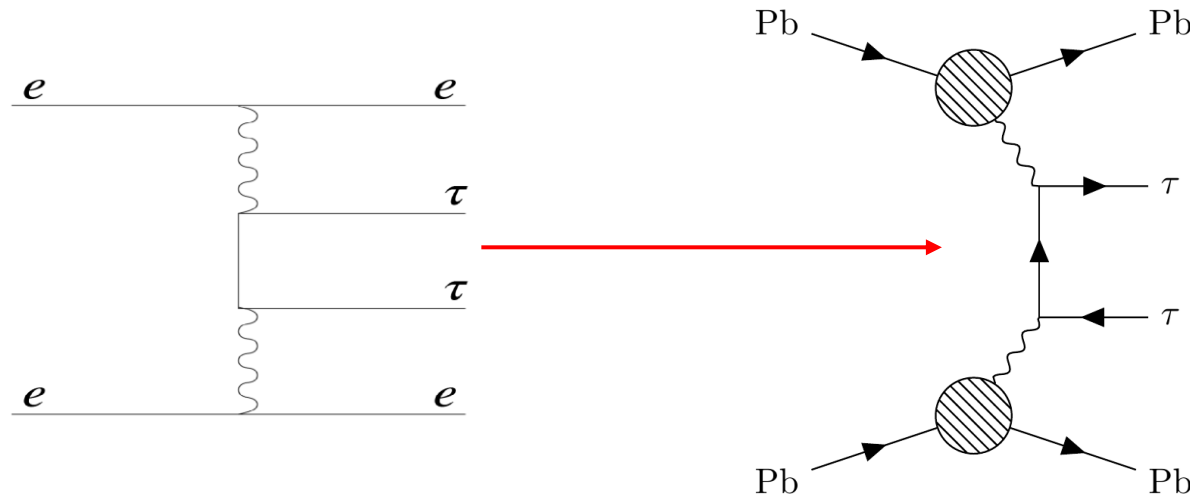
Аномальный магнитный момент τ

- Аномальный магнитный момент мюона \rightarrow отклонение на $\sim 4\sigma$ от СМ

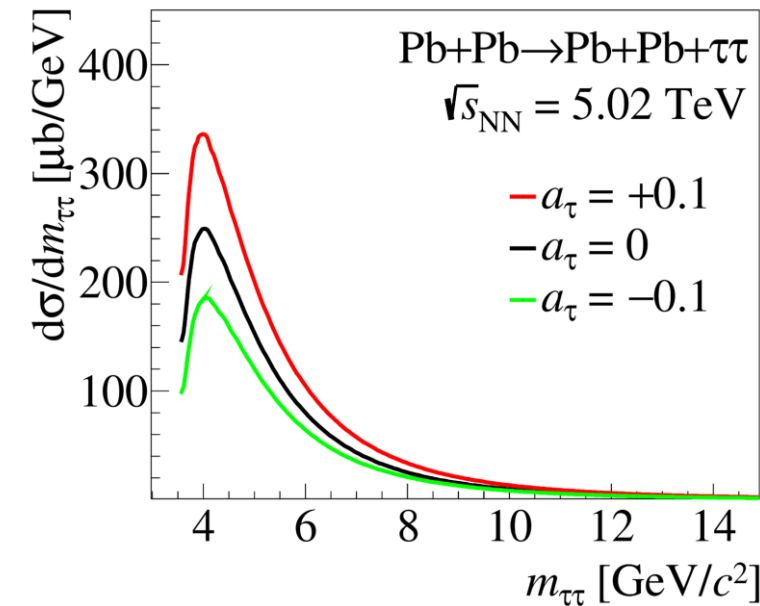
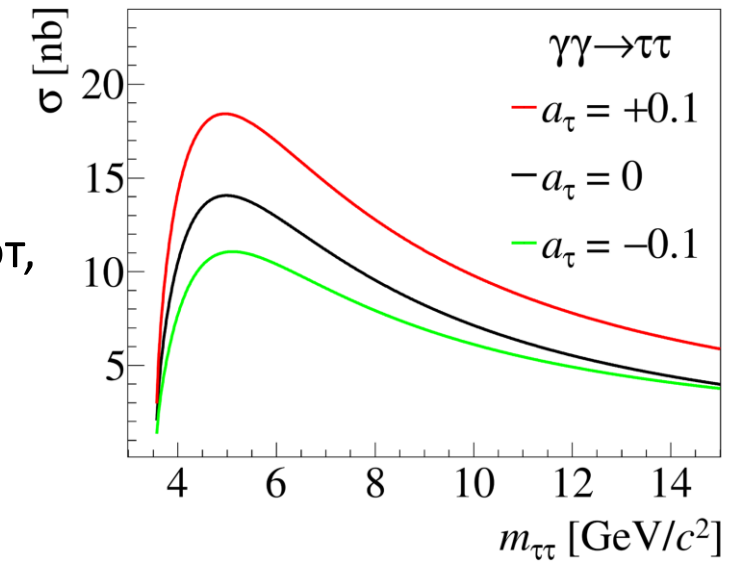
Предсказание: $a_\tau^{\text{SM}} = 0.00117721(5)$

Эксперимент: $-0.052 < a_\tau < 0.013$ (95% CL) DELPHI, EPJC, 35, 159, 2004

- Тау-лептон – короткоживущая частица \rightarrow стандартные методы не работают, можно проводить измерение сечений $\gamma\gamma \rightarrow \tau\tau$, чувствительных к a_τ
- F.del Aguila et al., PLB, 271, 256-260, 1991: [Pb-Pb УПС для измерения \$a_\tau\$](#)



Burmasov et al., CPC 277 (2022) 108388



Аномальный магнитный момент τ

- Аномальный магнитный момент мюона \rightarrow отклонение на $\sim 4\sigma$ от СМ

Предсказание: $a_\tau^{\text{SM}} = 0.00117721(5)$

Эксперимент: $-0.052 < a_\tau < 0.013$ (95% CL) DELPHI, EPJC, 35, 159, 2004

- Тау-лептон – короткоживущая частица \rightarrow стандартные методы не работают, можно проводить измерение сечений $\gamma\gamma \rightarrow \tau\tau$, чувствительных к a_τ
- F.del Aguila et al., PLB, 271, 256-260, 1991: [Pb-Pb УПС для измерения \$a_\tau\$](#)

Аномальный магнитный момент τ

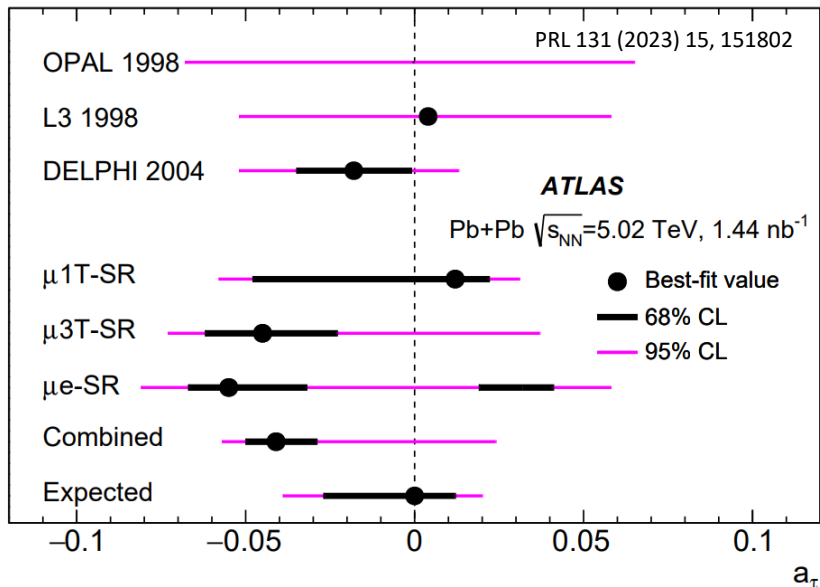
- Аномальный магнитный момент мюона \rightarrow отклонение на $\sim 4\sigma$ от SM

Предсказание: $a_\tau^{\text{SM}} = 0.00117721(5)$

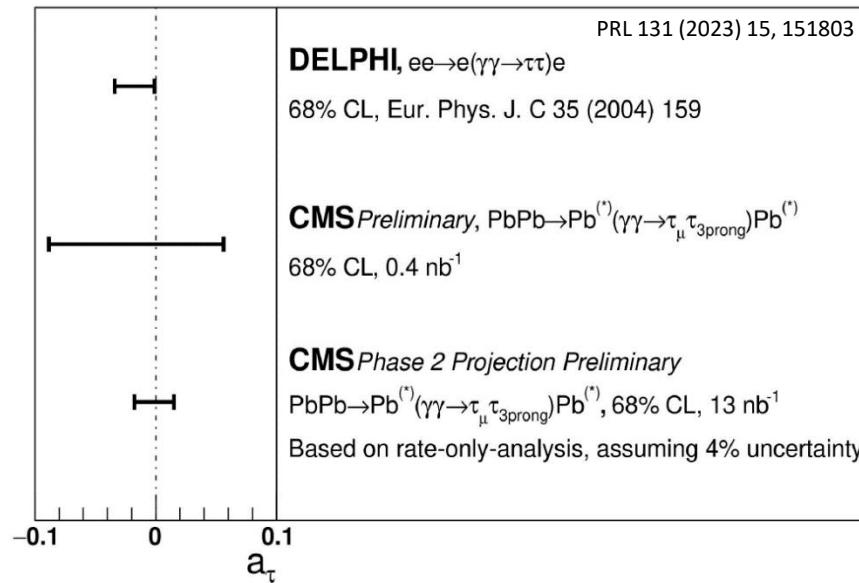
Эксперимент: $-0.052 < a_\tau < 0.013$ (95% CL) DELPHI, EPJC, 35, 159, 2004

- Тау-лептон – короткоживущая частица \rightarrow стандартные методы не работают, можно проводить измерение сечений $\gamma\gamma \rightarrow \tau\tau$, чувствительных к a_τ
- F.del Aguila et al., PLB, 271, 256-260, 1991: Pb-Pb УПС для измерения a_τ

ATLAS Run 2 results



CMS Run 2 results



Аномальный магнитный момент τ

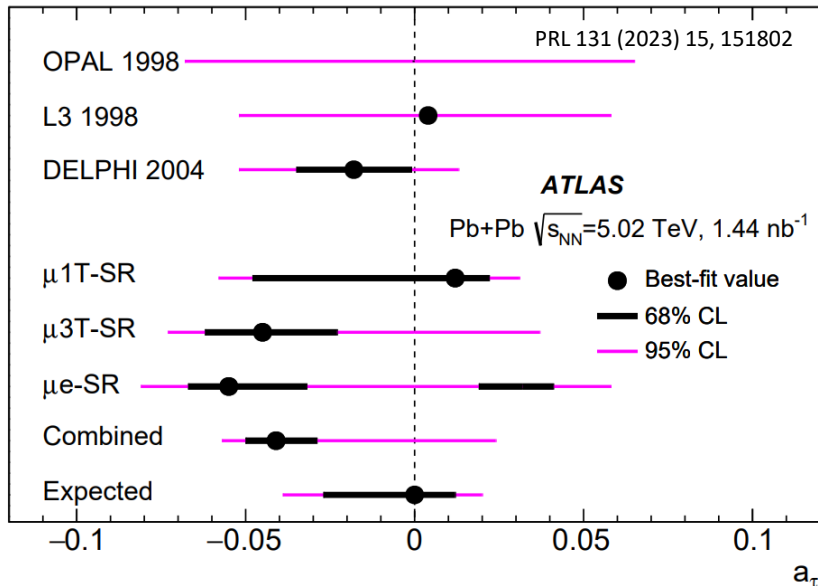
- Аномальный магнитный момент мюона \rightarrow отклонение на $\sim 4\sigma$ от SM

Предсказание: $a_\tau^{\text{SM}} = 0.00117721(5)$

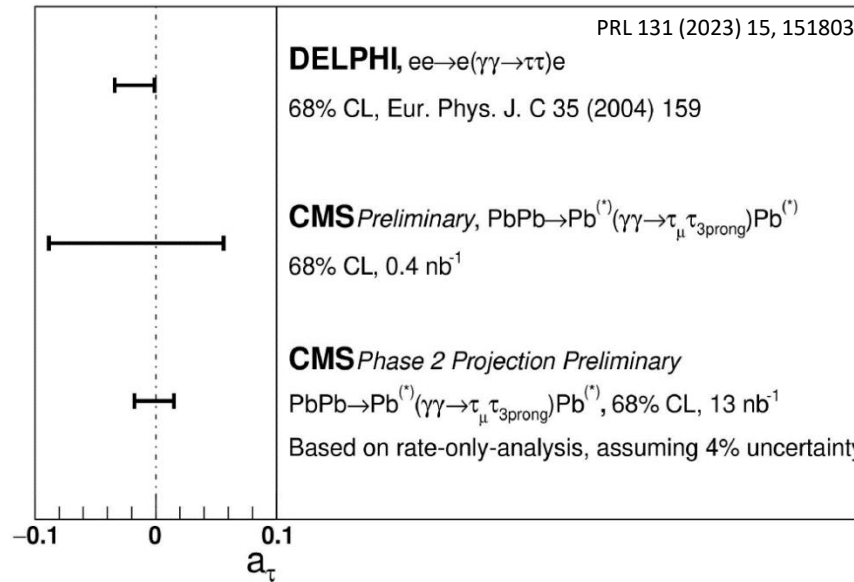
Эксперимент: $-0.052 < a_\tau < 0.013$ (95% CL) DELPHI, EPJC, 35, 159, 2004

- Тау-лептон – короткоживущая частица \rightarrow стандартные методы не работают, можно проводить измерение сечений $\gamma\gamma \rightarrow \tau\tau$, чувствительных к a_τ
- F.del Aguila et al., PLB, 271, 256-260, 1991: **Pb-Pb УПС для измерения a_τ**

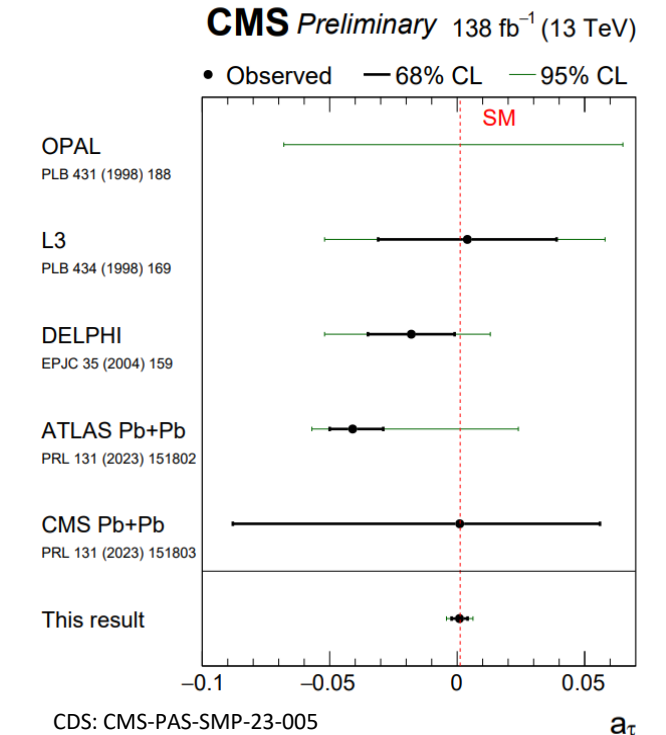
ATLAS Run 2 results



CMS Run 2 results

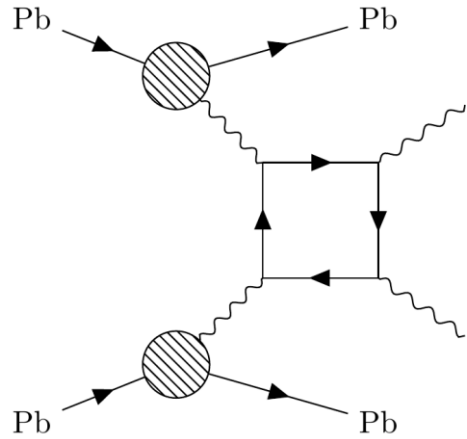


CMS Run 2 results (pp)



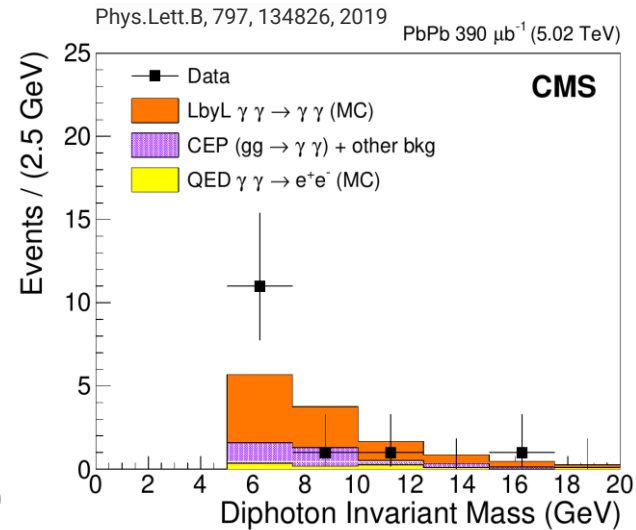
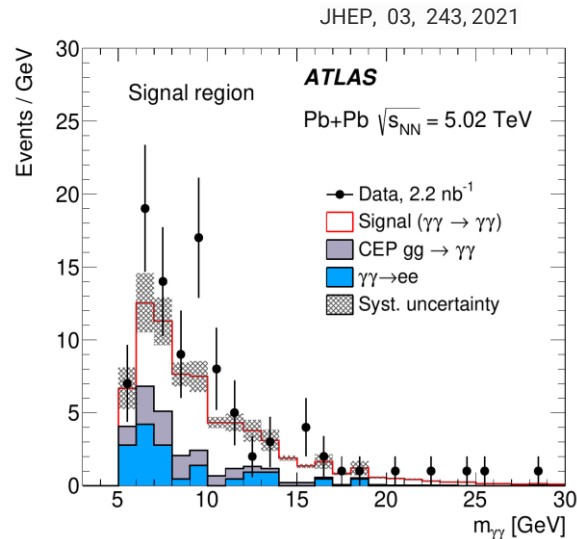
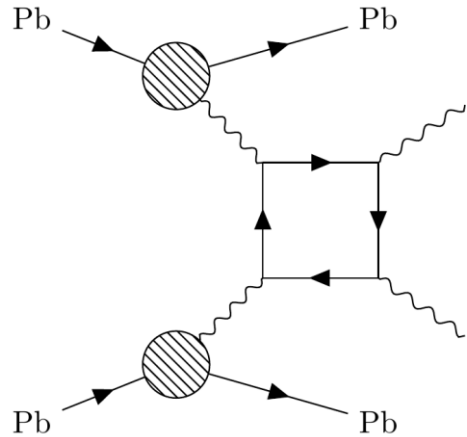
Рассеяние света на свете

