

ДИССЕРТАЦИОННЫЙ СОВЕТ ОИЯИ.02.01.2024.П  
ПО ФИЗИКЕ ЧАСТИЦ ПРИ ЛФВЭ

**Фоторождение векторных мезонов  
в ультрапериферических столкновениях  
на Большом Адронном Коллайдере**

Защита диссертации на соискание степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности

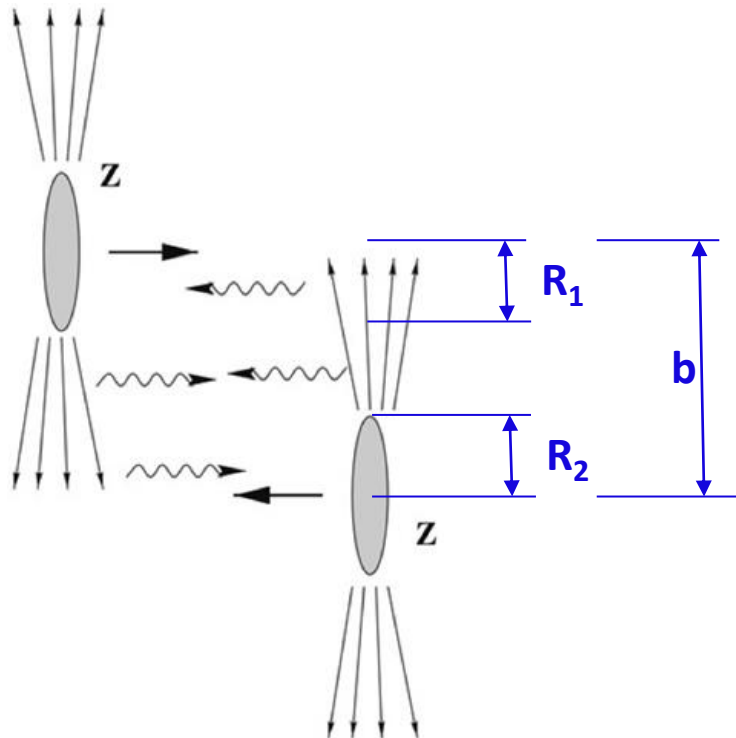
1.3.15 – физика атомного ядра и элементарных частиц, физика высоких энергий

Евгений Леонидович Крышень

Работа выполнена в

Петербургском Институте 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 столкновения подавлены

**Поток фотонов:**

→ можно описать в приближении эквивалентных фотонов

→  $Q < 1/R \sim 30$  МэВ

→ пропорционален  $Z^2$

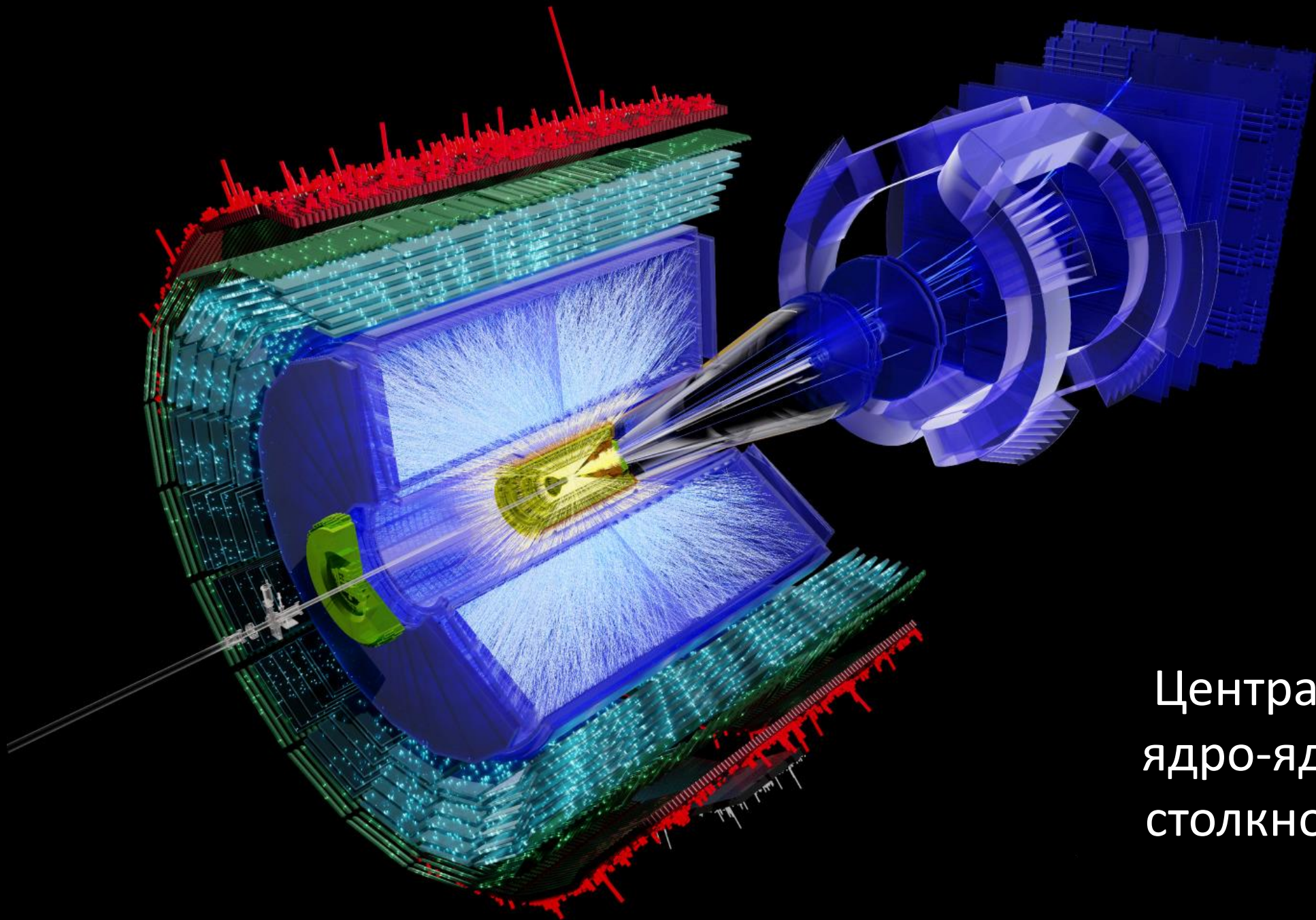
**Ультрапериферические столкновения на LHC можно использовать для исследования  $\gamma\gamma$ ,  $\gamma p$  и  $\gamma Pb$  взаимодействий при высоких энергиях**

Обзоры по физике УПС:

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

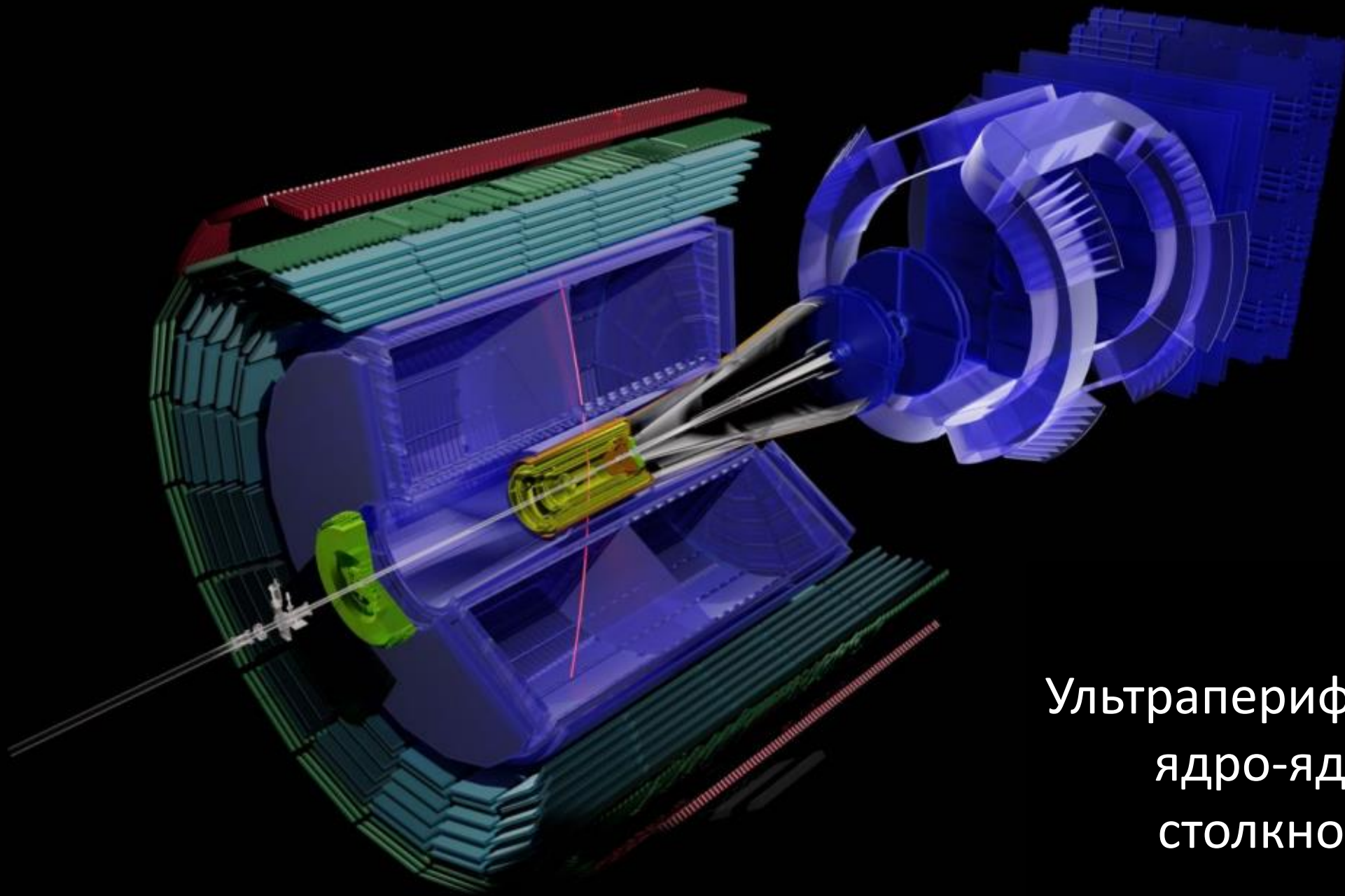
J.G. Contreras, J.D. Tapia Takaki. Int.J.Mod.Phys. A30 (2015) 1542012