Рассеяние света на свете



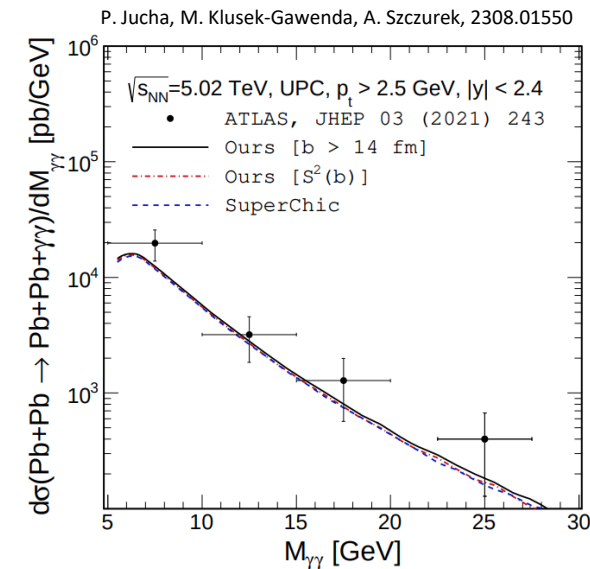
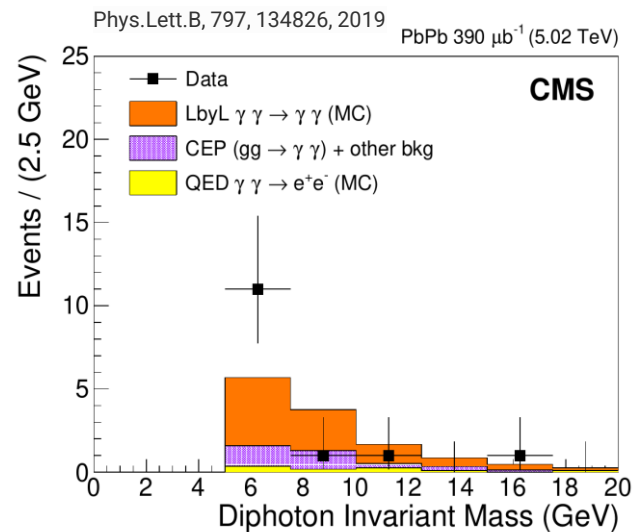
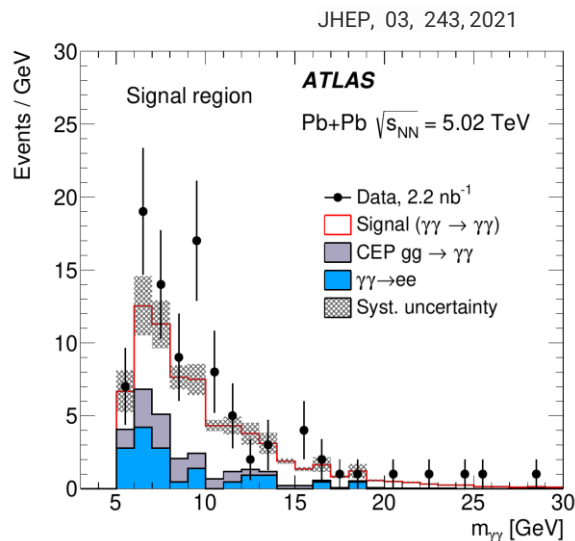
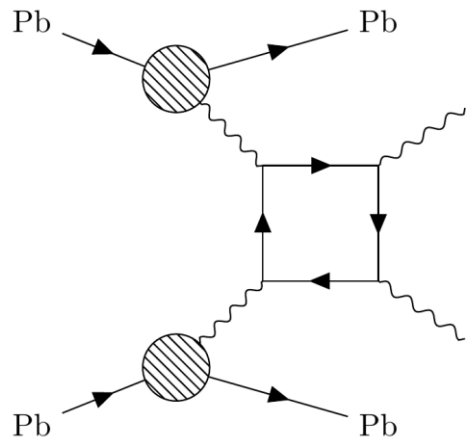
- Чувствителен к новой физике: суперсимметрия, новые резонансы...

Рассеяние света на свете



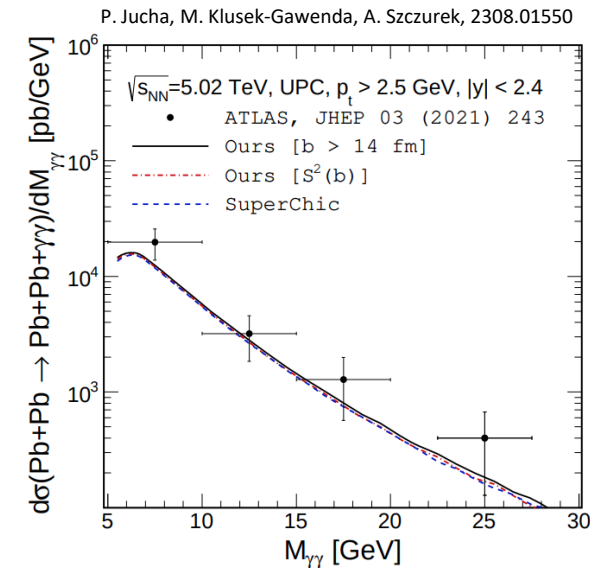
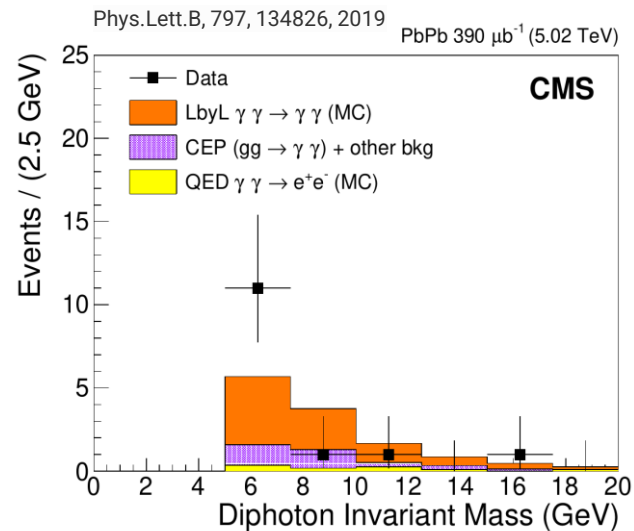
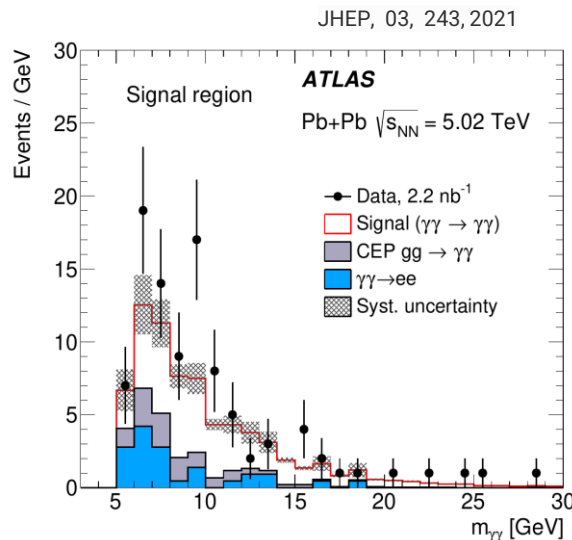
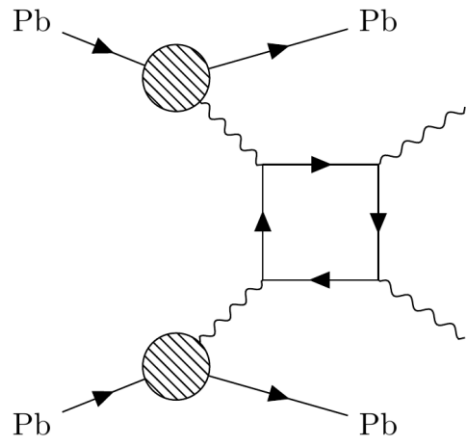
- Чувствителен к новой физике: суперсимметрия, новые резонансы...
- Наблюдение: ATLAS (Nature Phys. 3, 852, 2017) и CMS (PLB, 797, 134826 2019)
- Измерения ограничены триггером: $m_{\gamma\gamma} > 5 \text{ ГэВ}/c^2$

Рассеяние света на свете

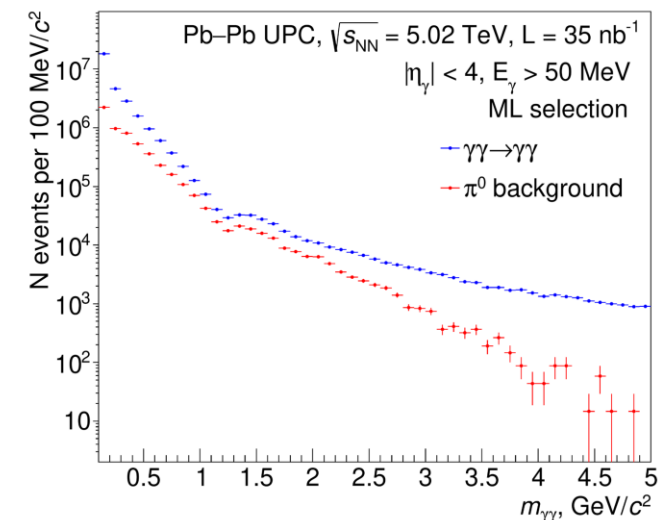


- Чувствителен к новой физике: суперсимметрия, новые резонансы...
- Наблюдение: ATLAS (Nature Phys. 3, 852, 2017) и CMS (PLB, 797, 134826 2019)
- Измерения ограничены триггером: $m_{\gamma\gamma} > 5 \text{ ГэВ}/c^2$

Рассеяние света на свете

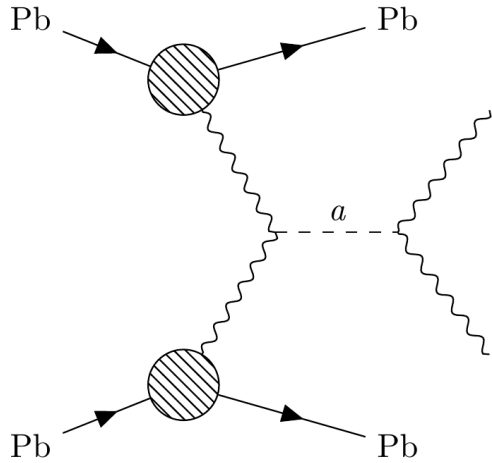


- Чувствителен к новой физике: суперсимметрия, новые резонансы...
- Наблюдение: ATLAS (Nature Phys. 3, 852, 2017) и CMS (PLB, 797, 134826 2019)
- Измерения ограничены триггером: $m_{\gamma\gamma} > 5 \text{ ГэВ}/c^2$
- Перспективы – измерения при малых массах с ALICE 3
 - Большой фон от распада π^0
 - можно подавить требованием на асимметрию
 - или методами машинного обучения



Поиск аксионоподобных частиц

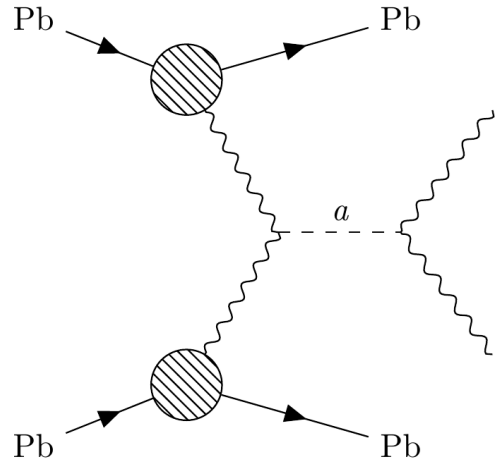
Поиск аксионоподобных частиц



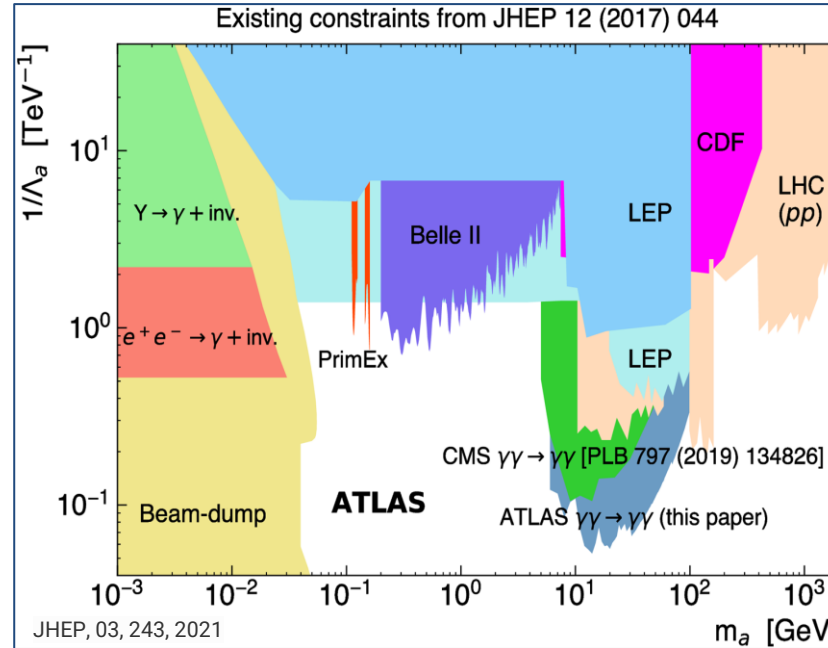
$$\mathcal{L}_a = \frac{1}{2}(\partial a)^2 - \frac{1}{2}m_a^2 a^2 - \frac{1}{4} \frac{a}{\Lambda} F \tilde{F}$$

- Аксион: проблема CP-симметрии в сильных взаимодействиях и теория Печчеи-Квинн
- Аксионоподобные частицы — класс псевдоскалярных частиц, кандидаты в частицы темной материи

Поиск аксионоподобных частиц

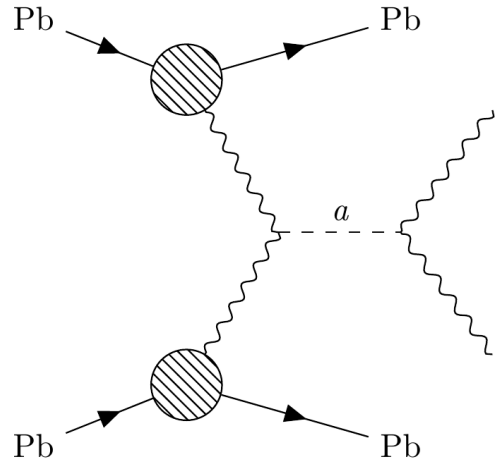


$$\mathcal{L}_a = \frac{1}{2}(\partial a)^2 - \frac{1}{2}m_a^2 a^2 - \frac{1}{4} \frac{a}{\Lambda} F \tilde{F}$$

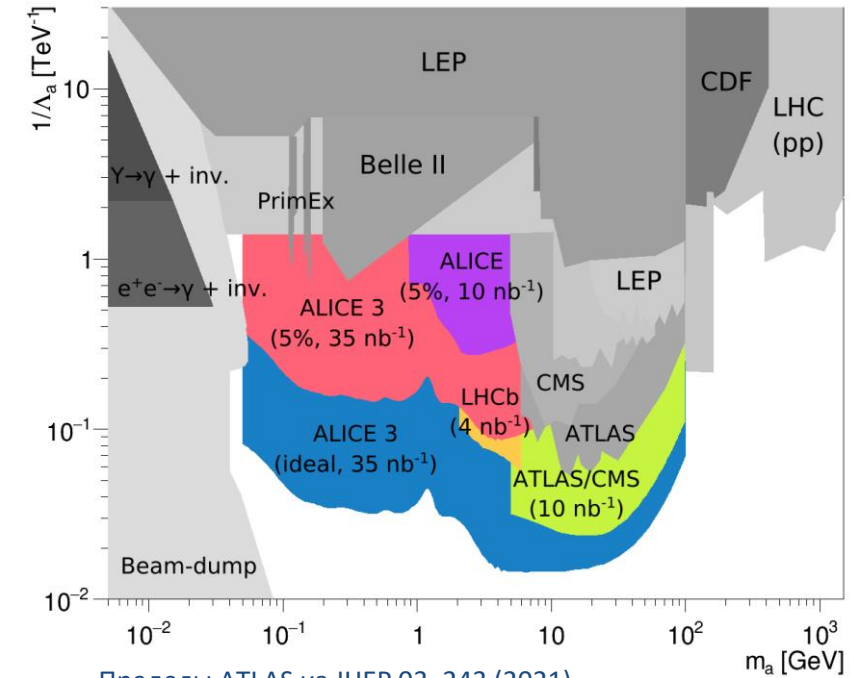
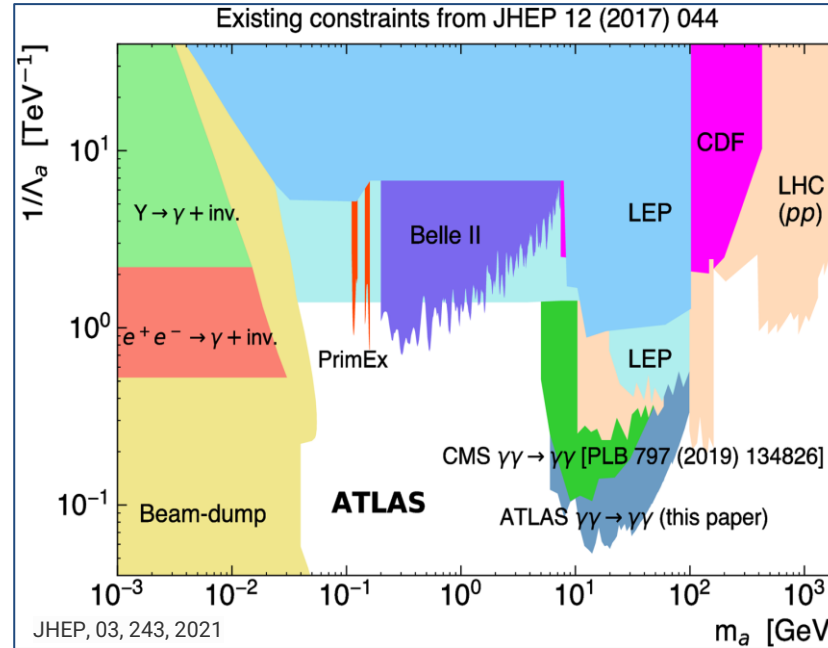


- Аксион: проблема CP-симметрии в сильных взаимодействиях и теория Печчеи-Квинн
- Аксионоподобные частицы — класс псевдоскалярных частиц, кандидаты в частицы темной материи

Поиск аксионоподобных частиц

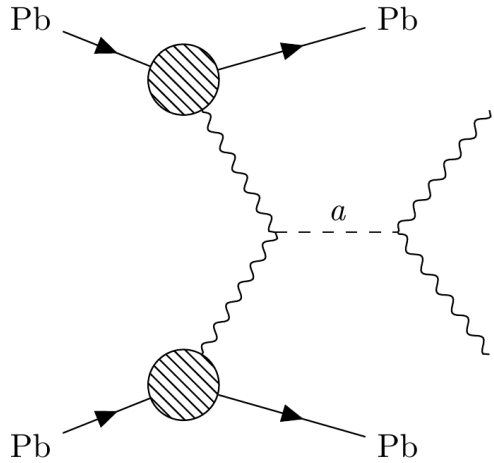


$$\mathcal{L}_a = \frac{1}{2}(\partial a)^2 - \frac{1}{2}m_a^2 a^2 - \frac{1}{4} \frac{a}{\Lambda} F \tilde{F}$$

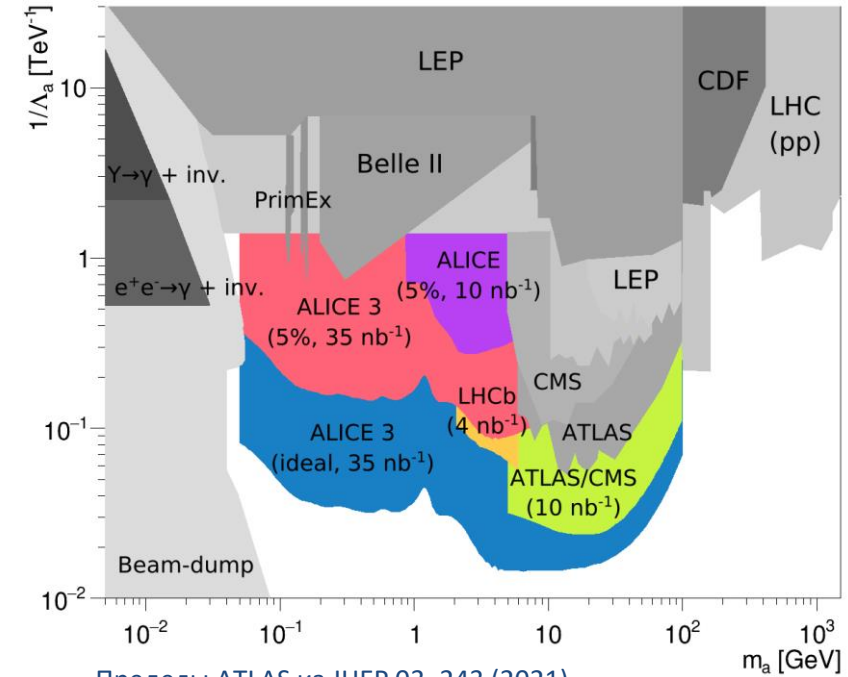
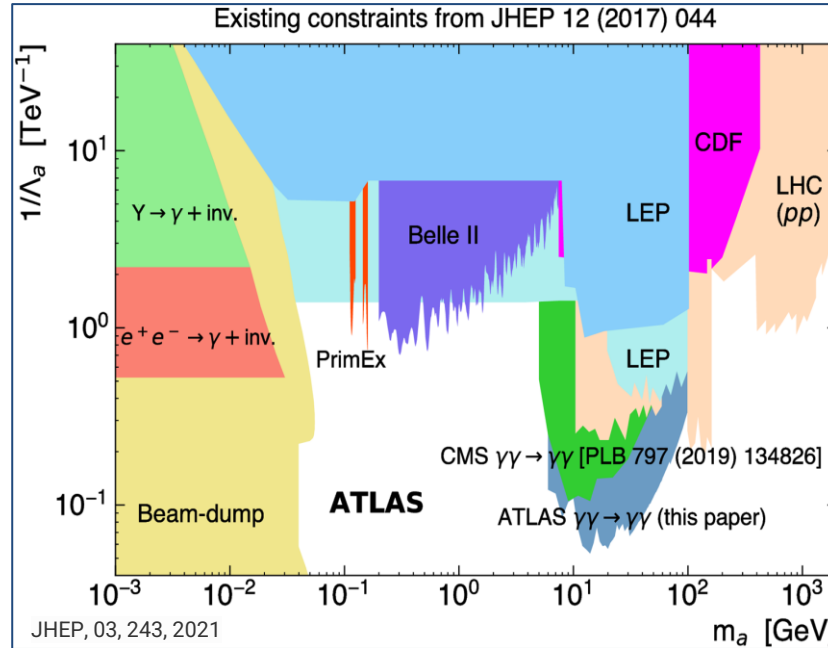


- Аксион: проблема CP-симметрии в сильных взаимодействиях и теория Печчеи-Квинн
- Аксионоподобные частицы — класс псевдоскалярных частиц, кандидаты в частицы темной материи

Поиск аксионоподобных частиц



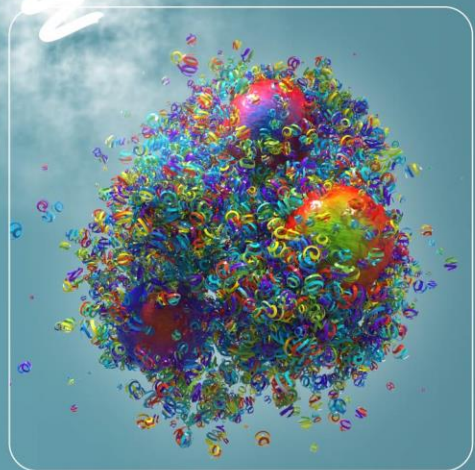
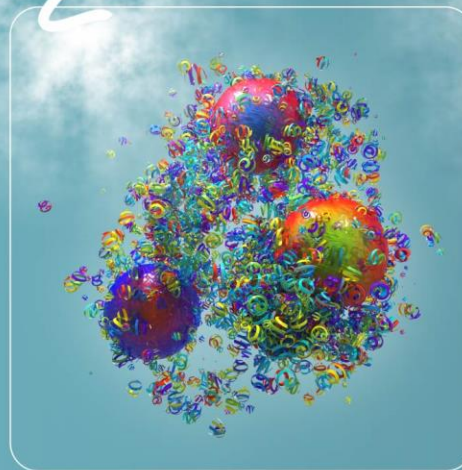
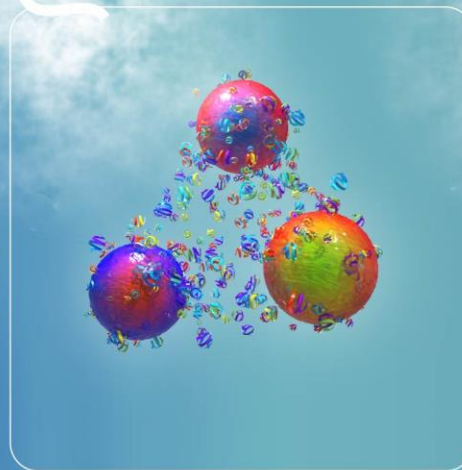
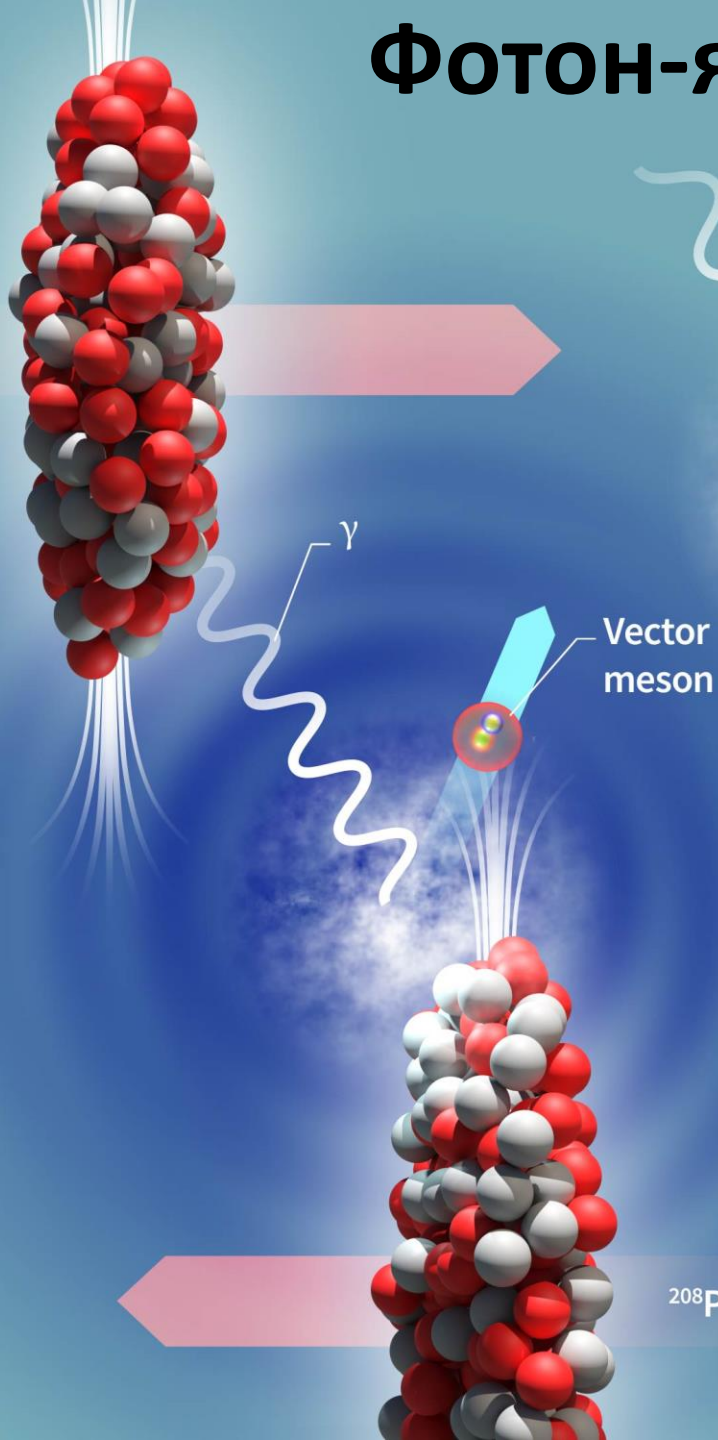
$$\mathcal{L}_a = \frac{1}{2}(\partial a)^2 - \frac{1}{2}m_a^2 a^2 - \frac{1}{4} \frac{a}{\Lambda} F \tilde{F}$$



- Аксион: проблема CP-симметрии в сильных взаимодействиях и теория Печчеи-Квинн
- Аксионоподобные частицы — класс псевдоскалярных частиц, кандидаты в частицы темной материи
- Оценки пределов Λ на основе моделирования в Ursgen (CPC 277 (2022) 108388)
- ALICE 3 может продвинуться в область малых масс, но поиски затруднительны в области π^0 , η , η' , χ_c

Фотон-ядерные взаимодействия

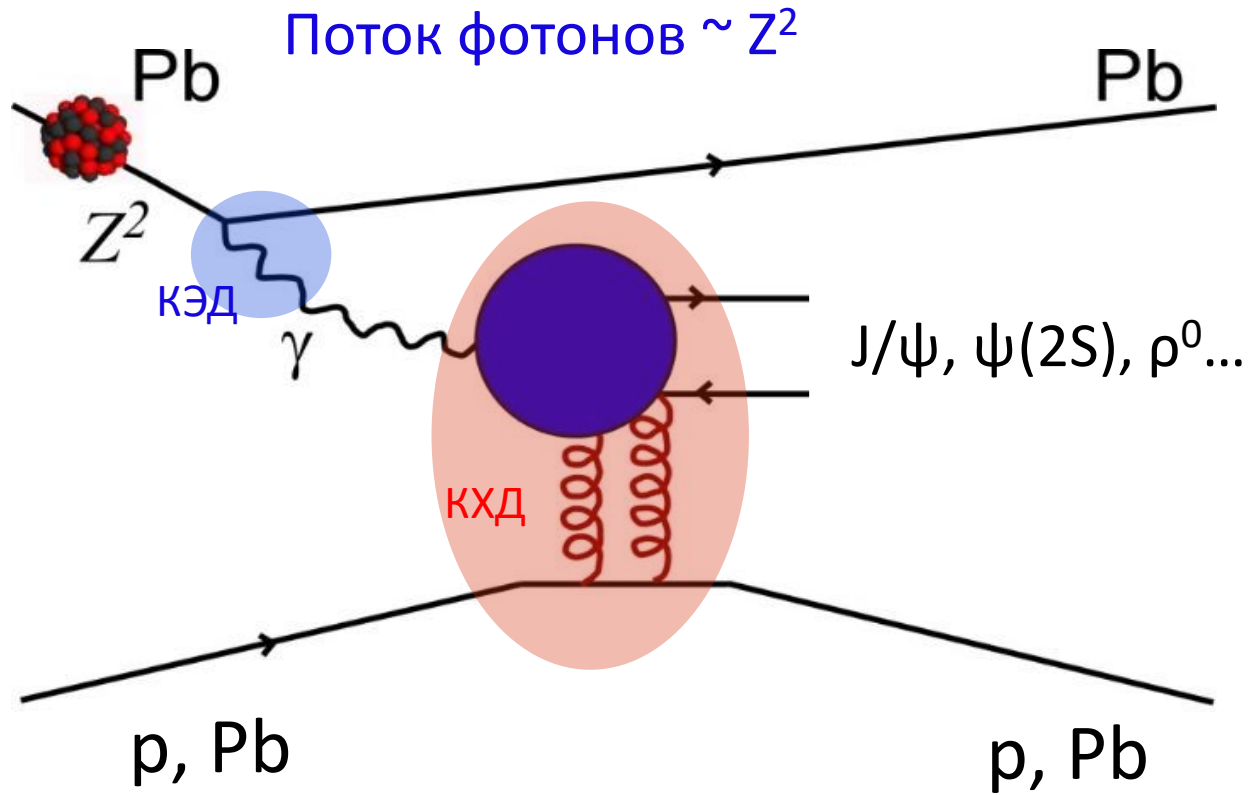
^{208}Pb



Photon energy

^{208}Pb

Фоторождение векторных мезонов в УПС

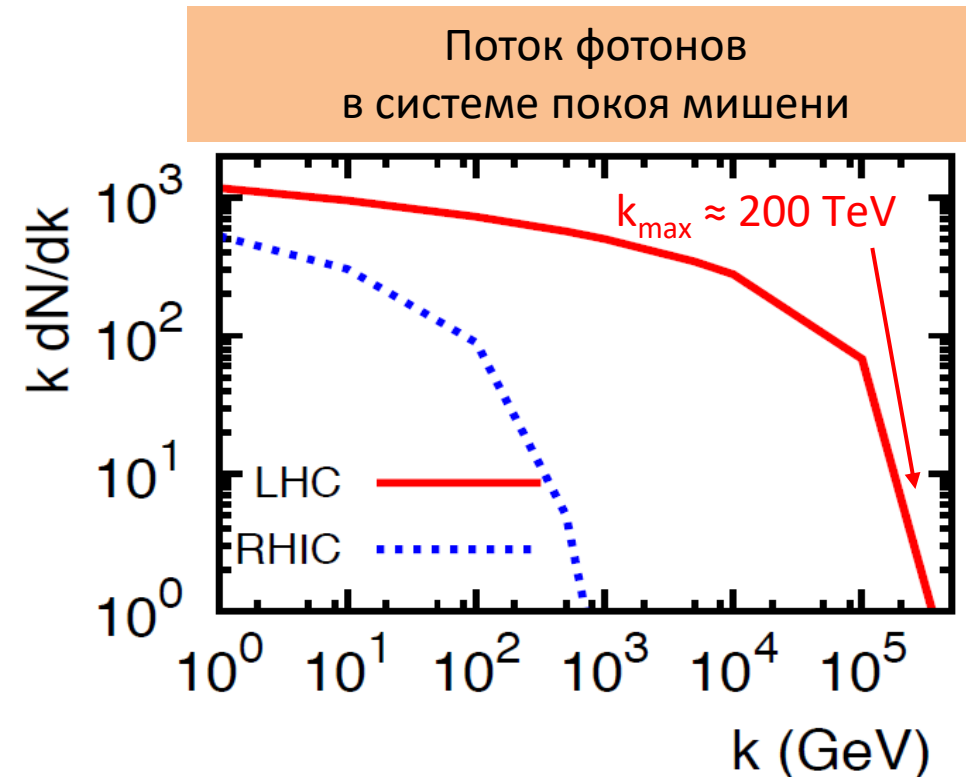


$$\frac{d\sigma_{PbPb}(y)}{dy} = n_\gamma(y)\sigma_{\gamma Pb}(y) + n_\gamma(-y)\sigma_{\gamma Pb}(-y)$$

$$\omega = \frac{1}{2}m_V e^{-y} \quad W_{\gamma p} = \sqrt{2E_N m_V} e^{-y/2}$$

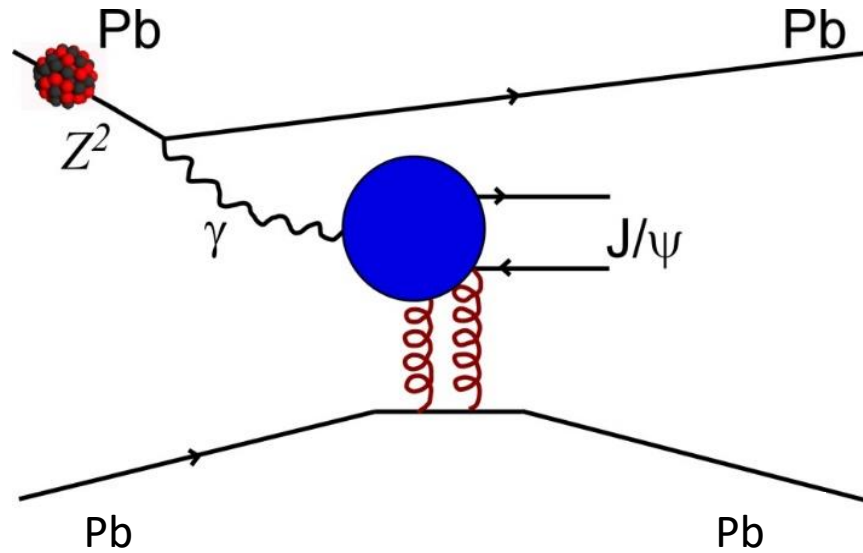
Сечение в УПС можно факторизовать:

- КЭД: поток квазиреальных фотонов
- КХД: сечение фоторождения $\sigma_{\gamma Pb}$

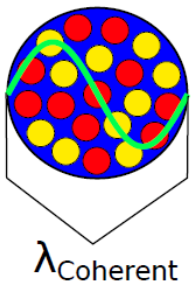


Когерентное и некогерентное фоторождение на ядрах

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

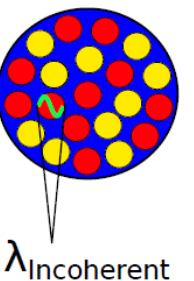


$$\left. \frac{d\sigma_{\gamma A \rightarrow J/\psi A}}{dt} \right|_{t=0} = \frac{M_{J/\psi}^3 \Gamma_{ee} \pi^3 \alpha_s^2(Q^2)}{48 \alpha_{em} Q^8} \left[x g_A(x, Q^2) \right]^2$$



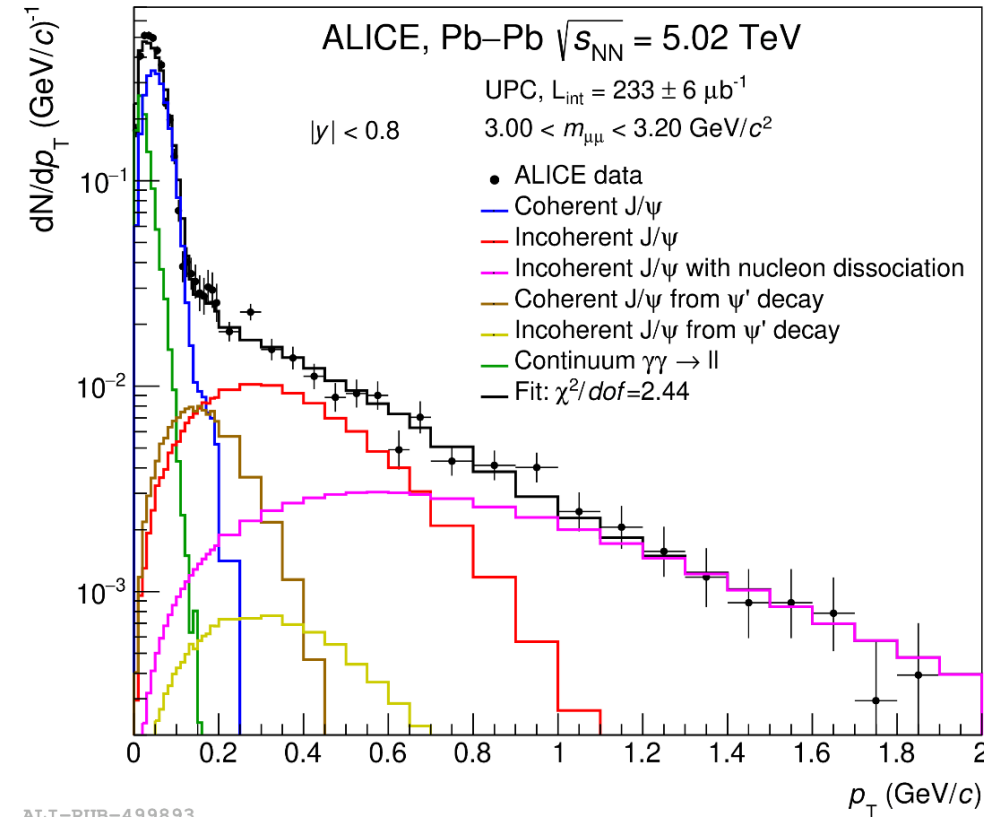
• Когерентное:

- когерентное взаимодействие со всеми нуклонами ядра
- $\langle p_T \rangle \sim 1/R_{Pb} \sim 60 \text{ МэВ/с}$
- эксклюзивный процесс



• Некогерентное:

- взаимодействие с отдельными нуклонами
- $\langle p_T \rangle \sim 1/R_p \sim 450 \text{ МэВ/с}$
- обычно сопровождается развалом ядра



ALI-PUB-499893

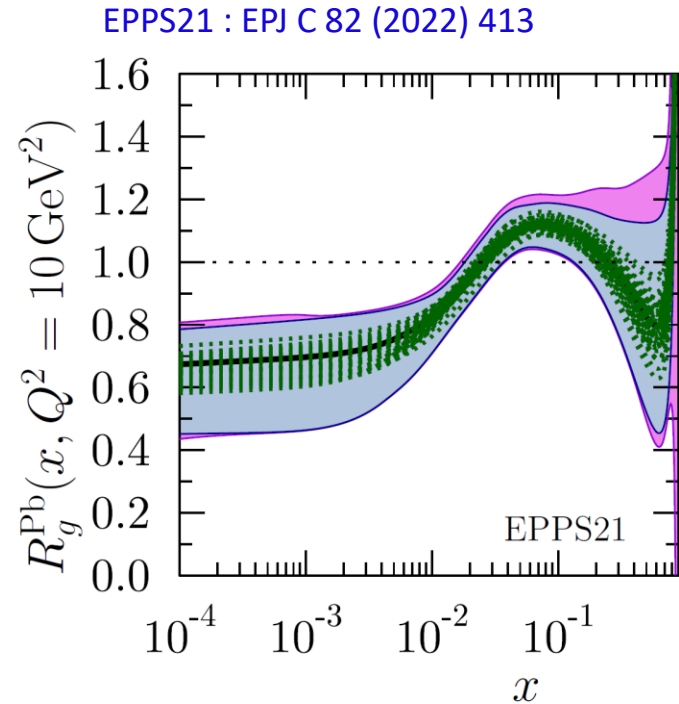
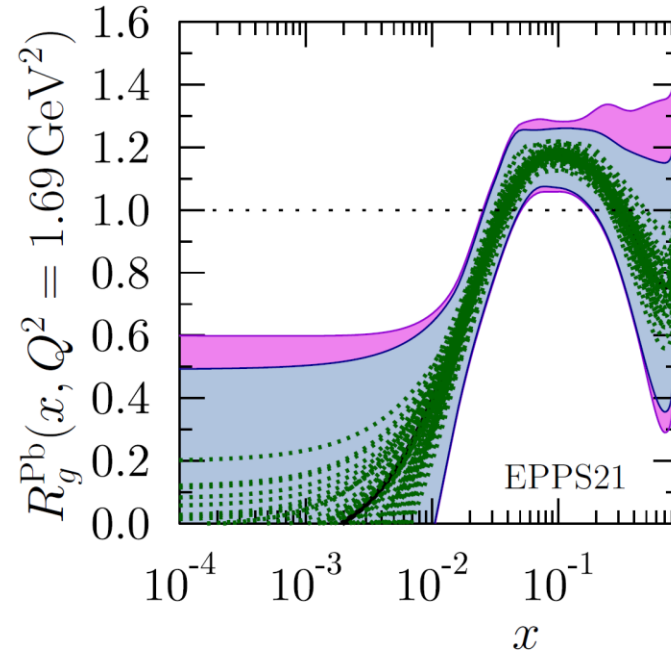
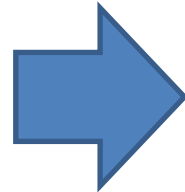
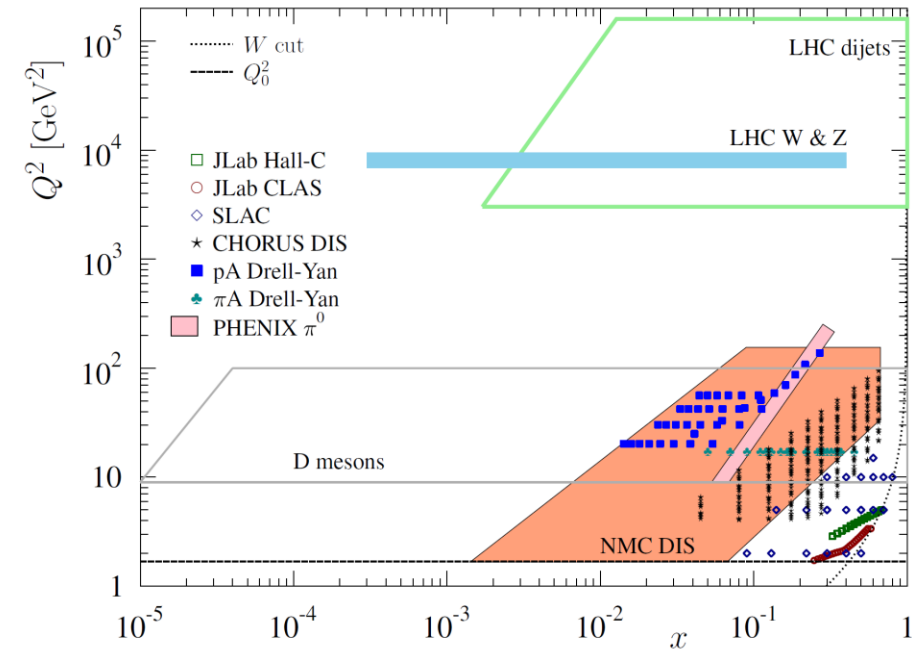
ALICE, PLB 817 (2021) 136280

Партонные плотности в ядрах (nPDFs)

Партонные плотности в ядрах критически важны для описания начального состояния в столкновениях тяжелых ядер

$$R_g^A(x, Q^2) = \frac{g_A(x, Q^2)}{Ag_p(x, Q^2)}$$

Определение nPDFs



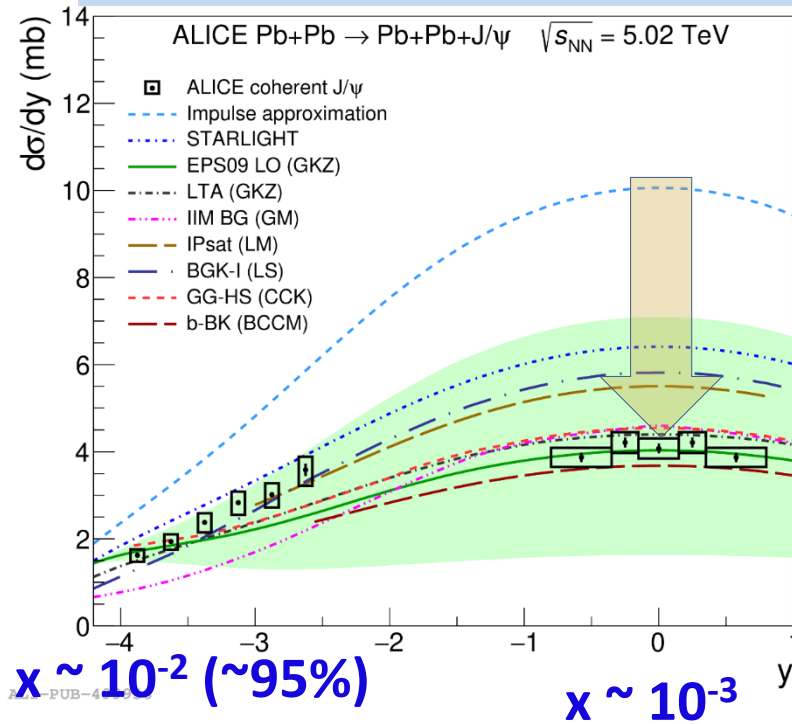
Большие погрешности извлекаемых функций глюонных экранировок, особенно при малых Q^2 :

- Ограниченная кинематика DIS и DY данных
- Непрямое извлечение глюонных распределений из уравнений эволюции

Измерения в зависимости от быстроты

ALICE, PLB 798 (2019) 134926, PLB 817 (2021) 136280

V. Guzey, E. Kryshen, M. Zhalov, PRC 93 (2016) 5, 055206



$x \sim 10^{-2}$ (~95%)

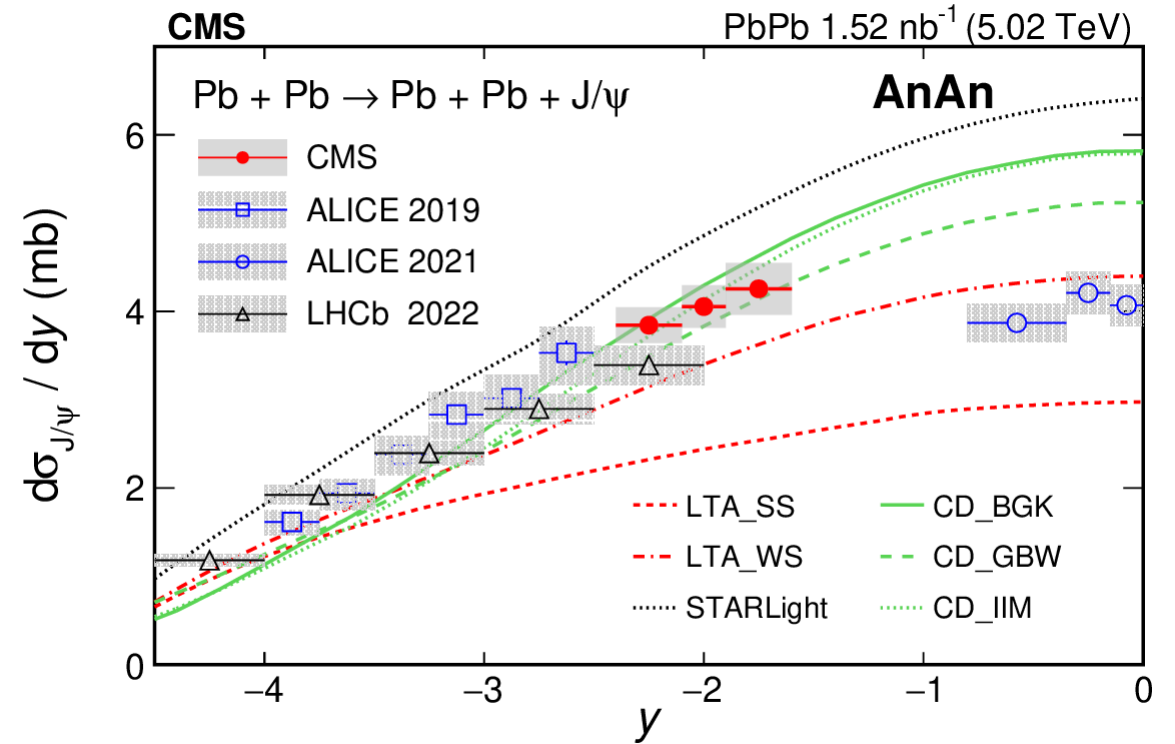
$x \sim 10^{-5}$ (~5%)

$$\frac{d\sigma_{PbPb}(y)}{dy} = n_{\gamma}(y)\sigma_{\gamma Pb}(y) + n_{\gamma}(-y)\sigma_{\gamma Pb}(-y)$$

low-energy photons high-x gluons high-energy photons low-x gluons

LHCb JHEP 06 (2023) 146

CMS, PRL 131 (2023) 262301

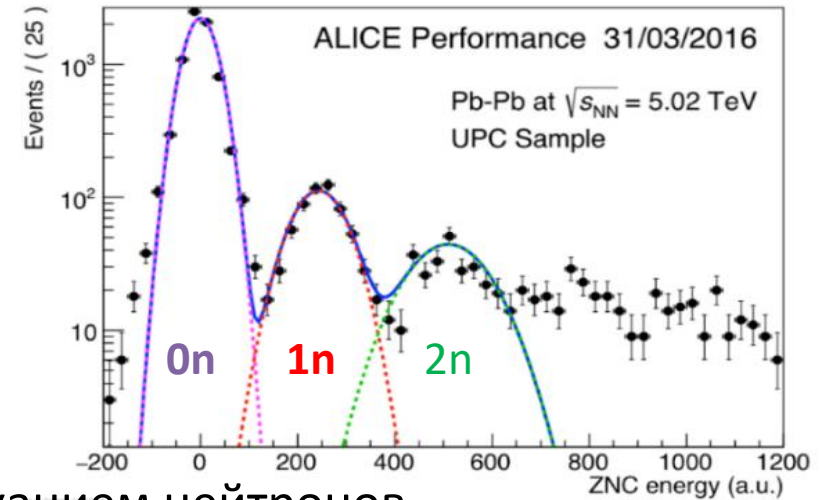
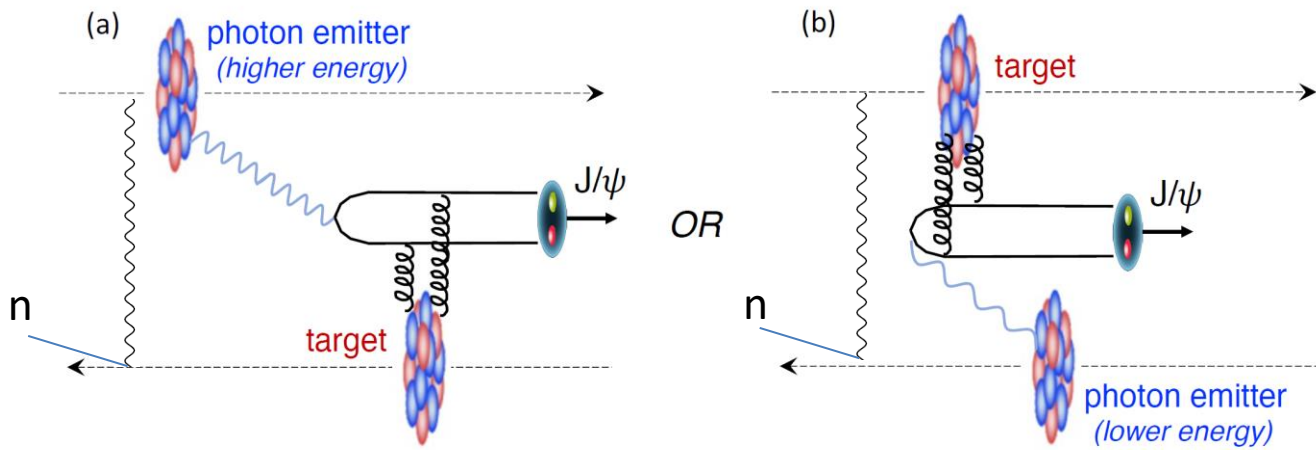


$$S_{Pb} = \sqrt{\frac{\sigma_{\gamma Pb}}{\sigma_{\gamma Pb}^{IA}}} \sim 0.65 \text{ при } y \sim 0 \quad (x \sim 10^{-3})$$

Прямое свидетельство сильных глюонных экранировок!