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



Центральное  
ядро-ядерное  
столкновение

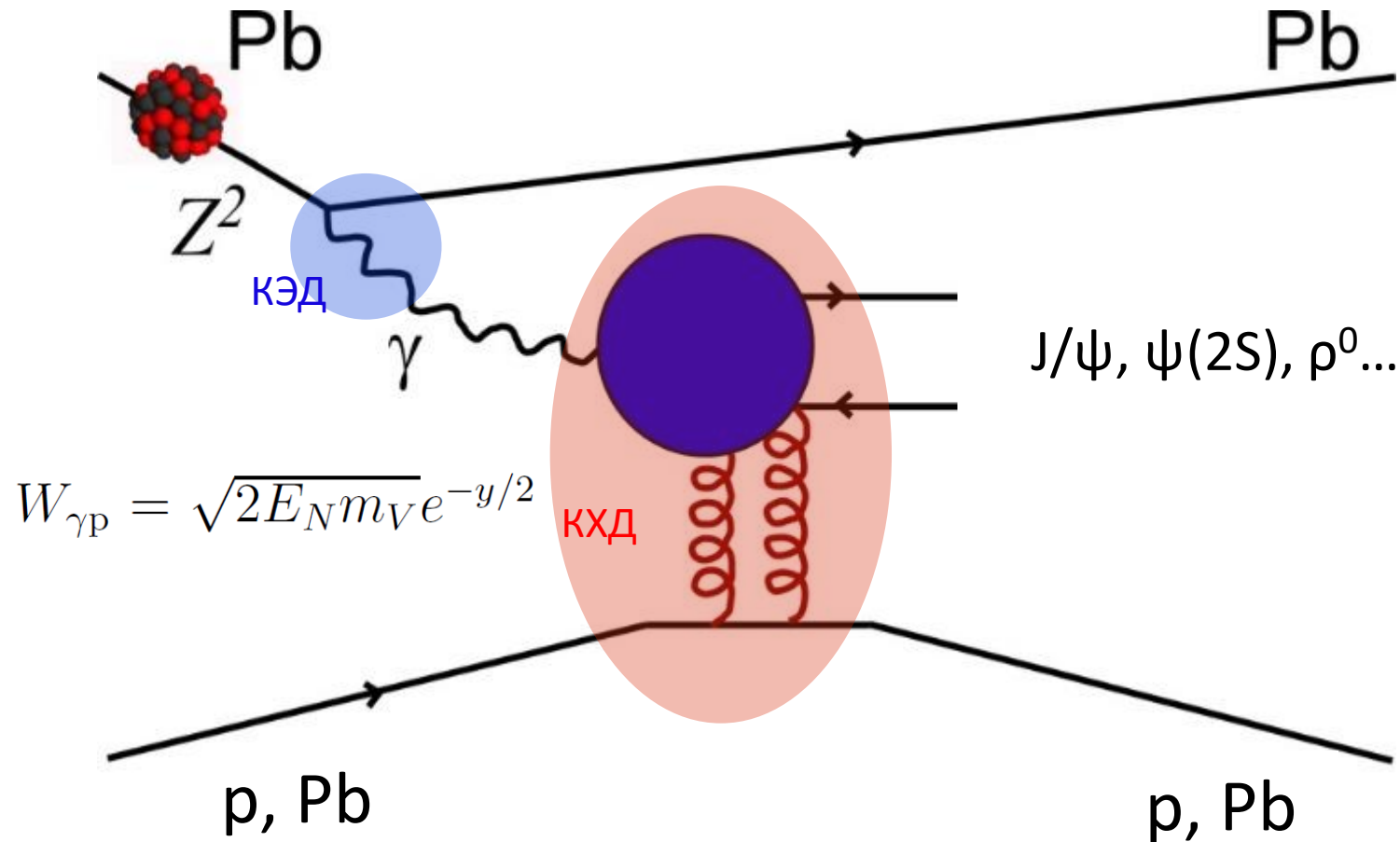




Ультрапериферическое  
ядро-ядерное  
столкновение



# Фоторождение векторных мезонов в УПС

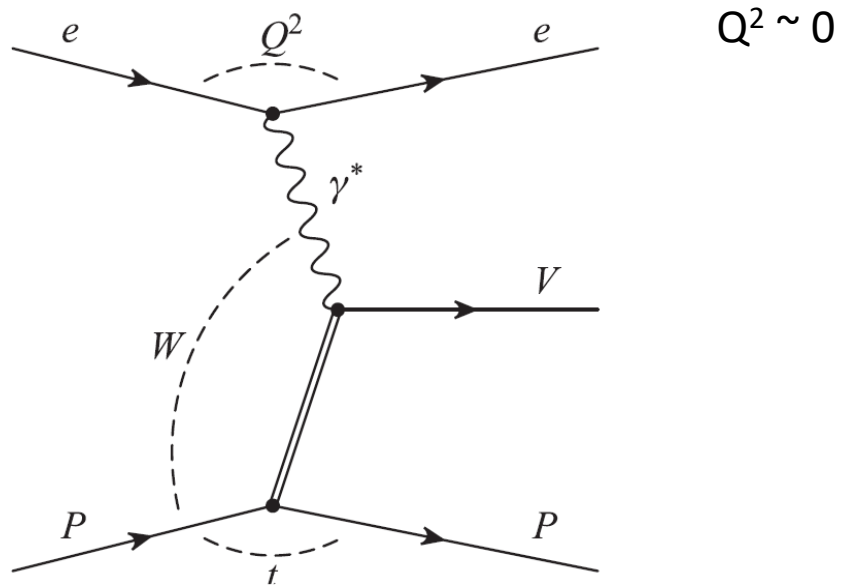


Сечение в УПС можно факторизовать:

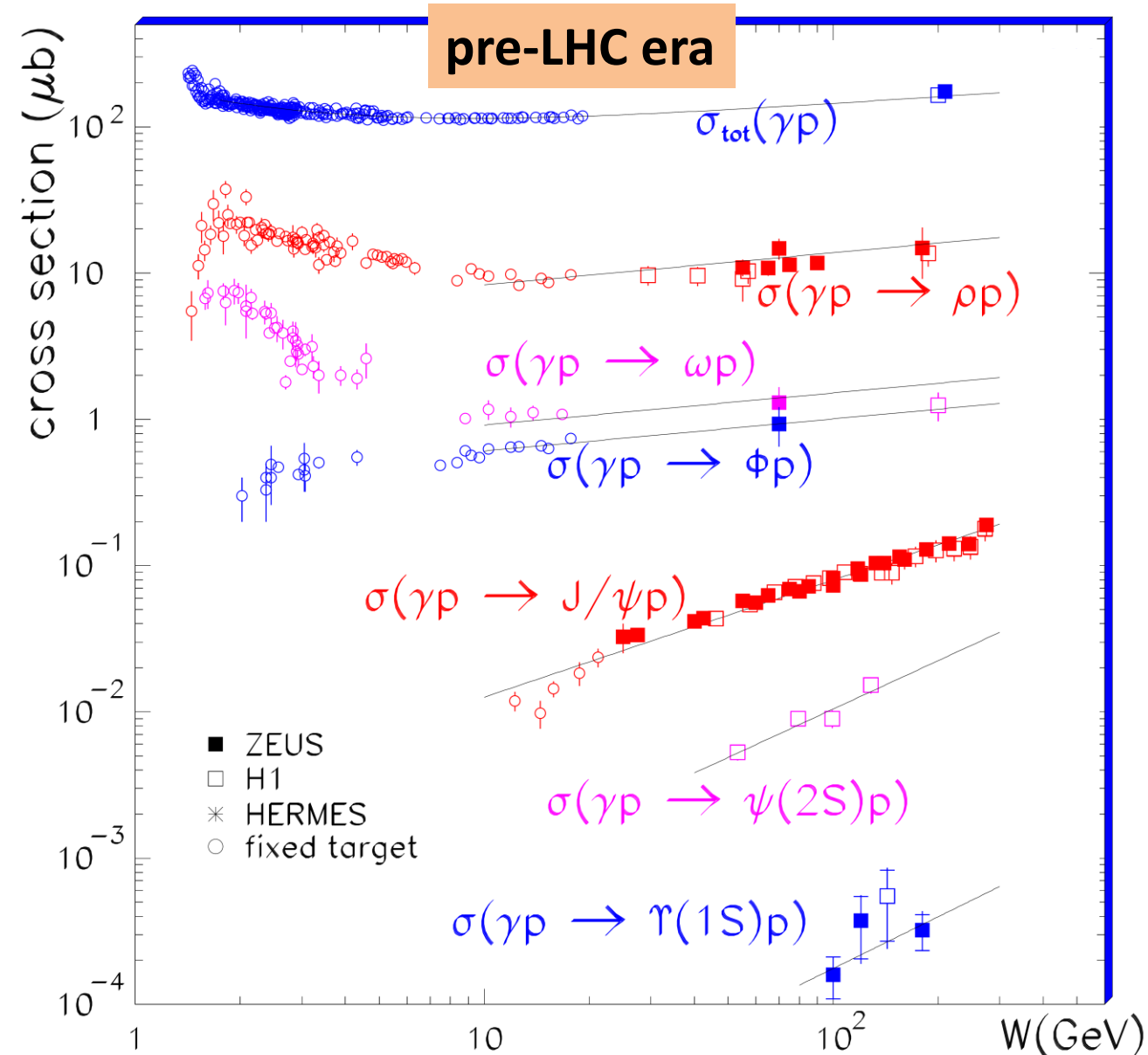
- КЭД: поток квазиреальных фотонов
- КХД: сечение фоторождения  $\sigma_{\gamma P b}$

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

# Фоторождение векторных мезонов на протоне



- Сечения **легких векторных мезонов** хорошо описываются в теории полюсов **Редже**
- Степенной рост сечений **тяжелых векторных мезонов** описываются в рамках **пКХД**



# Фоторождение тяжелых векторных мезонов на протоне

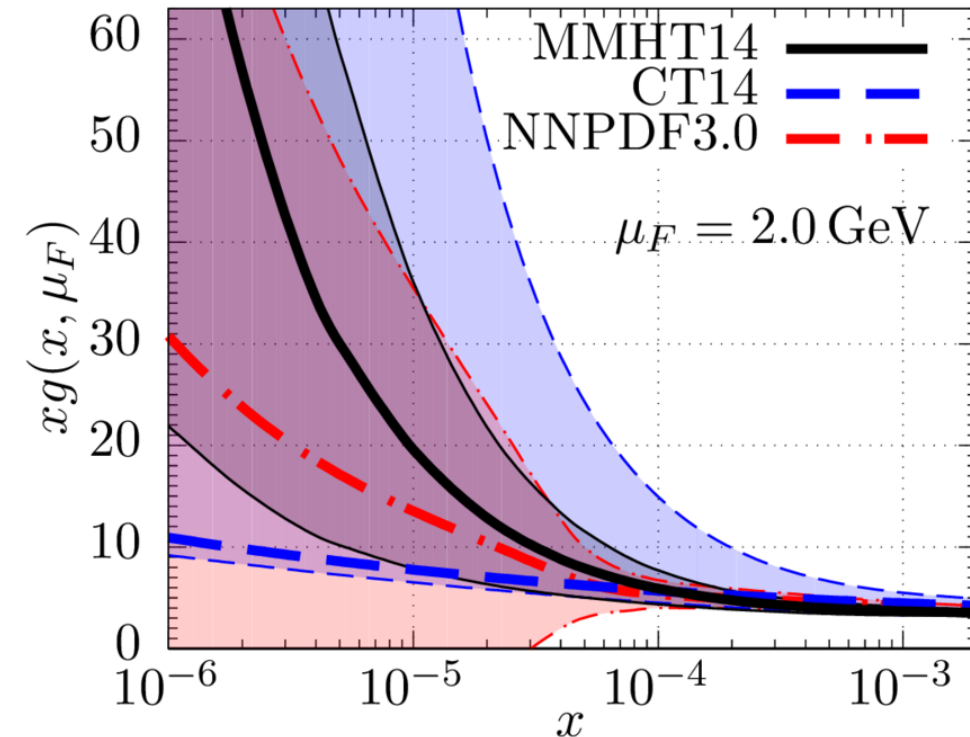
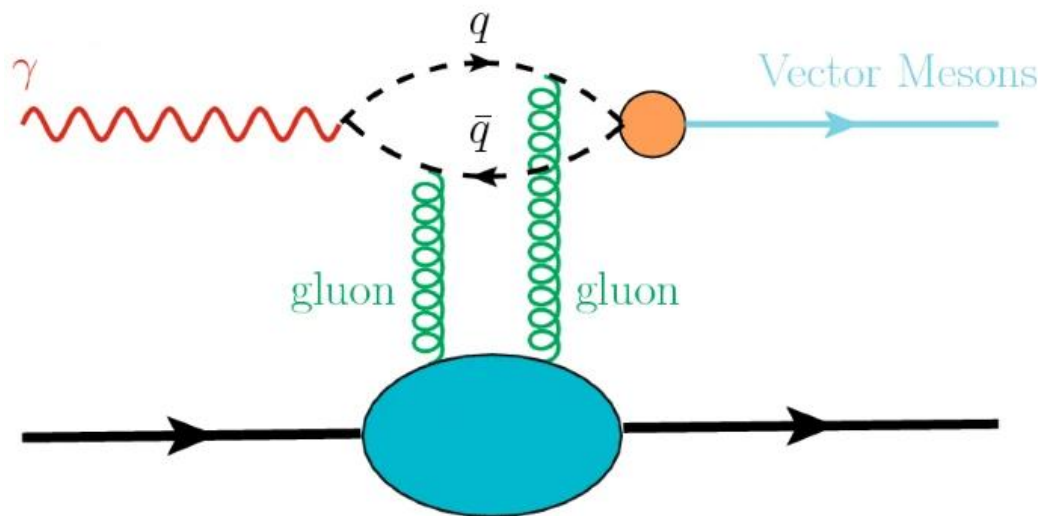
В LO сечение эксклюзивного фоторождения векторного мезона  $V$  пропорционально квадрату глюонной плотности:

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

$$\left. \frac{d\sigma_{\gamma p \rightarrow V p}(W_{\gamma p})}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\pi^3 \Gamma_{ee} m_V^3}{48 \alpha \mu^8} \alpha_s^2(\mu^2) [xg_p(x, \mu^2)]^2$$

Для  $J/\psi$ :

$$\mu^2 = \frac{1}{4} m_{J/\psi}^2 \sim 2.5 \text{ GeV}^2 \quad x = \frac{M_{J/\psi}^2}{W_{\gamma p}^2} \sim 10^{-2} - 10^{-5} \text{ на LHC}$$

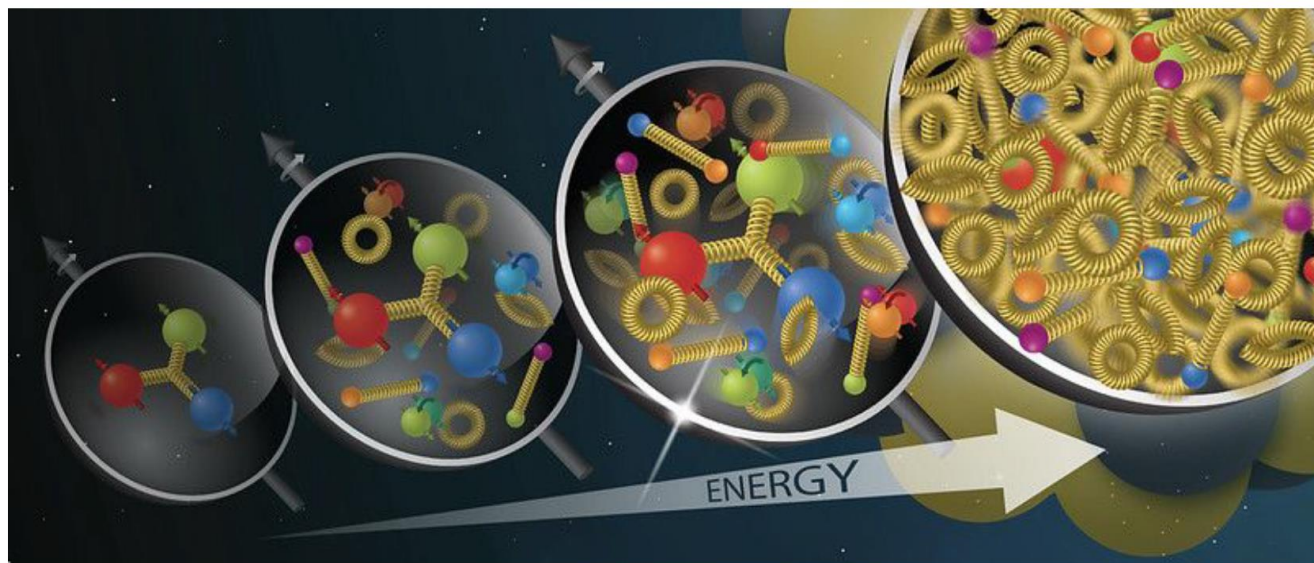


Oliveira, Martin, Ryskin, PRD 97(2018) 074021

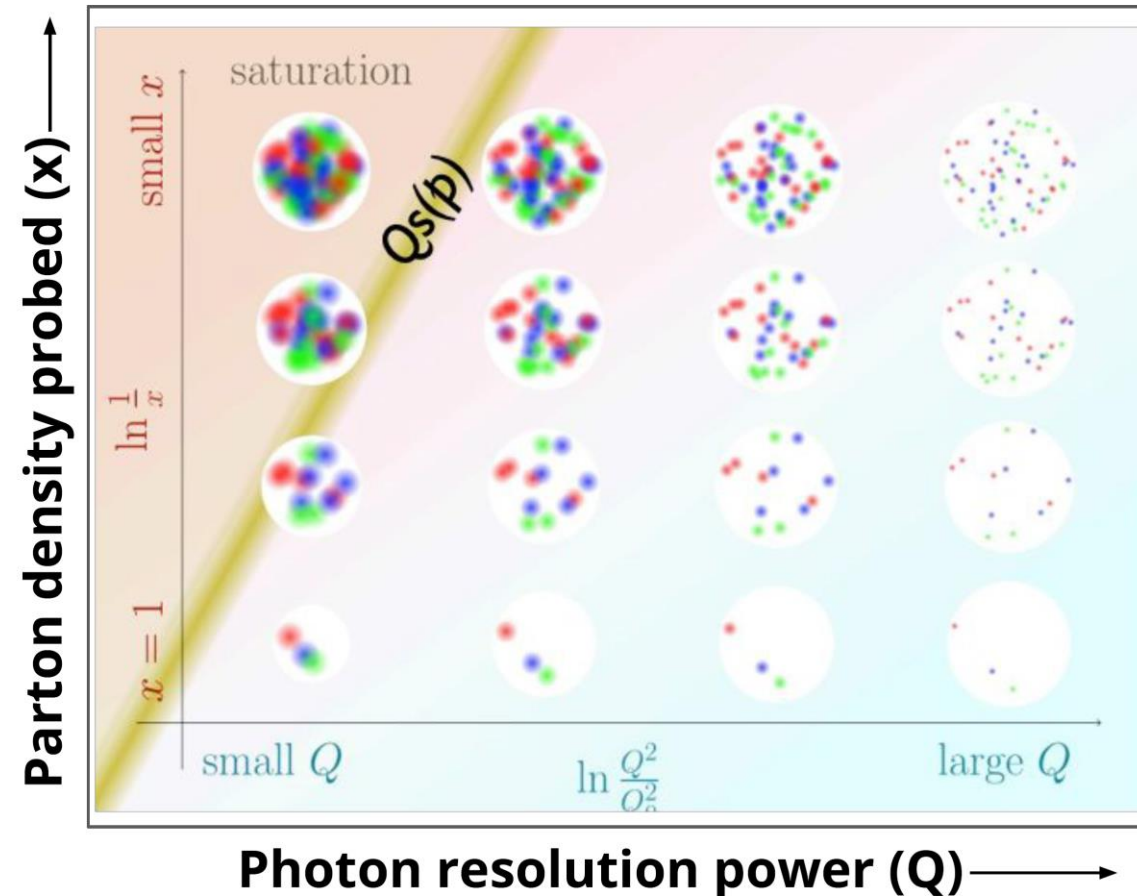
Фоторождение векторных мезонов можно использовать для получения ограничений на глюонные PDF при малых  $x$