V. Guzey, E. Kryshen, M. Strikman, M. Zhalov, PLB 726 (2013), 290-295

Цель: извлечение вклада сечения при малых $x \sim 10^{-5}$



- $\sim 20\%$ событий когерентного рождения сопровождается испусканием нейтронов из-за дополнительного обмена фотонами
- Нейтроны можно измерять в калориметрах нулевого угла (ZDC – zero degree calorimeter)
- Измерения сечений с/без испускания нейтронов позволяют разделить вклады, соответствующие высоким и низким энергиям фотонов:

измерения

потоки (можно рассчитать с хорошей точностью)

$0n0n$: без нейтронов

$0nXn$: нейтроны с одной из сторон

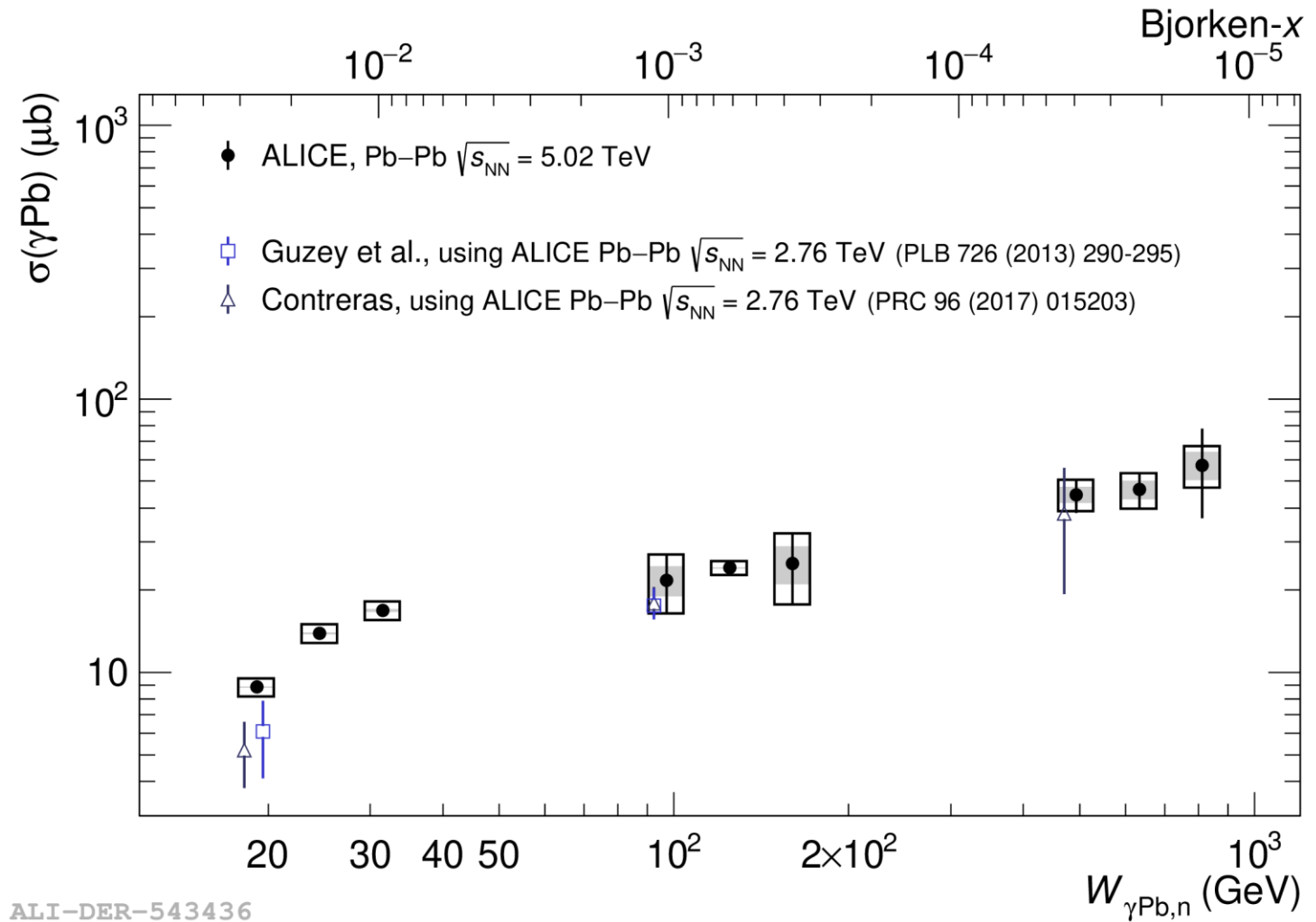
$$\frac{d\sigma_{PbPb}^{0n0n}(y)}{dy} = n_{\gamma}^{0n0n}(y)\sigma_{\gamma Pb}(y) + n_{\gamma}^{0n0n}(-y)\sigma_{\gamma Pb}(-y)$$

$$\frac{d\sigma_{PbPb}^{0nXn}(y)}{dy} = n_{\gamma}^{0nXn}(y)\sigma_{\gamma Pb}(y) + n_{\gamma}^{0nXn}(-y)\sigma_{\gamma Pb}(-y)$$

Неизвестные фотоядерные сечения

Зависимость фотоядерных сечений от энергии

- ALICE: впервые фотоядерное сечение измерено до энергий ~ 1 ТэВ!



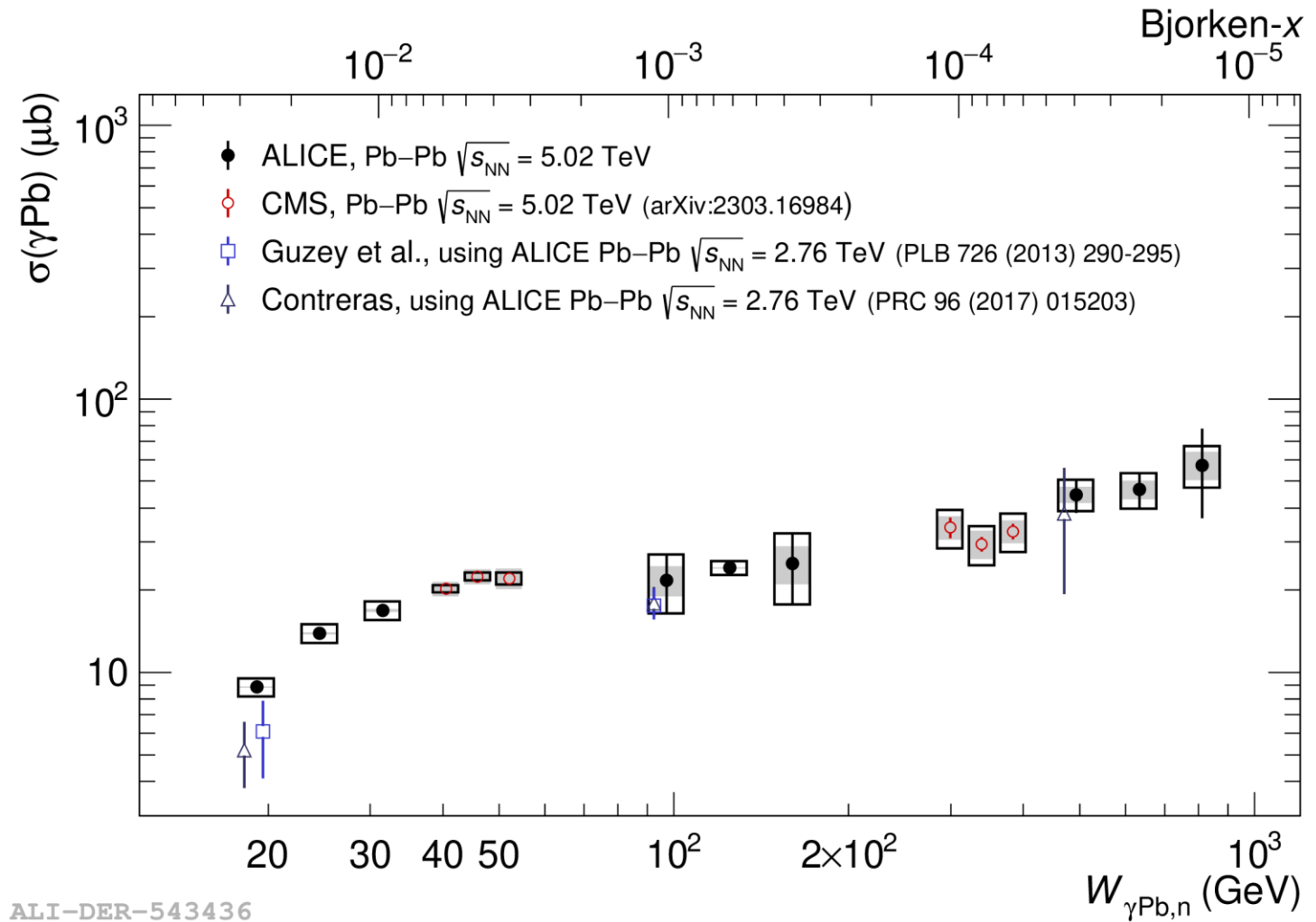
LTA: Guzey, Kryshen, Zhalov, PRC 93 (2016) 055206

ALICE, JHEP 10 (2023) 119

CMS, PRL 131 (2023) 262301

Зависимость фотоядерных сечений от энергии

- ALICE: впервые фотоядерное сечение измерено до энергий ~ 1 ТэВ!
- Согласие результатов ALICE и CMS



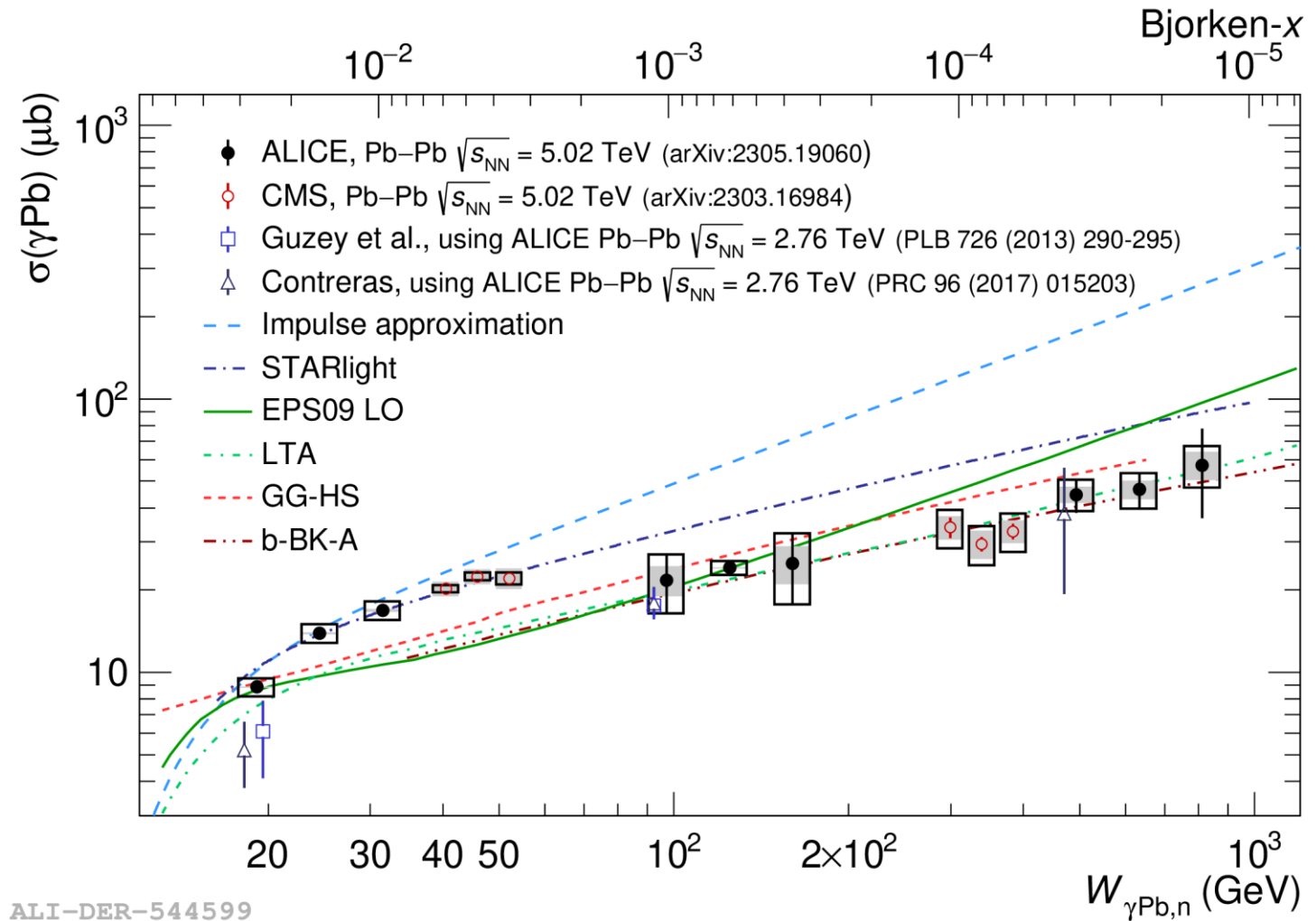
LTA: Guzey, Kryshen, Zhalov, PRC 93 (2016) 055206

ALICE, JHEP 10 (2023) 119

CMS, PRL 131 (2023) 262301

Зависимость фотоядерных сечений от энергии

- ALICE: впервые фотоядерное сечение измерено до энергий ~ 1 ТэВ!
- Согласие результатов ALICE и CMS
- Сравнение с теоретическими расчетами:
 - При малых энергиях: согласие с импульсным приближением
 - При высоких энергиях: согласие с LTA и расчетами в дипольной модели (b-BK-A, GG-HS)



LTA: Guzey, Kryshen, Zhalov, PRC 93 (2016) 055206

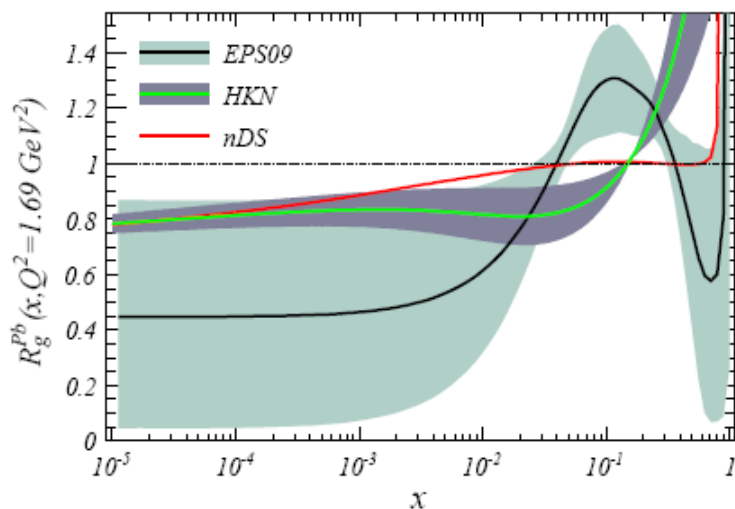
ALICE, JHEP 10 (2023) 119

CMS, PRL 131 (2023) 262301

Фактор ядерного подавления

- Фактор ядерного подавления впервые измерен вплоть до $x \sim 10^{-5}$!