# Насыщение глюонной плотности



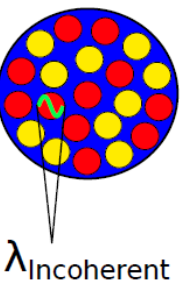
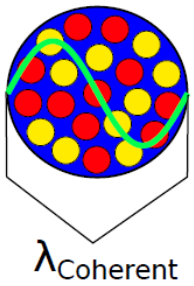
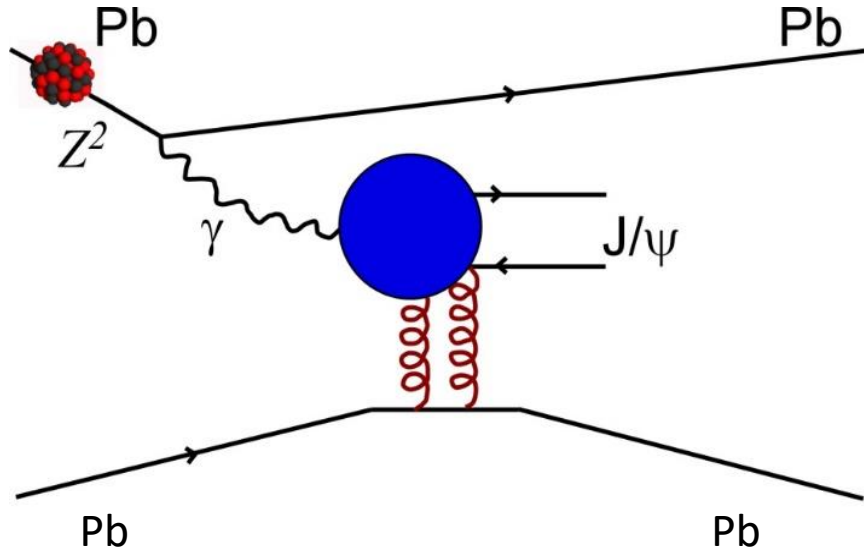
Smaller  $x$



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

→ замедление роста сечений фоторождения?

# Когерентное и некогерентное фоторождение на ядрах

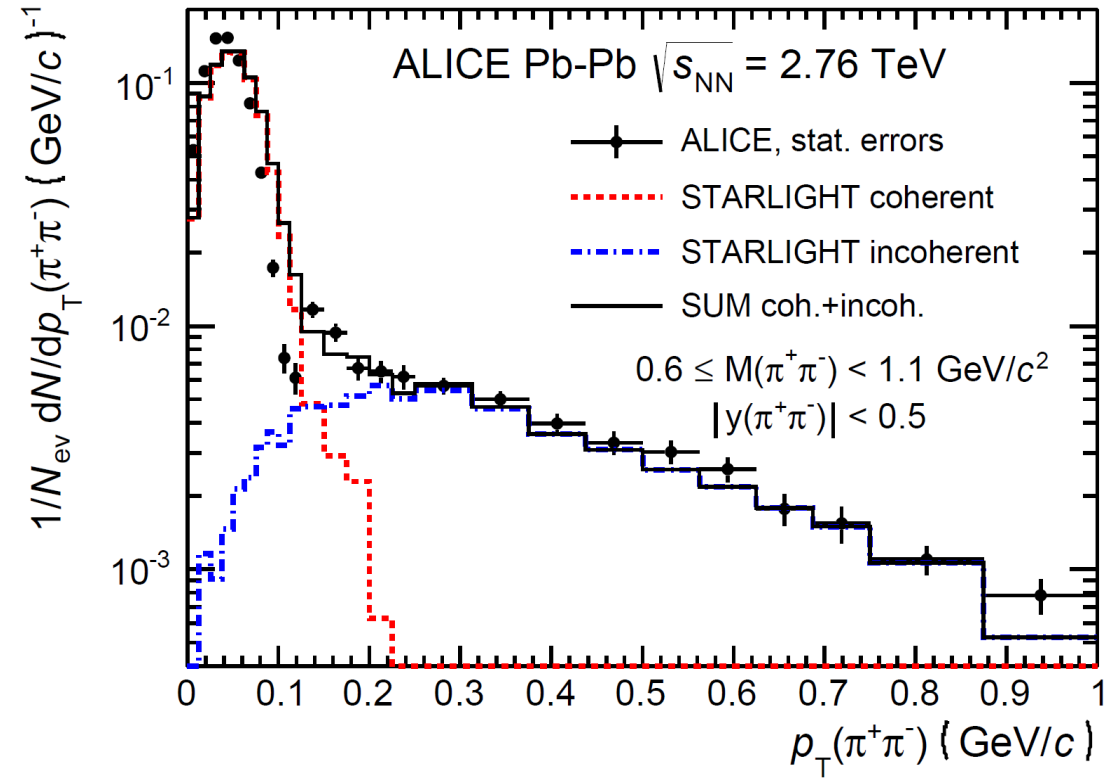


- **Когерентное:**

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

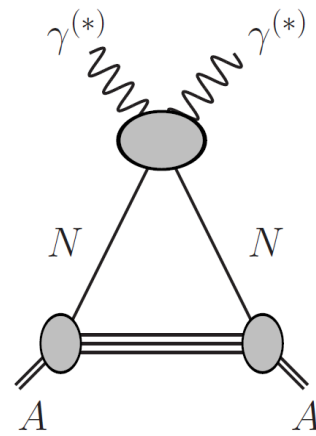
- **Некогерентное:**

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

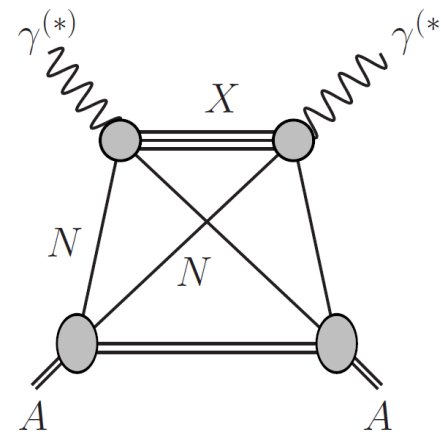


# Ядерные экранировки

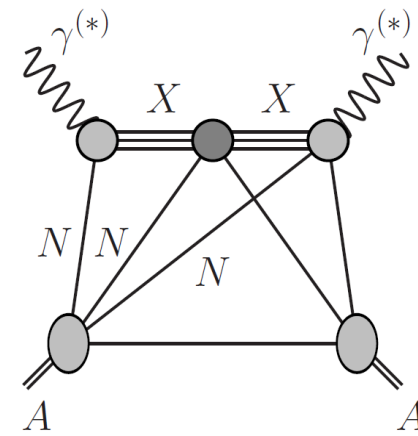
- **Ядерная экранировка** – подавление сечения на ядрах по сравнению с суммой сечений на нуклонах:  $\sigma_A < A \sigma_N$
- Объясняется **деструктивной интерференцией** амплитуд взаимодействия с одним, двумя ... нуклонами ядра: нуклоны на задней поверхности ядра испытывают поток, экранированный передними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



импульсное приближение

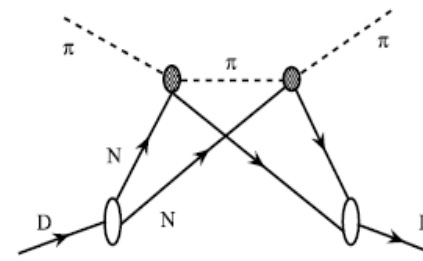
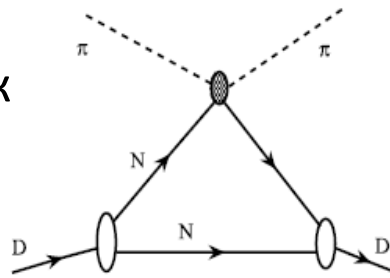


рассеяние на двух нуклонах



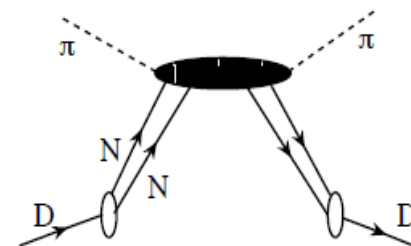
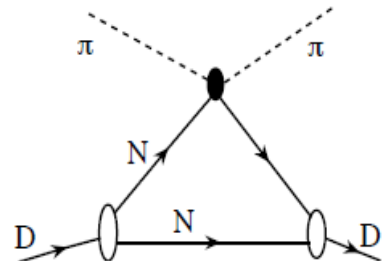
рассеяние на трех нуклонах