$$S_{Pb} = \sqrt{\frac{\sigma_{\gamma Pb}}{\sigma_{\gamma Pb}^{IA}}}$$

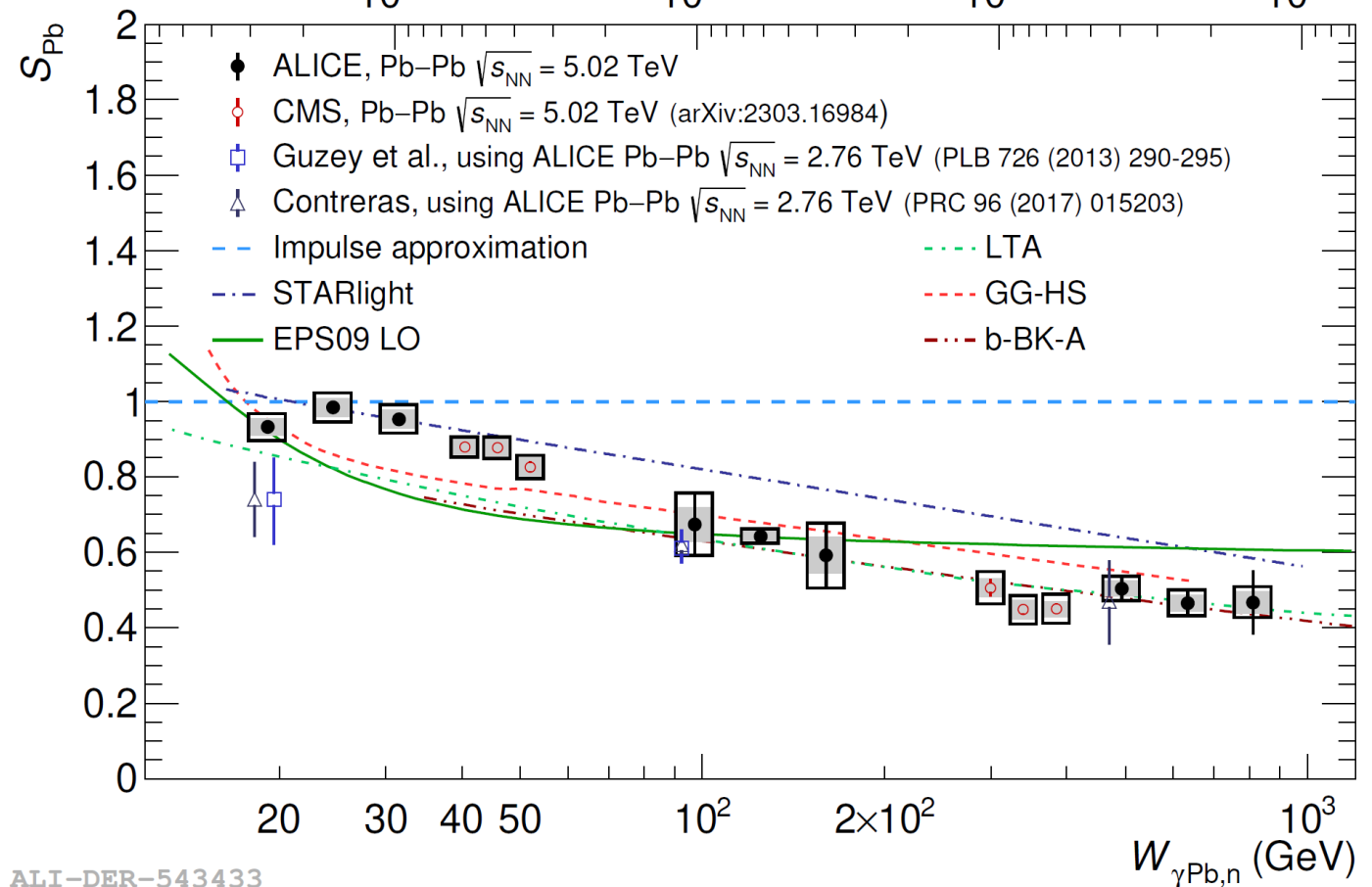


ALICE, JHEP 10 (2023) 119

CMS, PRL 131 (2023) 262301

LTA: Guzey, Kryshen, Zhilov, PRC 93 (2016) 055206

Bjorken-x
 10^{-5}



ALI-DER-543433

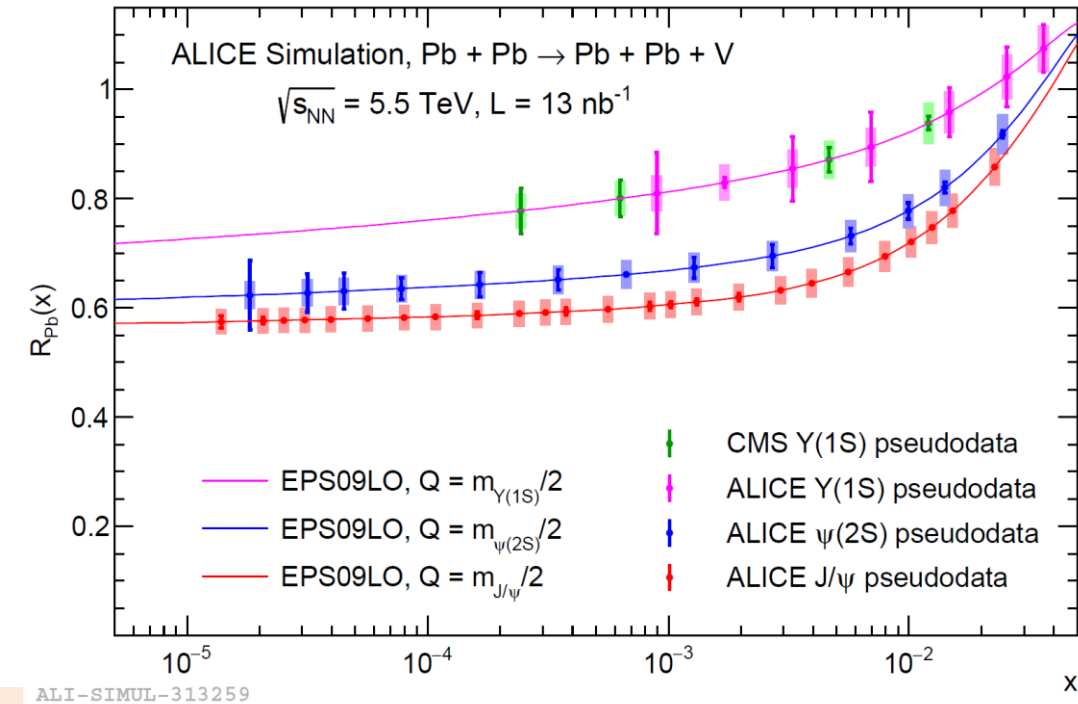
При малых x : согласие как с моделью LTA (глюонные экранировки), так и с моделями, основанными на эффектах насыщения глюонной плотности

Перспективы измерений УПС в сеансах Run 3 и Run 4

Ожидаемая статистика в Run 3-4 (13 /нб):

Канал распада	σ	Всего	$ \eta < 0.9$	$ \eta < 2.4$	$2.5 < \eta < 4.0$	$2.0 < \eta < 5.0$
$\rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$	5.2 б	68 B	5.5 B	21B	4.9 B	13 B
$\phi \rightarrow K^+K^-$	0.22 б	2.9 B	82 M	490 M	15 M	330 M
$J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$	1.0 мб	14 M	1.1 M	5.7 M	600 K	1.6 M
$\psi(2S) \rightarrow \mu^+\mu^-$	30 мкб	400 K	35 K	180 K	19 K	47 K
$\Upsilon(1S) \rightarrow \mu^+\mu^-$	2.0 мкб	26 K	2.8 K	14 K	880	2.0 K

Z. Citron, CERN Yellow Rep. Monogr. 7 (2019) 1159



Основные цели в Run 3-4:

- прецизионное измерение экранировок при малых x
- изучение зависимости экранировок от Q^2

Спасибо за внимание!

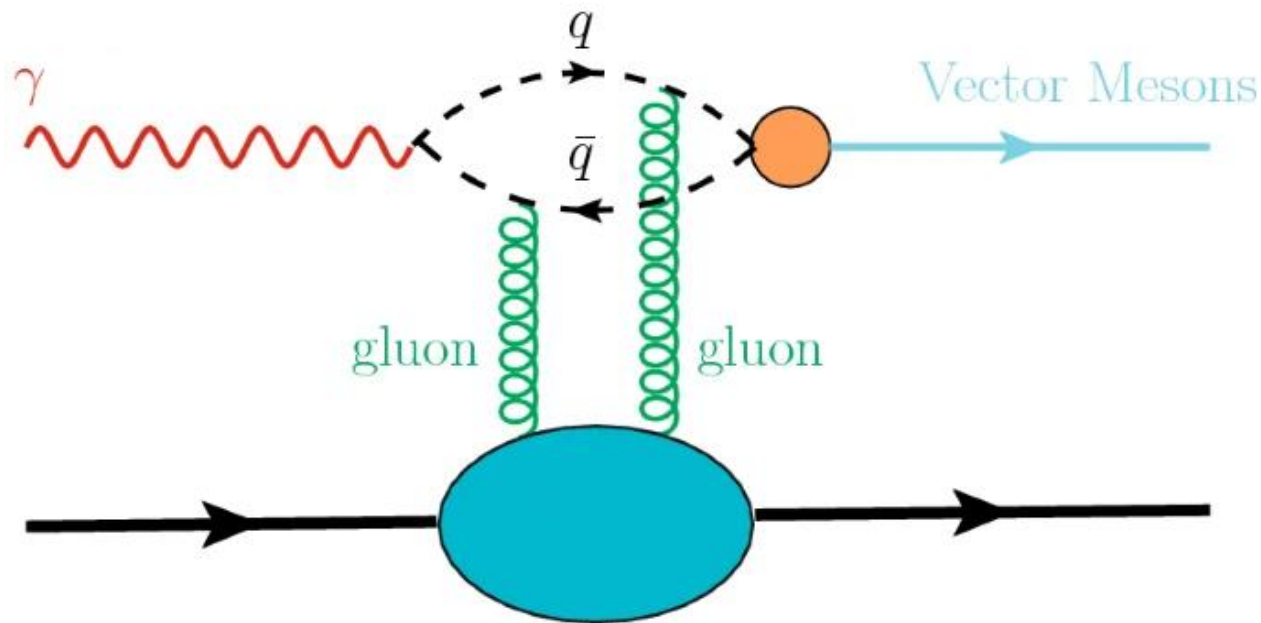
The background of the slide is a dynamic, abstract composition of blue light. It features a central, bright white and yellow light source that radiates outwards, creating a tunnel-like effect. Numerous beams of light, some sharp and some blurred, extend from the center towards the edges of the frame. The overall color palette is a gradient of blues, from deep navy to bright cyan, with the lightest tones concentrated at the center.

Фоторождение J/ψ на протоне

В LO сечение эксклюзивного фоторождения J/ψ пропорционально квадрату глюонной плотности:

$$\left. \frac{d\sigma_{\gamma p \rightarrow J/\psi p}}{dt} \right|_{t=0} = \frac{M_{J/\psi}^3 \Gamma_{ee} \pi^3 \alpha_s^2(Q^2)}{48 \alpha_{em} Q^8} [x g_p(x, Q^2)]^2$$

Ryskin: Z. Phys. C 57 (1993) 89



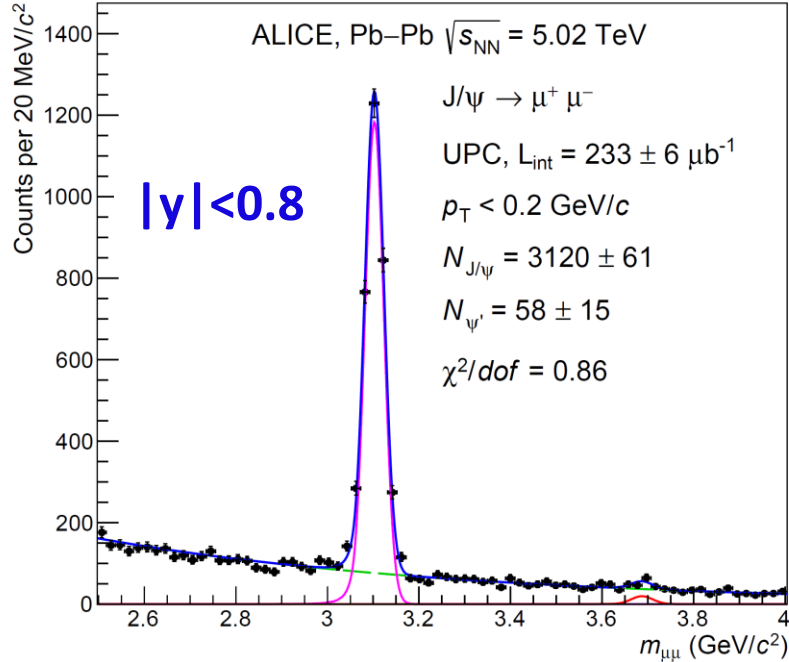
$$Q^2 \sim \frac{M_{J/\psi}^2}{4} \sim 2.5 \text{ GeV}^2$$

$$x = \frac{M_{J/\psi}^2}{W_{\gamma p}^2} \sim 10^{-2} - 10^{-5} \text{ на LHC}$$

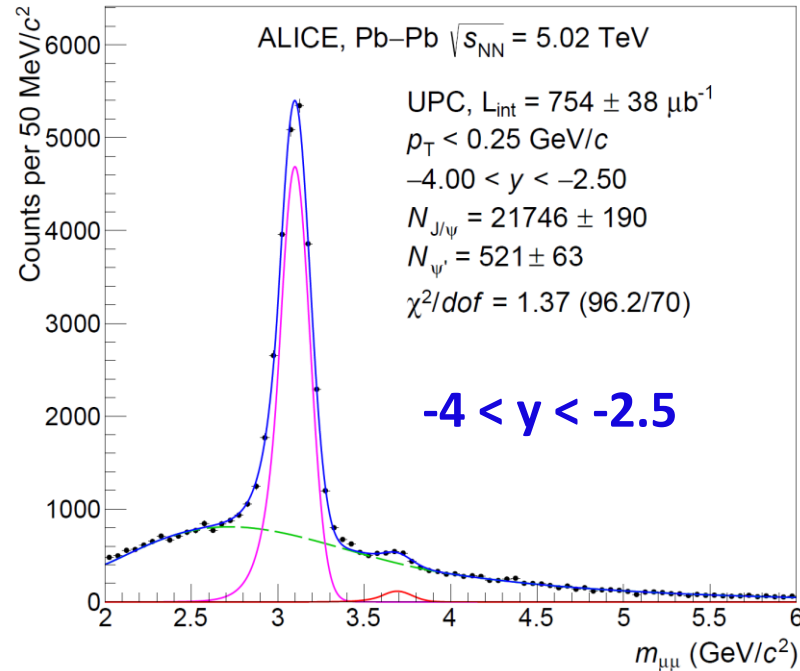
Фоторождение векторных мезонов можно использовать для получения ограничений на глюонные PDF при малых x

Измерение сечений

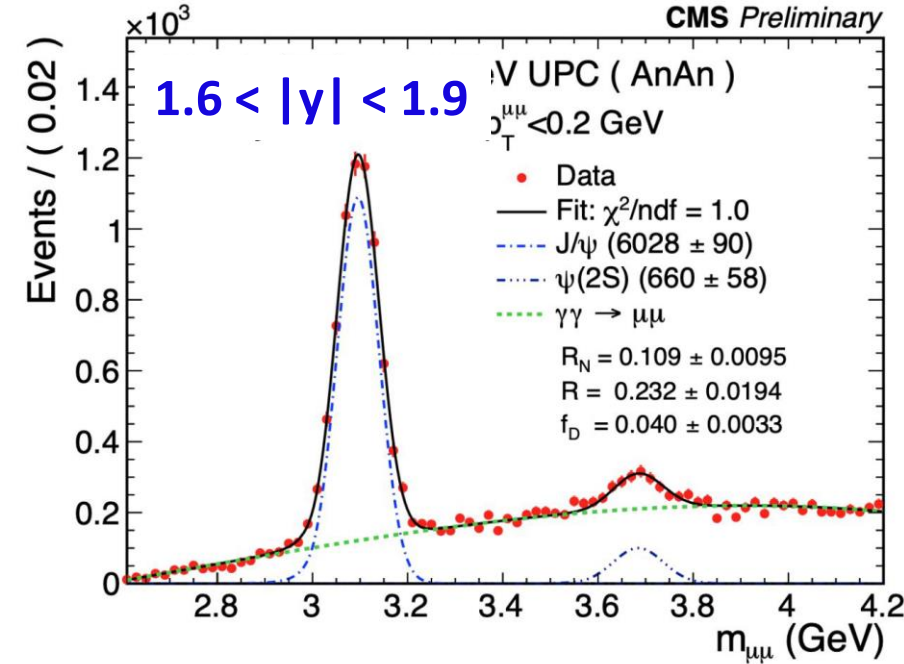
ALICE, EPJC 81 (2021) 712



ALICE, PLB 798 (2019) 134926



CMS, PRL 131 (2023) 262301

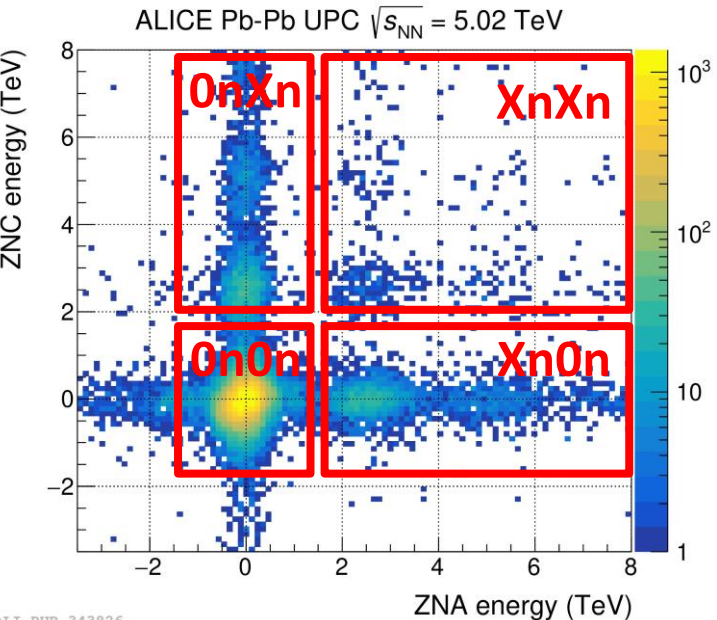


$$\frac{d\sigma_{VM}^{coh}}{dy} = \frac{N_{VM}^{coh}}{\epsilon_{VM} \times \epsilon_{veto}^{pileup} \times \epsilon_{veto}^{EMD} \times BR \times \mathcal{L}_{int} \times \Delta y}$$