- **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



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

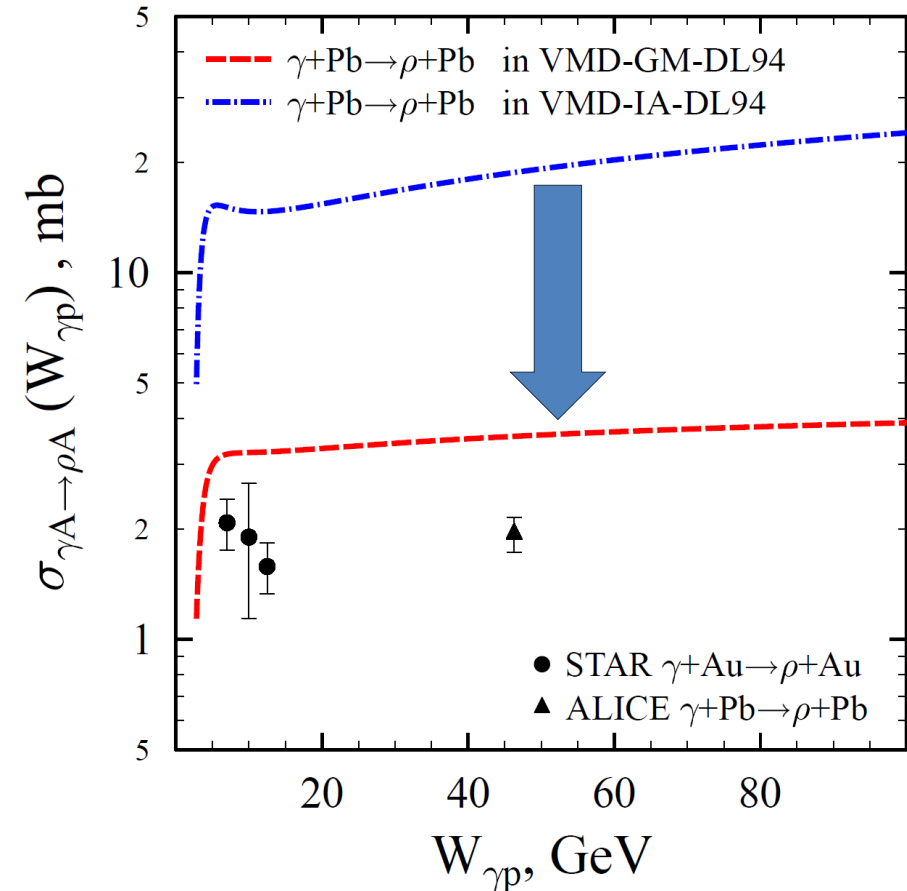
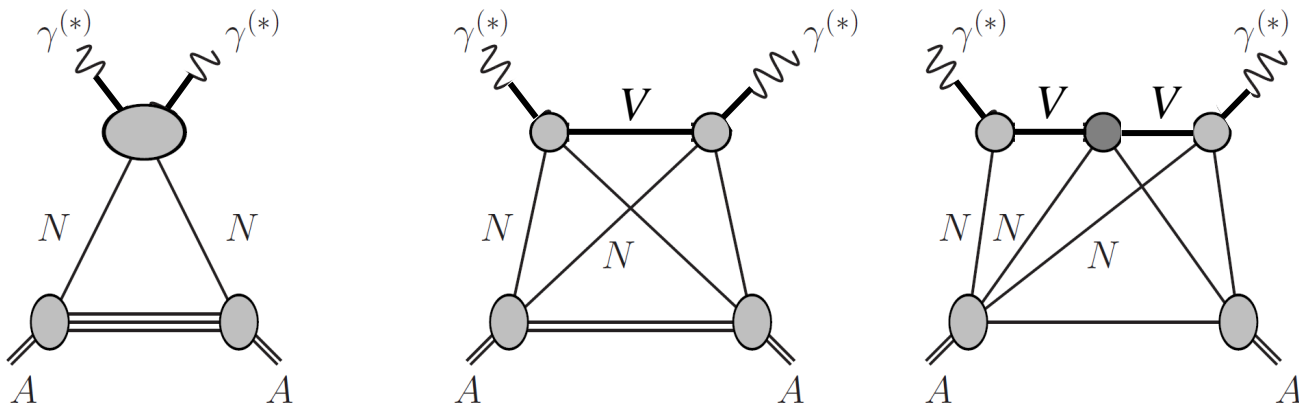


# Когерентное фоторождение легких векторных мезонов

- Сечение когерентного фоторождения легких векторных мезонов на ядрах можно рассчитать, комбинируя **формализм Глаубера с моделью векторной доминантности (VMD)** для перехода  $\gamma \rightarrow V$ :

$$\sigma_{\gamma A \rightarrow V A}^{\text{VMD}} = \left( \frac{e}{f_V} \right)^2 \int d^2 \vec{b} \left| 1 - e^{-\frac{1}{2} \sigma_{VN} T_A(b)} \right|^2$$

- В **простейшей модели** учитывается только **упругое перерассеяние** векторных мезонов (упругие экранировки)
- Модель Глаубера позволяет учесть **основной вклад** в экранировку, **подавляющий сечение в  $\sim 4$  раза**
- Упругих экранировок недостаточно** для описания данных по фоторождению  $\rho$ -мезонов на ядрах



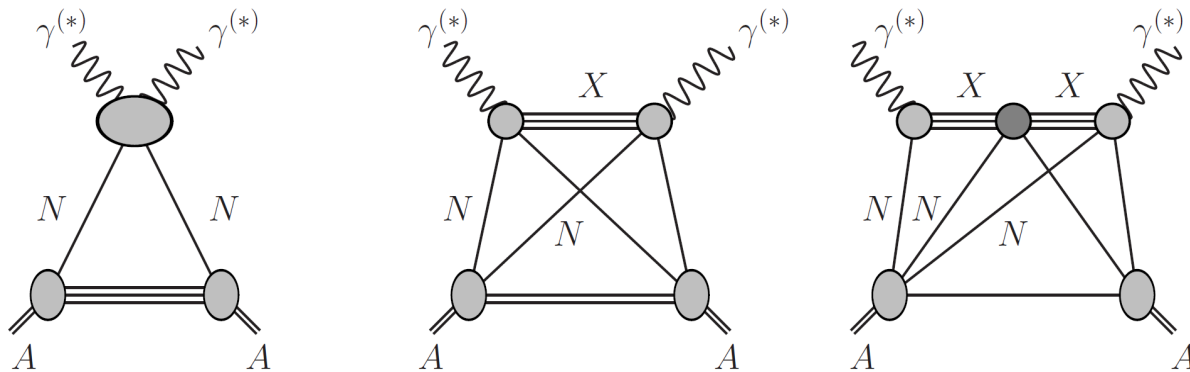
# Модель Грибова-Глаубера

- Эффект ядерной экранировки можно усилить учетом неупругих промежуточных состояний за счет **дифракционной диссоциации фотона в большие массы (Грибовские экранировки)**:

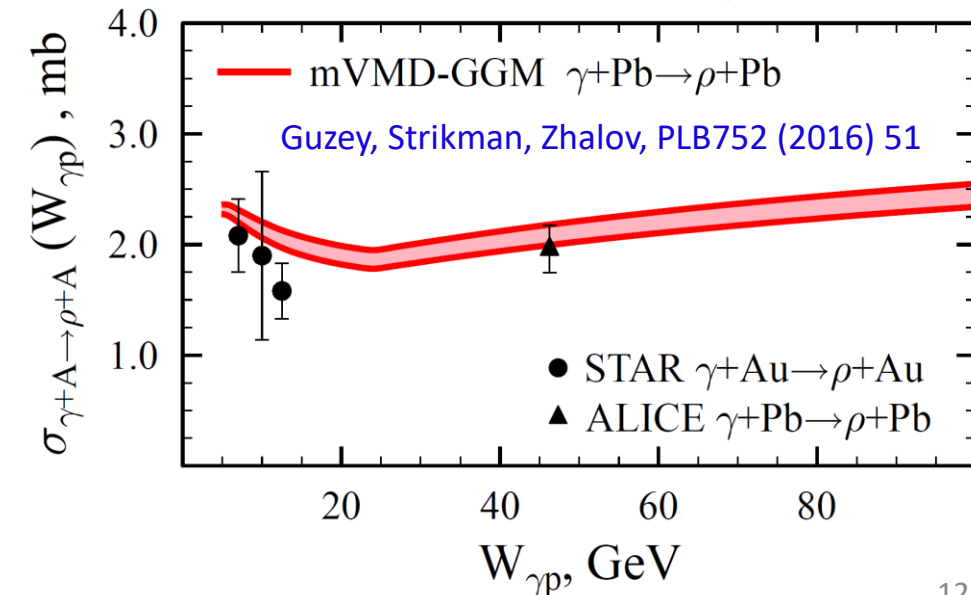
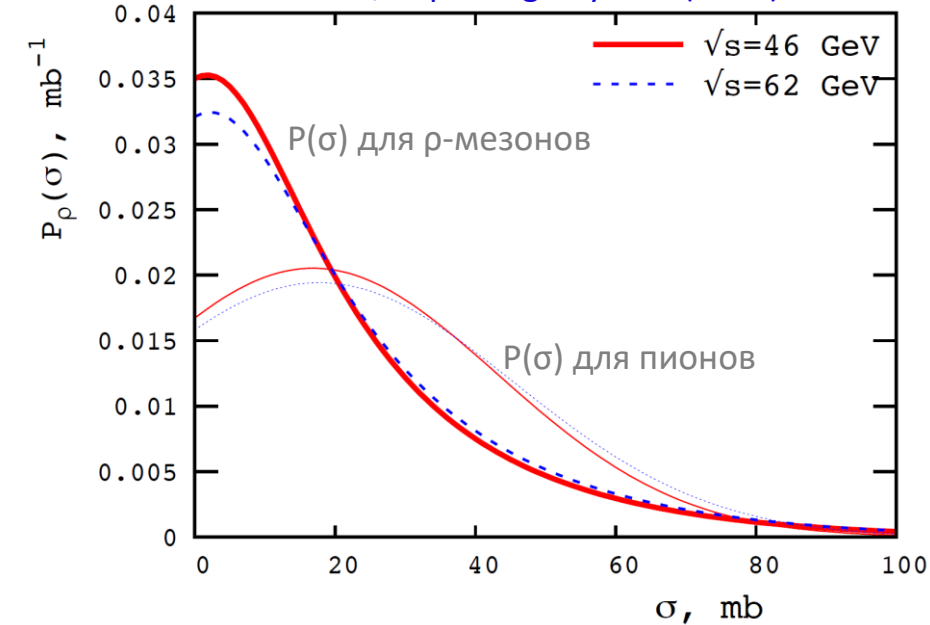
$$\sigma_{\gamma A \rightarrow VA}^{\text{mVMD-GGM}} = \left( \frac{e}{f_V} \right)^2 \int d^2\vec{b} \left| \int d\sigma P_V(\sigma) \left( 1 - e^{-\frac{\sigma}{2} T_A(b)} \right) \right|^2$$

- $P_V(\sigma)$  - **плотность вероятности** флуктуации фотона в адронное состояние, взаимодействующее с нуклонами с эффективным сечением  $\sigma$ .