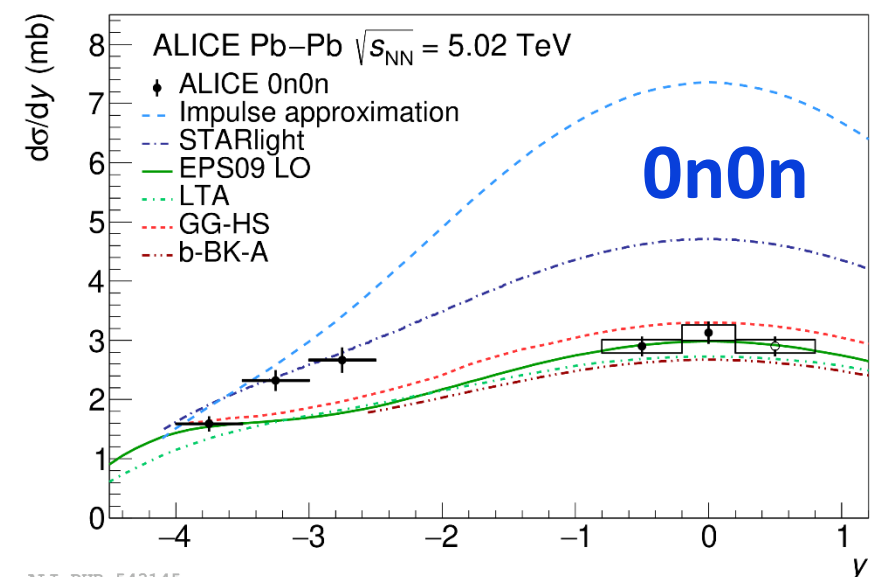
ϵ_{VM} — эффективность реконструкции
 ϵ_{veto}^{pileup} — эффективность вето
 ϵ_{veto}^{EMD} — эффективность вето
 BR — branching
 \mathcal{L}_{int} — светимость
 Δy — диапазон по быстрой

Когерентное сечение J/ψ + испускание нейтронов

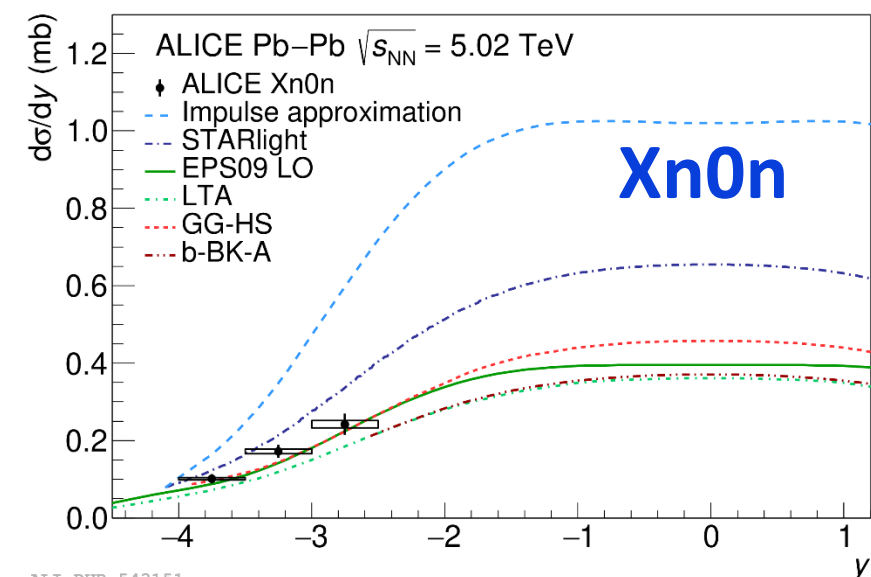
ALICE, JHEP 06 (2020) 035



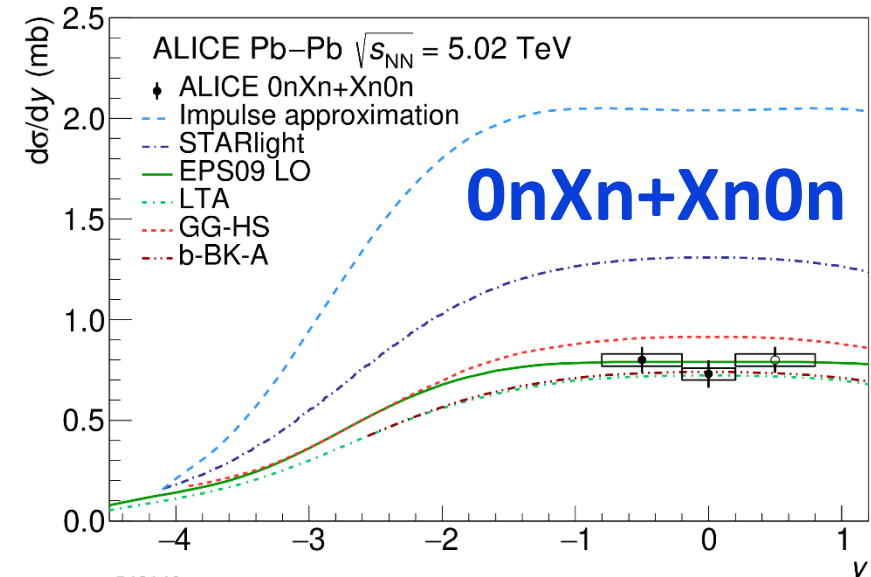
ALI-PUB-343826



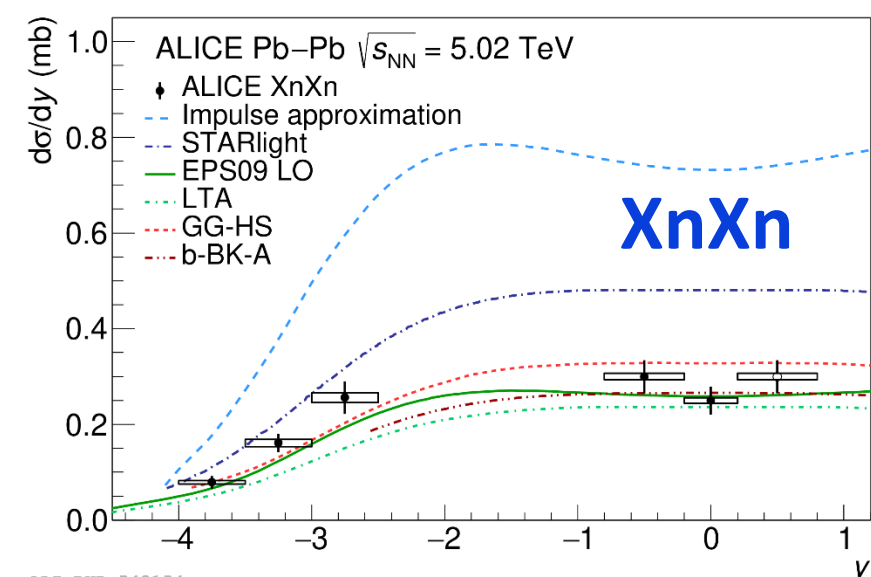
ALI-PUB-543145



ALI-PUB-543151

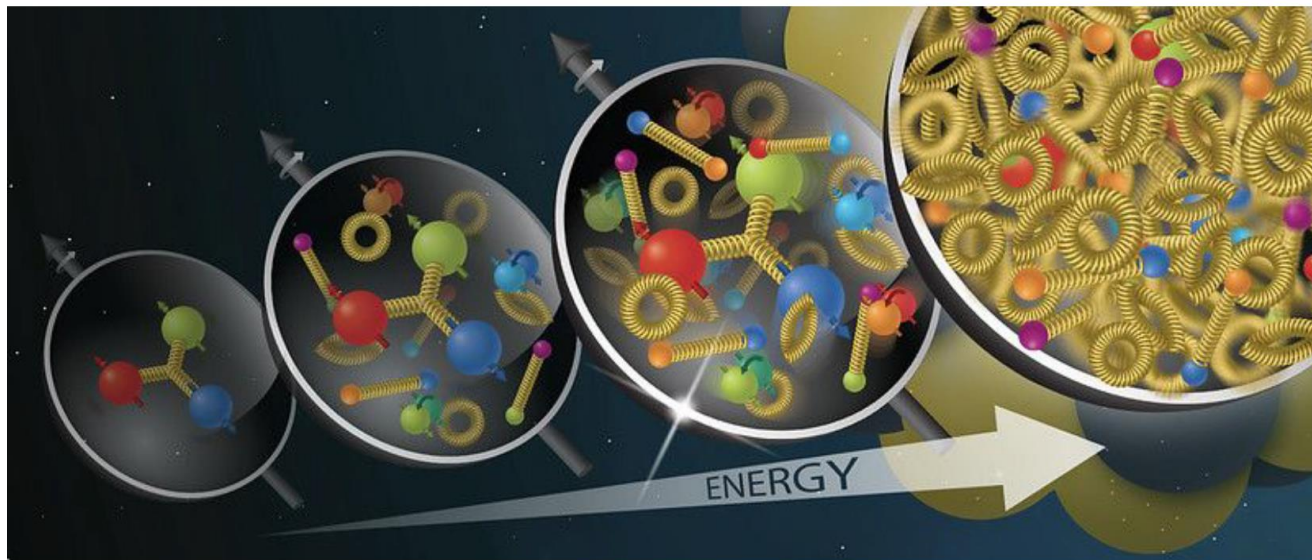


ALI-PUB-543148



ALI-PUB-543154

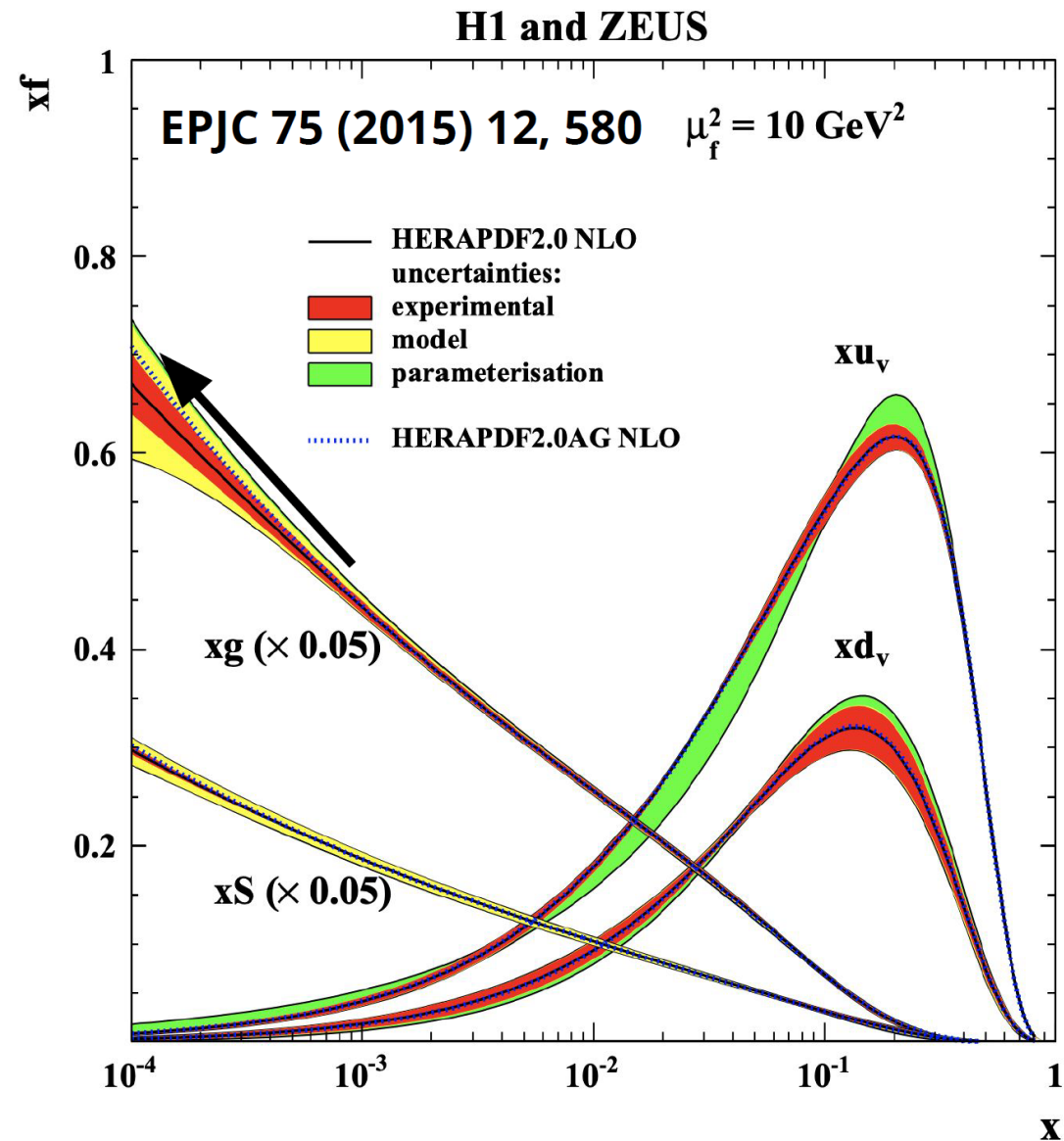
Партонные функции



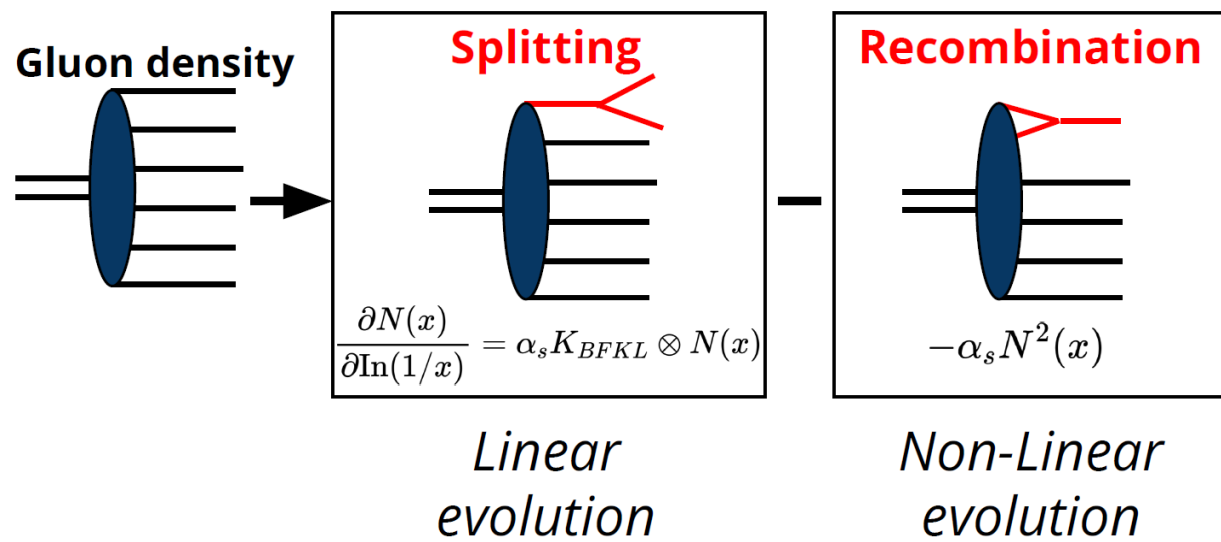
Smaller x

$$\sigma_{pp \rightarrow X}(E_{pp}^2) = \int_0^1 dx_1 dx_2 \underbrace{f_i(x_1, \mu^2) f_j(x_2, \mu^2)}_{\text{parton distributions at scale } \mu^2} \underbrace{\hat{\sigma}_{ij \rightarrow X}(x_1 x_2 E_{pp}^2, \mu^2)}_{\text{hard process cross section}}$$

momentum fractions
parton distributions at scale μ^2
hard process cross section

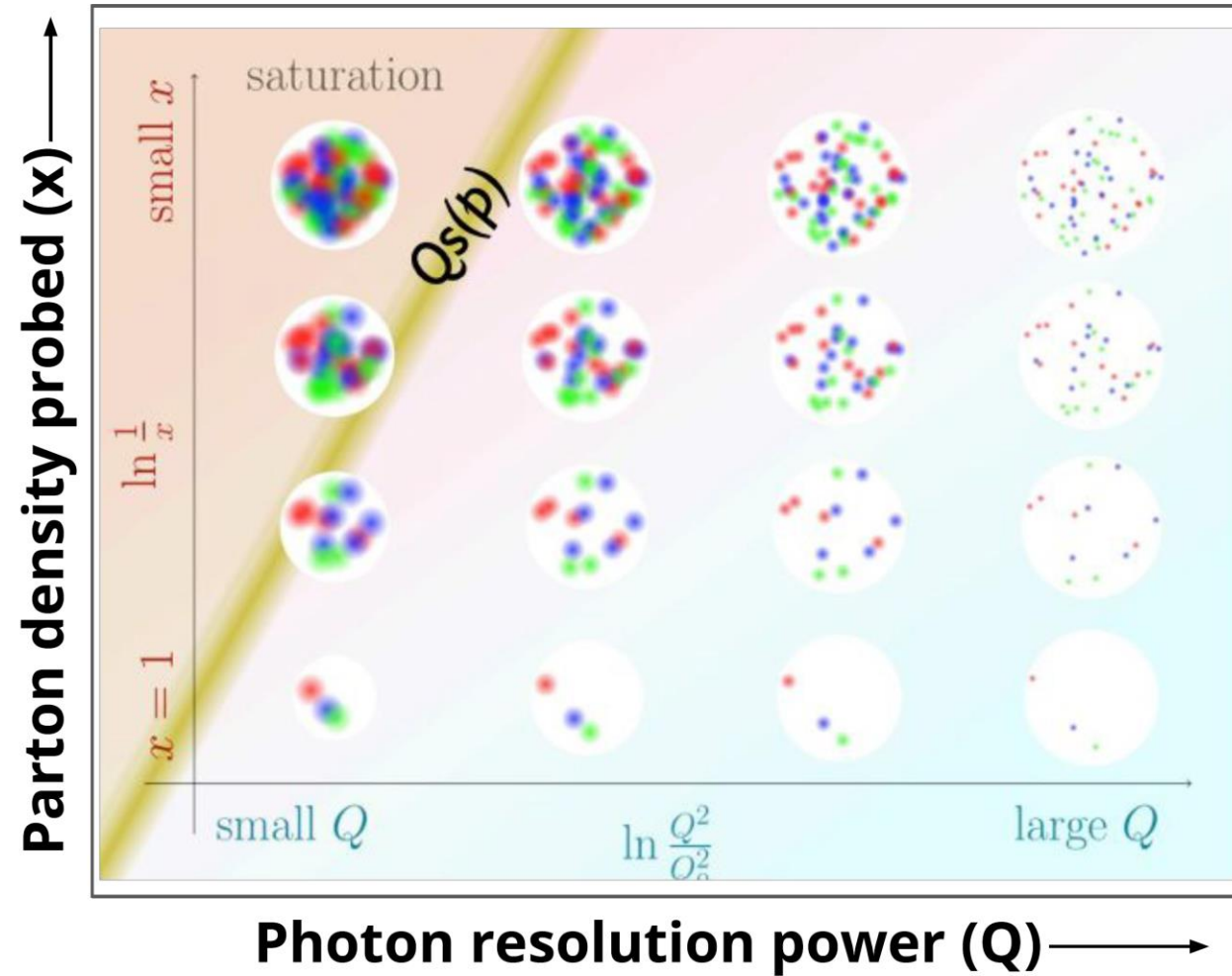


Насыщение глюонной плотности



При достаточно малых x ожидается переход в режим «насыщения» глюонной плотности

→ замедление роста сечений фоторождения?



Эксклюзивное рождение J/ψ на протоне

ALICE: PRL 113 (2014) 232504

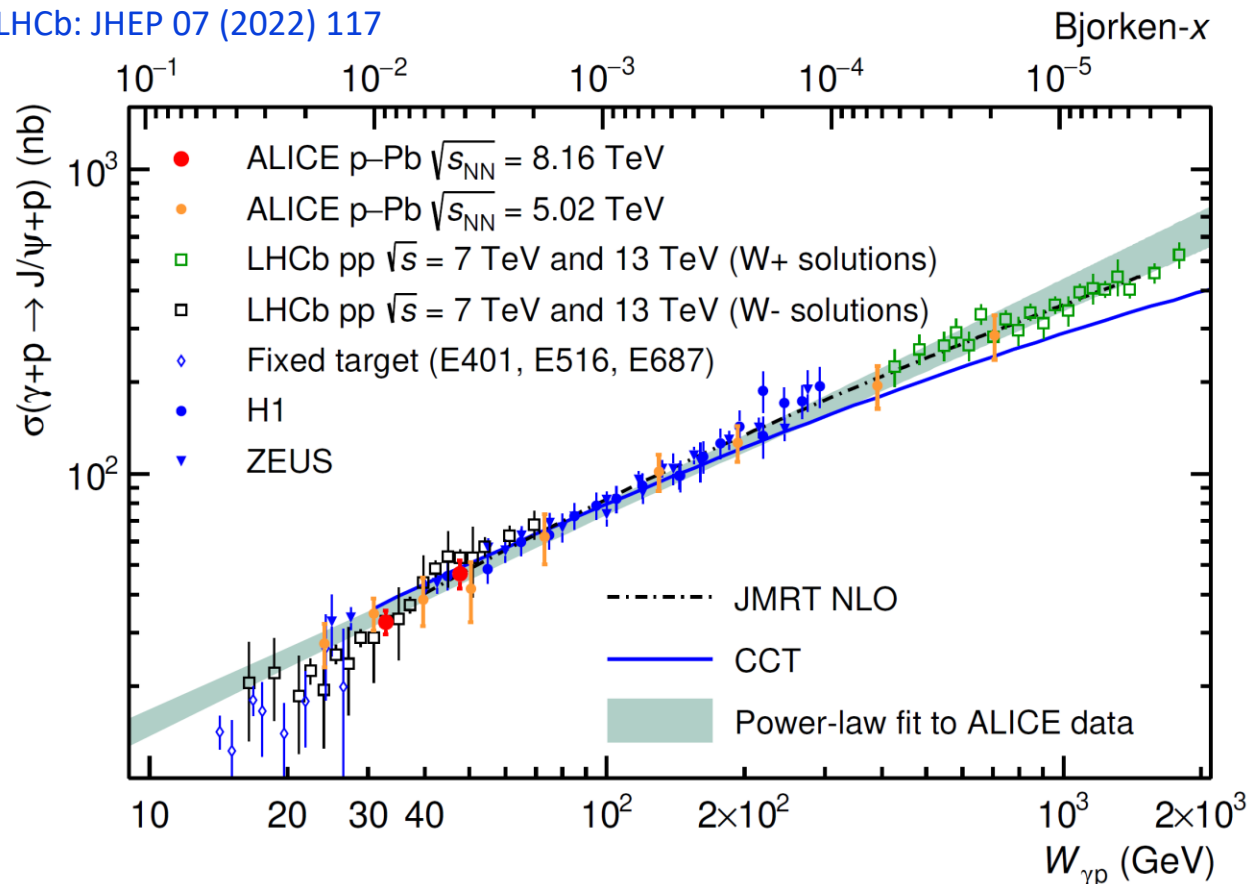
ALICE: EPJC 79 (2019) 402

ALICE: PRD 108 (2023) 112004

LHCb: JHEP 06 (2023) 146

LHCb: JHEP 07 (2022) 117

$$x = \frac{M_{J/\psi}^2}{W_{\gamma p}^2} = \frac{M_{J/\psi}}{2E_p} \exp(\pm y)$$



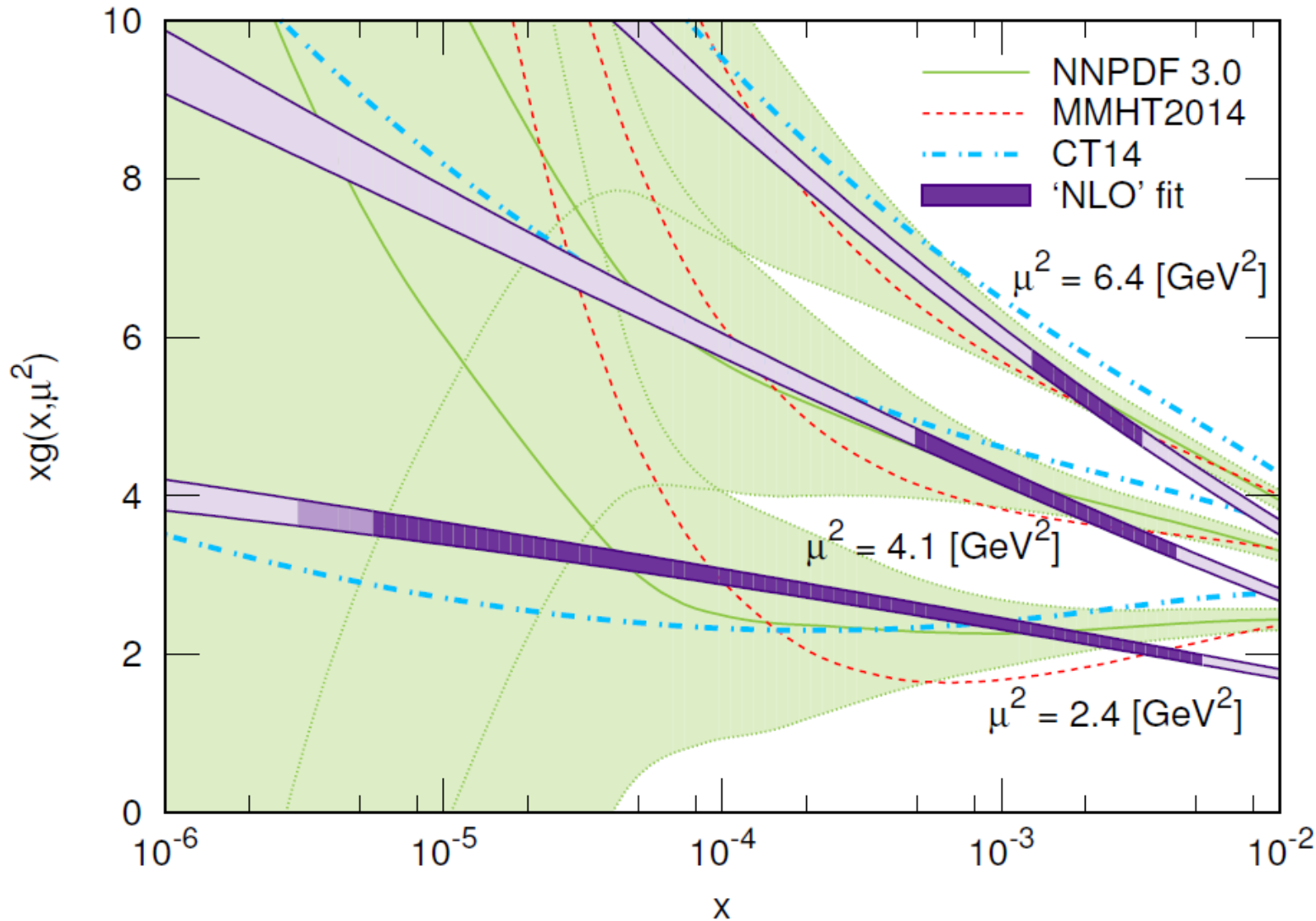
- Измерения LHCb в pp, ALICE в p-Pb столкновениях
- Максимальные энергии порядка 1 ТэВ
- Измерения хорошо описываются степенной зависимостью:

$$\sigma_{\gamma p \rightarrow J/\psi p} \sim W_{\gamma p}^{\delta} \quad \delta = 0.70 \pm 0.04$$

- В согласии с HERA:
 H1: $\delta = 0.67 \pm 0.03$
 ZEUS: $\delta = 0.69 \pm 0.02 \pm 0.03$
- Явных признаков насыщения не обнаружено ☹️

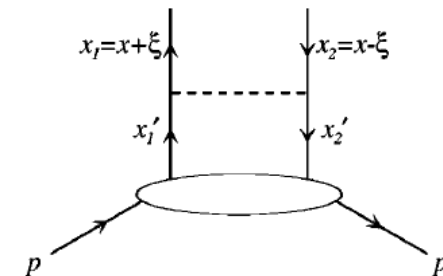
$$\sigma_{\gamma p \rightarrow J/\psi p}(W_{\gamma p}) = \frac{1}{n_{\gamma}(y)} \frac{d\sigma_{pPb \rightarrow pPb J\psi}(y)}{dy}$$

Ограничение глюонных распределений?



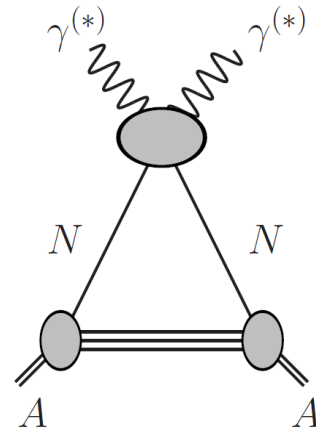
Caveats:

- J/ψ photoproduction probes **generalized gluon distributions** (two gluons have different x values)
 - Connected with collinear PDFs via Shuvaev transform: PRD 60 (1999) 014015
- **Scale uncertainty** $\mu^2 \sim 2.4\text{-}3 \text{ GeV}^2$ is a reasonable choice
 - Guzey, Zhavoronkov: JHEP 1310 (2013) 207
- **Large NLO contributions**
 - Y measurements reveal importance of NLO effects

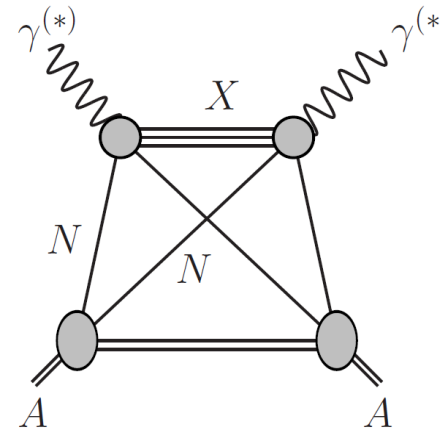


Ядерные экранировки

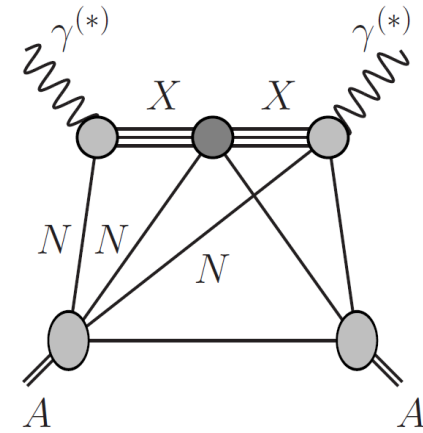
- **Ядерная экранировка** – подавление сечения на ядрах по сравнению с суммой сечений на нуклонах: $\sigma_A < A \sigma_N$
- Объясняется **деструктивной интерференцией** амплитуд взаимодействия с одним, двумя ... нуклонами ядра: нуклоны на задней поверхности ядра испытывают поток, экранированный передними нуклонами



импульсное приближение

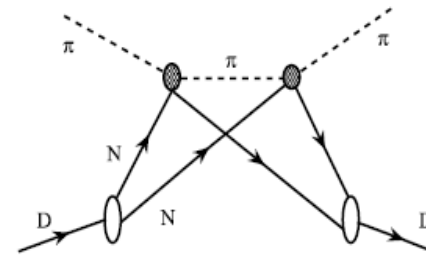
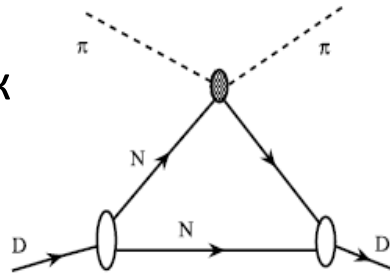


рассеяние на двух нуклонах



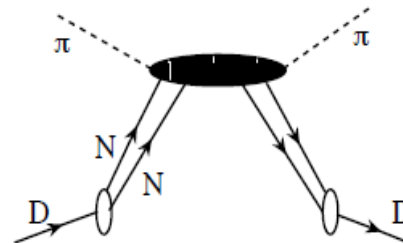
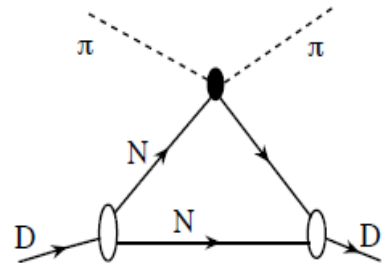
рассеяние на трех нуклонах

- **Глаубер (1955)**: модель экранировок с учетом упругих промежуточных состояний



$$\sigma_{\text{tot}}^{\pi D} = 2\sigma_{\text{tot}}^{\pi N} - \frac{(\sigma_{\text{tot}}^{\pi N})^2}{4\pi} \left\langle \frac{1}{r^2} \right\rangle_D$$

- **Грибов (1969)**: важность учета дифракционных промежуточных состояний

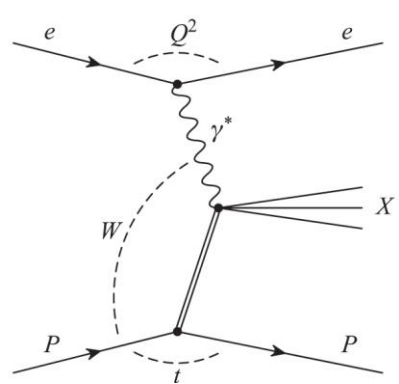
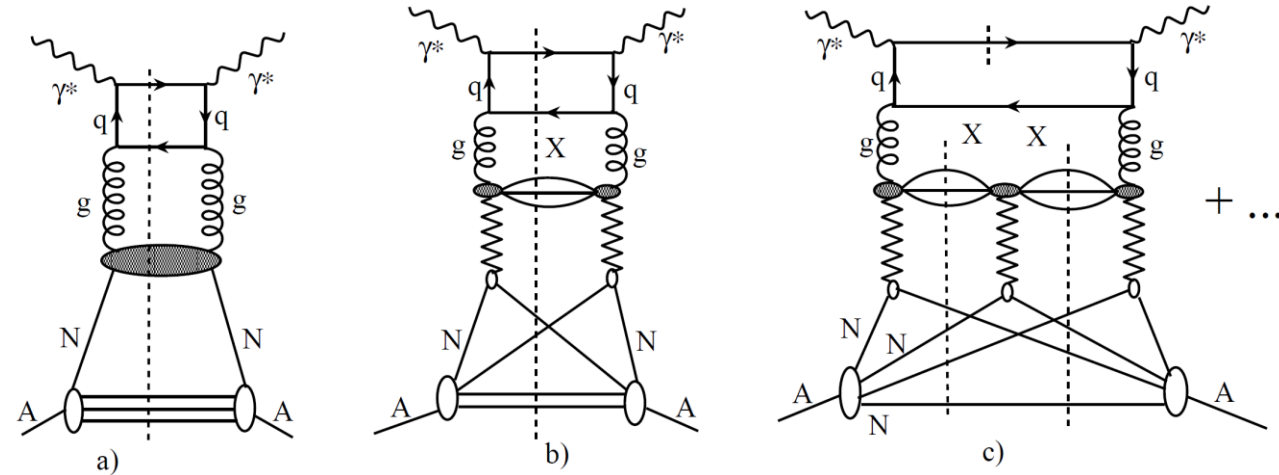


$$\sigma_{\text{tot}}^{\pi D} = 2\sigma_{\text{tot}}^{\pi N} - 2 \int d\vec{k}^2 \rho(4\vec{k}^2) \frac{d\sigma_{\text{diff}}^{\pi N}(\vec{k})}{d\vec{k}^2}$$

Расчет nPDF в приближении лидирующих твистов

LTA (Leading twist approximation) – обобщение модели Грибова-Глаубера на партонный уровень

Frankfurt, Strikman, EPJ A5 (1999) 293



- основано на идее Грибова о связи ядерных экранировок и дифракции
- В расчетах используются дифракционные партонные распределения, измеренные на HERA
- Работают уравнения эволюции DGLAP