- Согласие с данными** STAR в Au-Au и ALICE в Pb-Pb @ 2.76 ТэВ



Frankfurt et al, Rept.Prog.Phys. 85 (2022) 126301



# Фоторождение тяжелых векторных мезонов на ядрах

- Сечение фоторождения пропорционально квадрату глюонной плотности в ядрах:

$$\left. \frac{d\sigma_{\gamma A \rightarrow VA}(W_{\gamma p})}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\pi^3 \Gamma_{ee} m_V^3}{48 \alpha \mu^8} \alpha_s^2(\mu^2) [x g_A(x, \mu^2)]^2$$

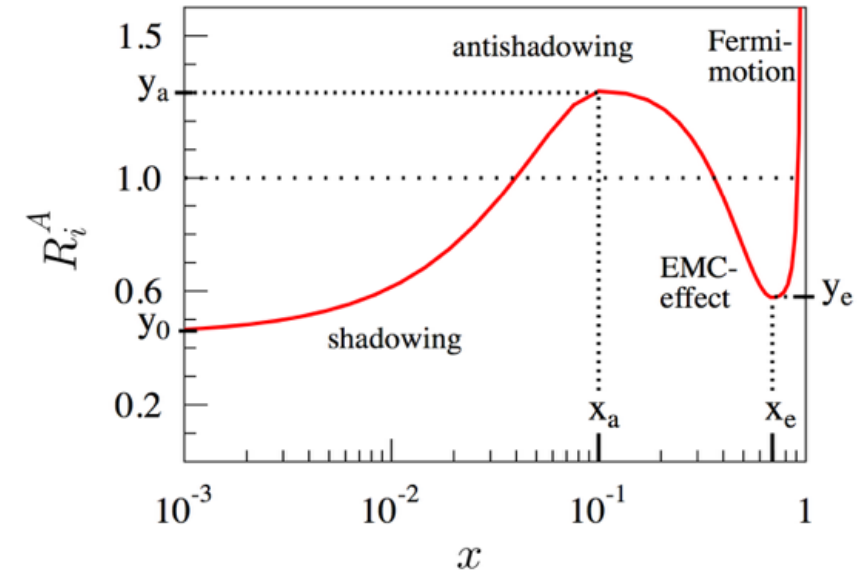
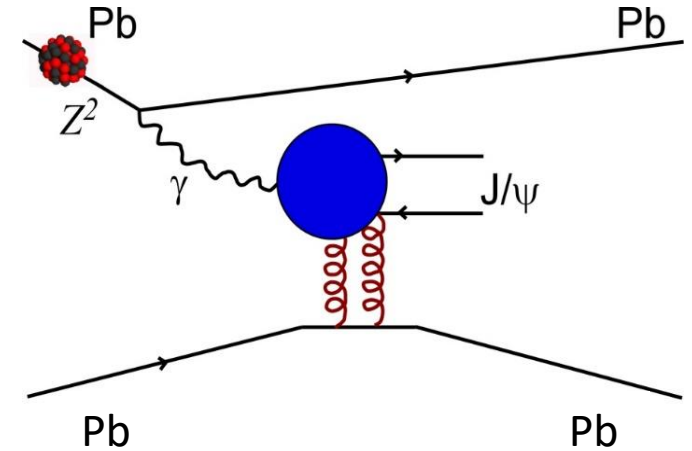
- Чувствительно к поведению глюонных экранировок в ядрах при малых  $x$ :

$$R_g(x, \mu^2) = \frac{g_A(x, \mu^2)}{A g_p(x, \mu^2)}$$

- Сечение на ядре можно выразить через сечение фоторождения на протоне и фактор глюонных экранировок:

$$\sigma_{\gamma A \rightarrow VA}(W_{\gamma p}) = \left. \frac{d\sigma_{\gamma p \rightarrow Vp}(W_{\gamma p})}{dt} \right|_{t=0} R_g^2(x, \mu^2) \Phi_A(t_{\min})$$

$$\Phi_A(t_{\min}) = \int_{-\infty}^{t_{\min}} dt |F_A(t)|^2$$



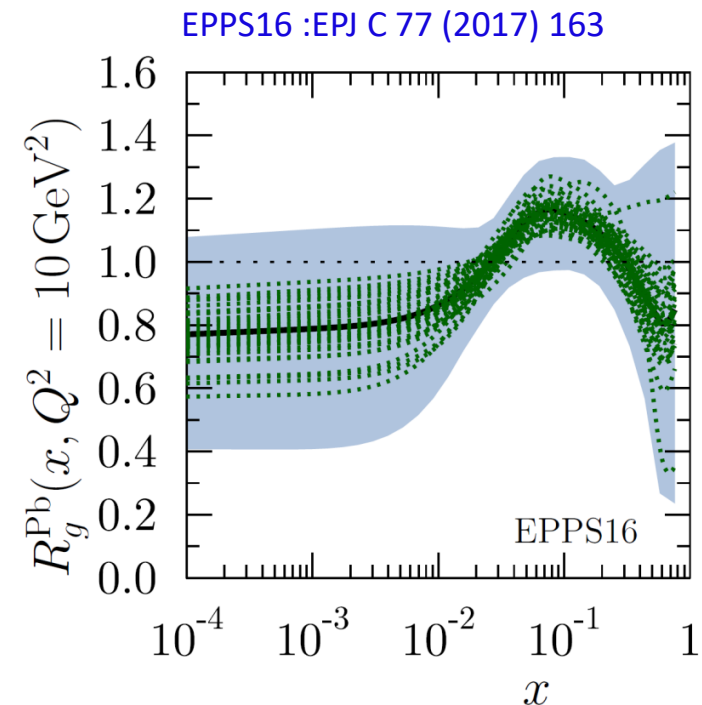
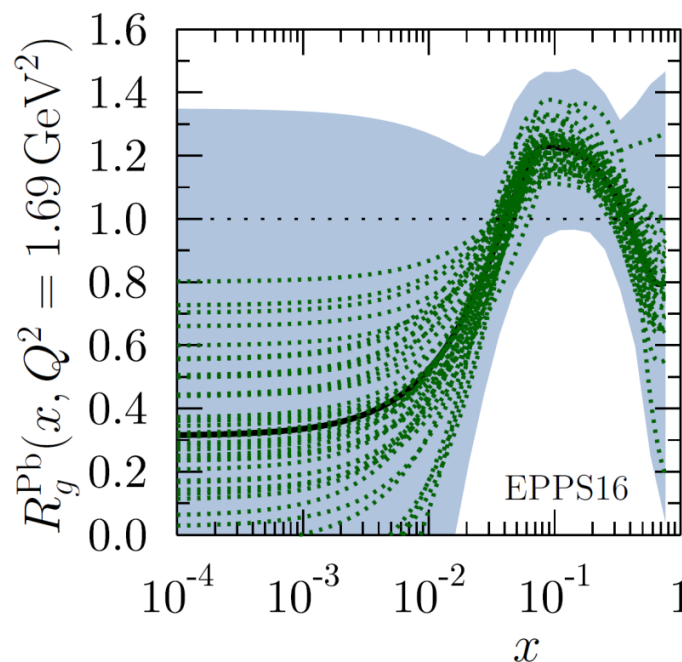
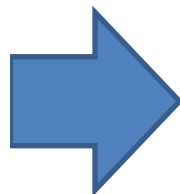
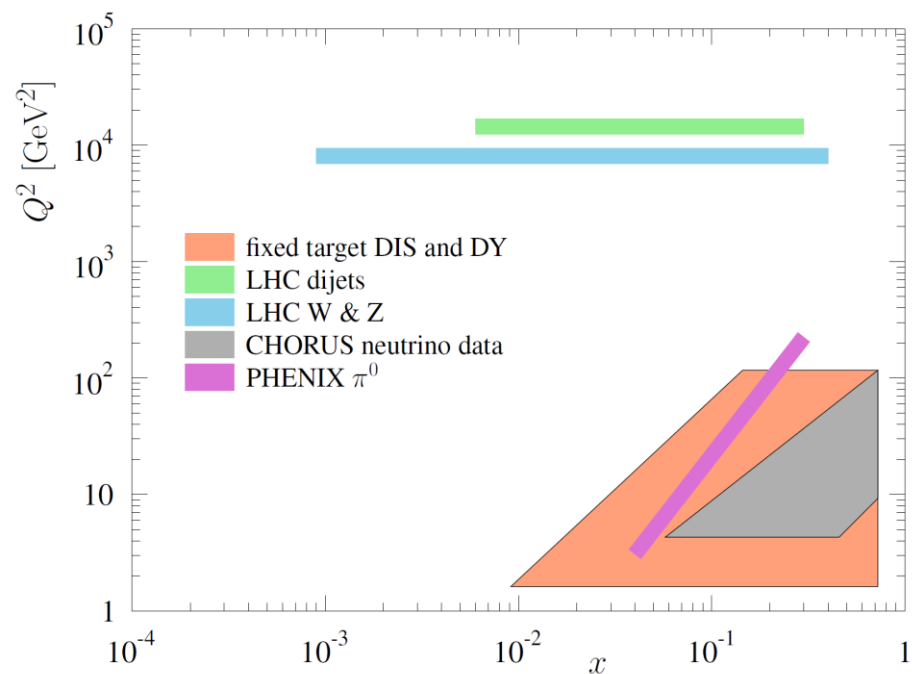


# Партонные плотности в ядрах (nPDFs)

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

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

## 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

# Актуальность

---

- Измерения сечений фоторождения тяжелых векторных мезонов позволяют исследовать **поведение глюонной плотности и ядерных экранировок** в области малых бьеркеновских  $x$
- Измерение сечений фоторождения легких векторных мезонов позволяют исследовать **роль грибовских экранировок в непертурбативном режиме**

# Цель и задачи работы

Цель: исследование фоторождения векторных мезонов в ультрапериферических столкновениях, которое включает как проведение теоретических расчетов, так и экспериментальные измерения на установке ALICE на БАК

Задачи:

- Расчет сечений фоторождения тяжелых векторных мезонов в приближении лидирующих твистов в ультрапериферических Pb-Pb столкновениях при энергии 5.02 ТэВ.
- Расчет сечений фоторождения легких векторных мезонов в подходе Грибова-Глаубера в ультрапериферических Pb-Pb столкновениях при энергии 5.02 ТэВ и в Xe-Xe столкновениях при энергии 5.44 ТэВ.
- Разработка триггерной стратегии для набора данных в ультрапериферических столкновениях в эксперименте ALICE.
- Измерение энергетической зависимости сечений эксклюзивного рождения  $J/\psi$  в ультрапериферических p-Pb столкновениях при энергиях 5.02 и 8.16 ТэВ в эксперименте ALICE.
- Измерение сечений рождения  $J/\psi$  и  $\psi(2S)$  мезонов в ультрапериферических Pb-Pb столкновениях при энергии 5.02 ТэВ.
- Извлечение энергетической зависимости сечений когерентного фоторождения  $J/\psi$  мезонов и фактора ядерного подавления из сечений, измеренных в УПС, сопровождающихся диссоциацией одного или обоих сталкивающихся ядер.
- Измерение сечений когерентного рождения  $\rho$ -мезонов в центральной области быстрот в ультрапериферических Pb-Pb столкновениях при энергии 5.02 ТэВ и в Xe-Xe столкновениях при энергии 5.44 ТэВ. Исследование A-зависимости измеренных сечений.
- Изучение возможностей исследования фотон-протонных, фотон-ядерных и фотон-фотонных взаимодействий в эксперименте ALICE в будущих сеансах работы Большого Адронного Коллайдера.



# Содержание диссертации

---

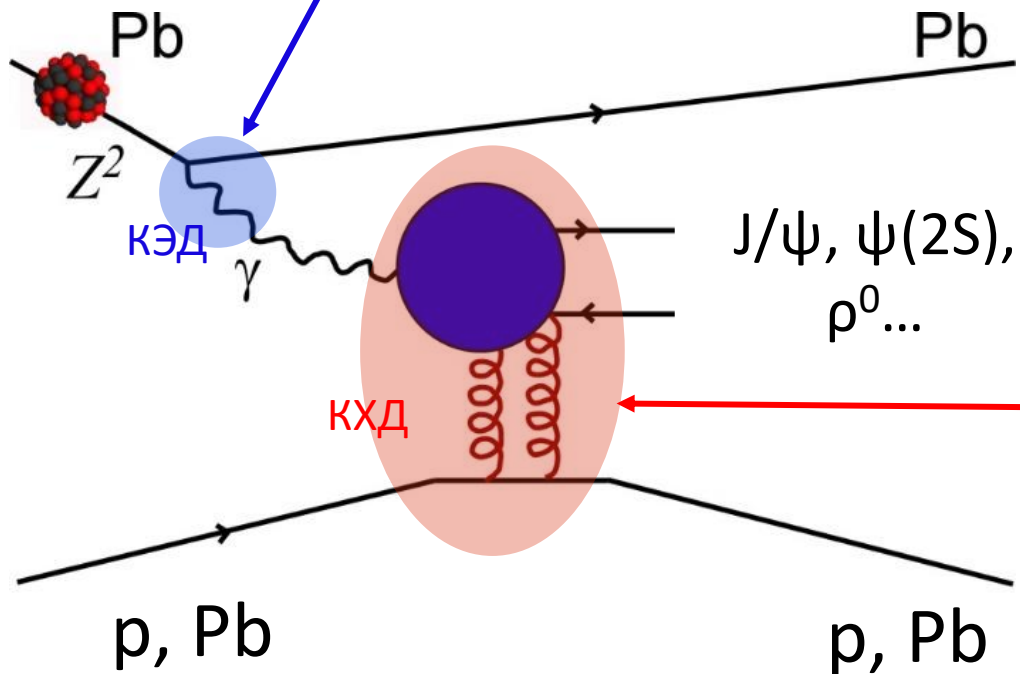
## Введение

1. **Расчет сечений** фоторождения векторных мезонов в ультрапериферических столкновениях
2. **Методика исследования** ультрапериферических столкновений в эксперименте ALICE
3. Измерения сечений **фоторождения  $J/\psi$**  в ультрапериферических **p-Pb** столкновениях
4. Измерения сечений **фоторождения  $J/\psi$  и  $\psi(2S)$ -мезонов** в ультрапериферических **Pb-Pb** столкновениях
5. Измерения сечений **фоторождения  $\rho^0$ -мезонов** в ультрапериферических **Pb-Pb** и **Xe-Xe** столкновениях
6. **Перспективы** изучения фотон-ядерных и фотон-фотонных столкновений на БАК

## Заключение

# Глава 1: Расчет сечений

$$n_\gamma(\omega, b) = \frac{Z^2 \alpha}{\pi^2} \frac{\zeta^2}{b^2} \left[ K_1^2(\zeta) + \frac{1}{\gamma_L^2} K_0^2(\zeta) \right]$$



Модель Грибова-Глаубера для легких векторных мезонов:

$$\sigma_{\gamma A \rightarrow V A}^{\text{mVMD-GGM}} = \left( \frac{e}{f_V} \right)^2 \int d^2 \vec{b} \left| \int d\sigma P_V(\sigma) (1 - e^{-\frac{\sigma}{2} T_A(b)}) \right|^2$$

Пертурбативная КХД для тяжелых векторных мезонов:

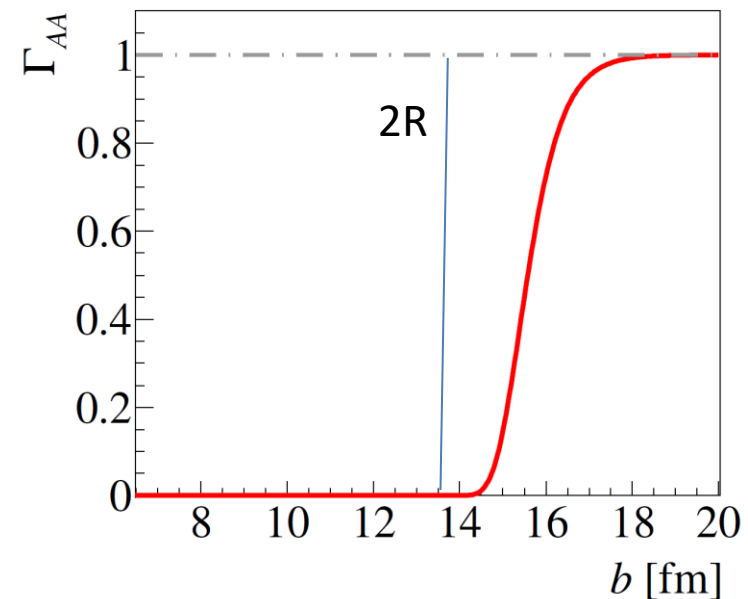
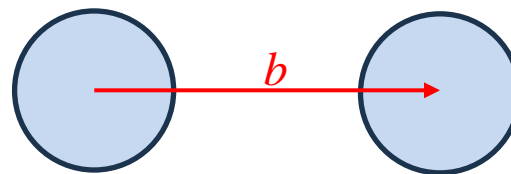
$$\sigma_{\gamma A \rightarrow V A}(W_{\gamma p}) = \frac{d\sigma_{\gamma p \rightarrow V p}(W_{\gamma p})}{dt} \Big|_{t=0} R_g^2(x, \mu^2) \Phi_A(t_{\min})$$

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

# Расчет потока фотонов

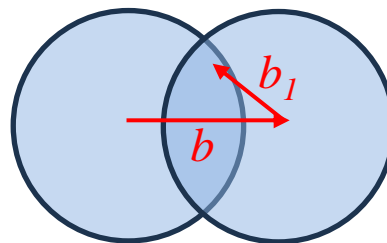
- Поток фотонов в зависимости от энергии  $\omega$ :

$$n_\gamma(\omega) = \int d^2\vec{b} \Gamma_{AA}(b) n_\gamma(\omega, b)$$



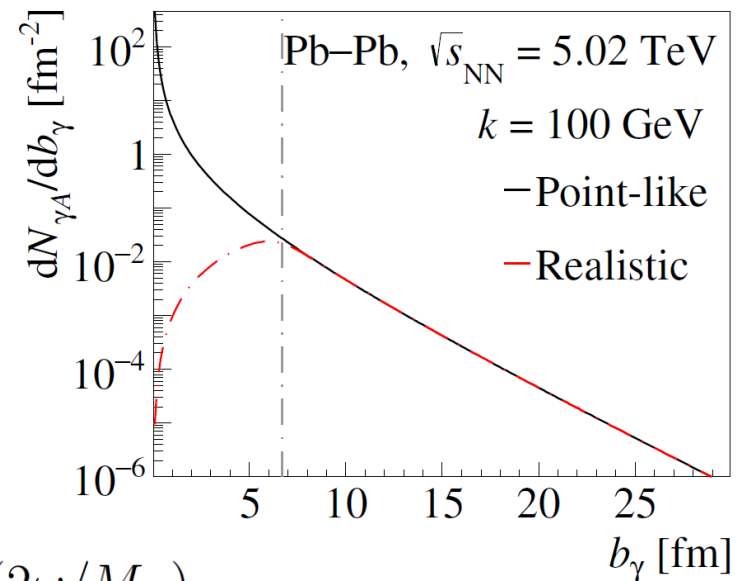
- Вероятность подавления адронных взаимодействий:

$$\Gamma_{AA}(b) = \exp\left(-\sigma_{NN}^{\text{tot}} \int d^2\vec{b}_1 T_A(\vec{b}_1) T_A(\vec{b} - \vec{b}_1)\right)$$



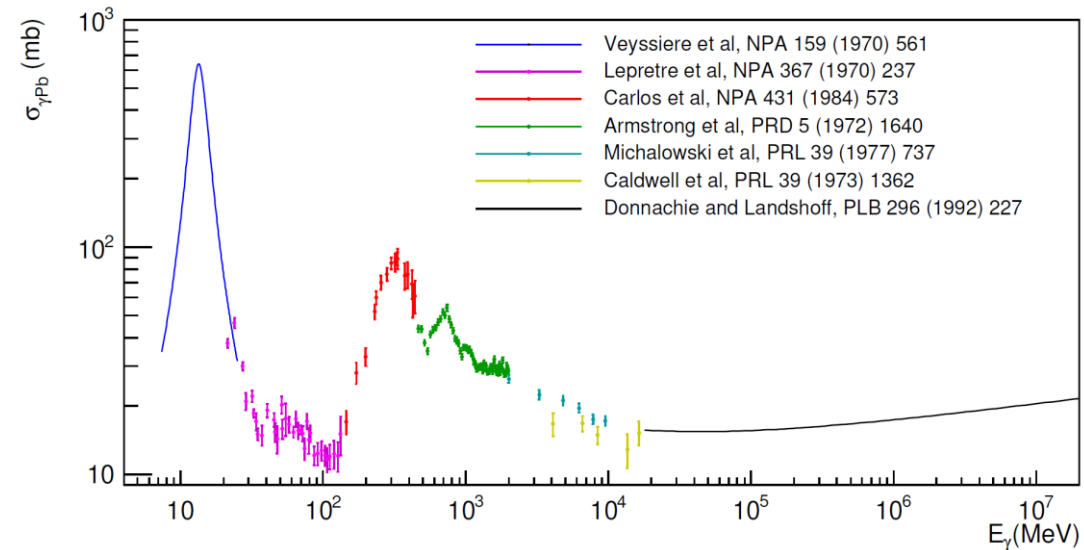
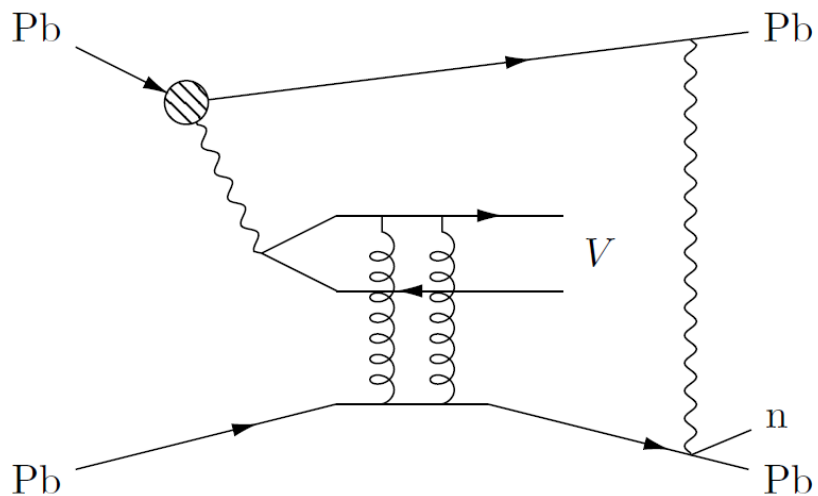
- Зависимость потока фотонов от прицельного параметра:

$$n_\gamma(\omega, b) = \frac{Z^2 \alpha}{\pi^2} \frac{\zeta^2}{b^2} \left[ K_1^2(\zeta) + \frac{1}{\gamma_L^2} K_0^2(\zeta) \right] \quad \zeta = \frac{b\omega}{\gamma_L}$$

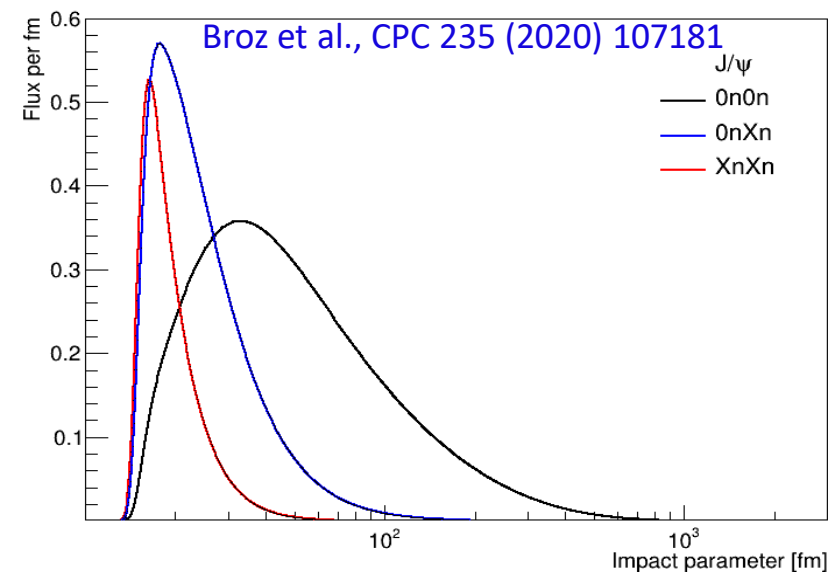


$$y = \ln(2\omega/M_V)$$

# Обмен дополнительными фотонами

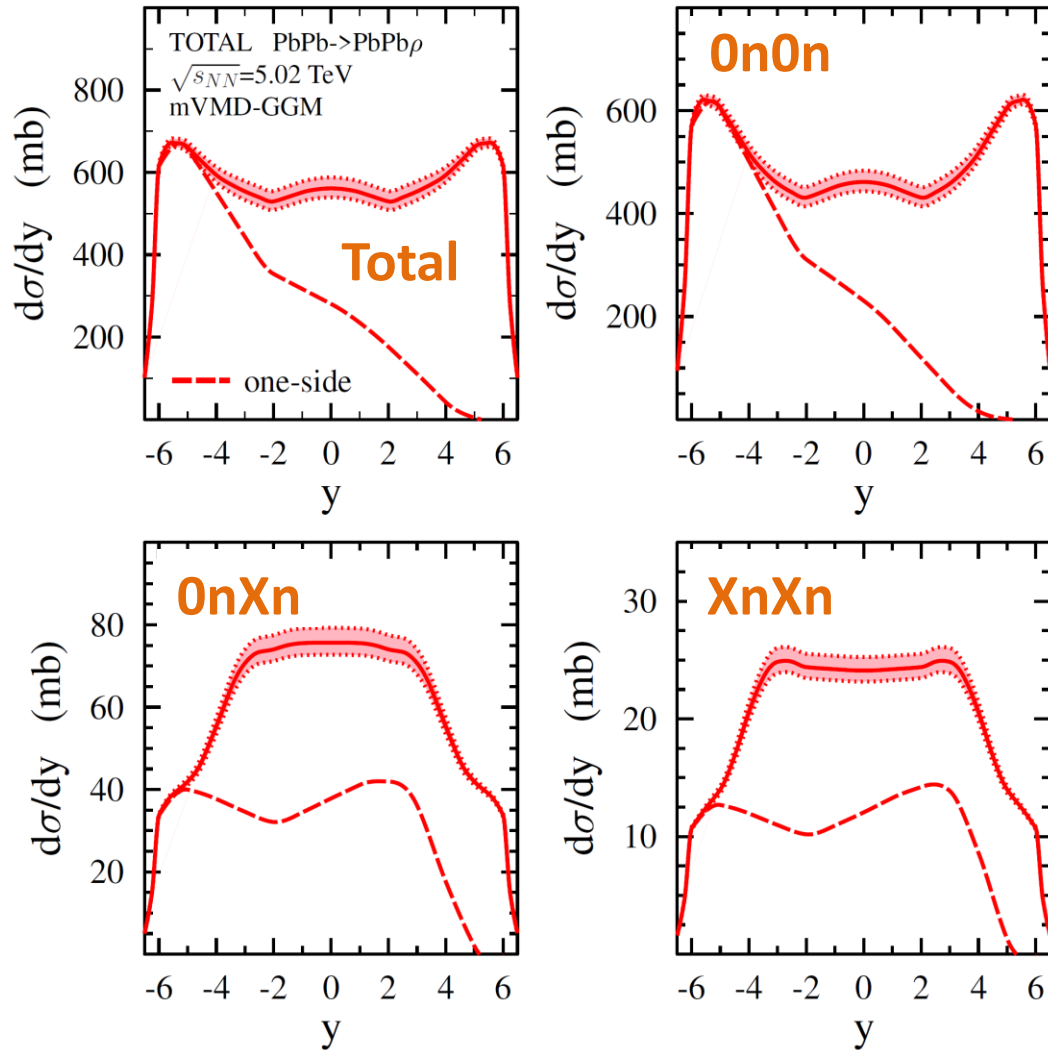


- Фоторождение векторных мезонов может сопровождаться дополнительным обменом фотонами и диссоциацией (одного из) ядер с испусканием нейтронов
- Эксперимент:
  - $0n0n$  – отсутствие нейтронов с обеих сторон (~80%)
  - $0nXn$  – регистрация нейтронов с одной из сторон
  - $XnXn$  – регистрация нейтронов с обеих сторон
- Вероятность диссоциации можно рассчитать, зная энергетическую зависимость фотоядерного сечения  $\sigma_{\gamma Pb}$

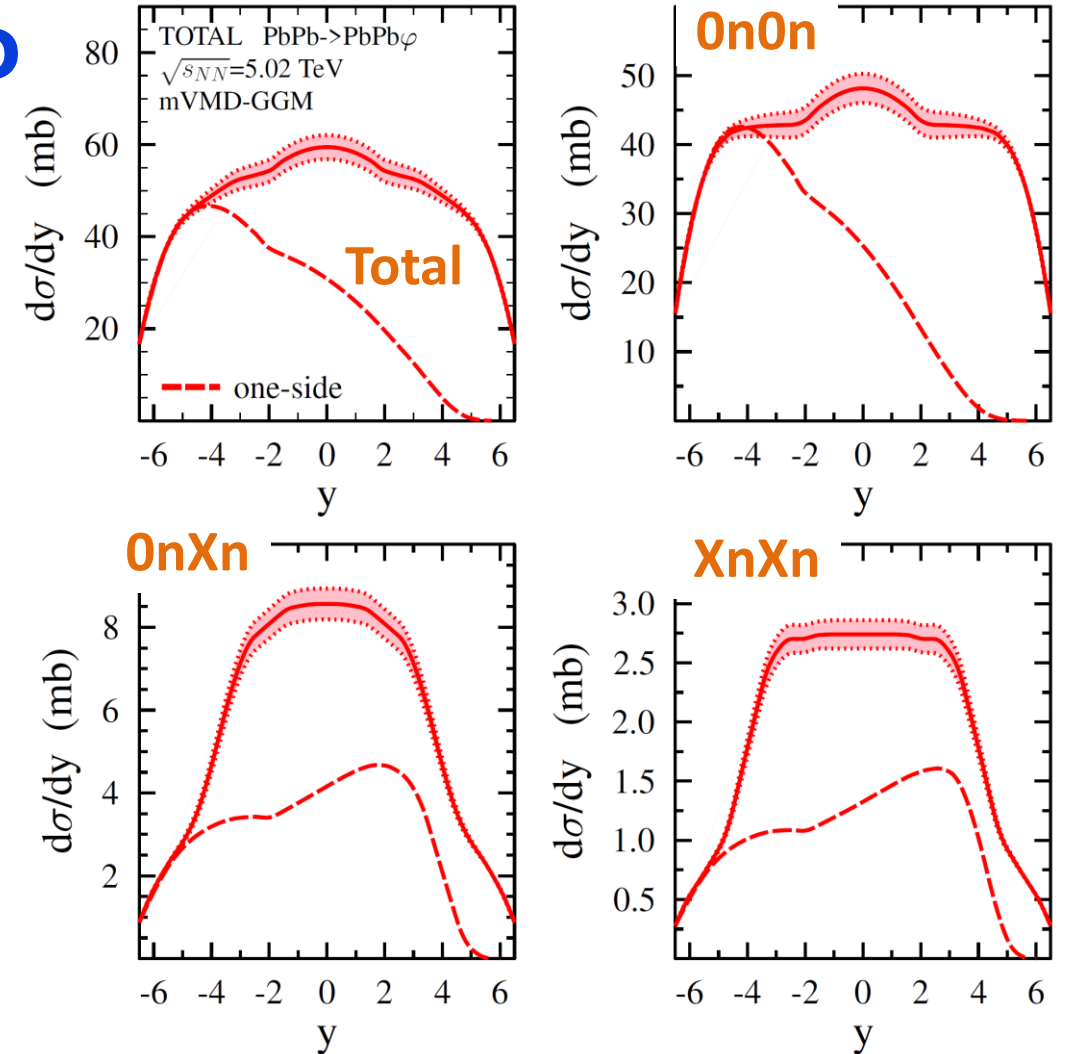


# Предсказания для $\rho$ и $\phi$ в модели Грибова-Глаубера

$\rho$



$\phi$

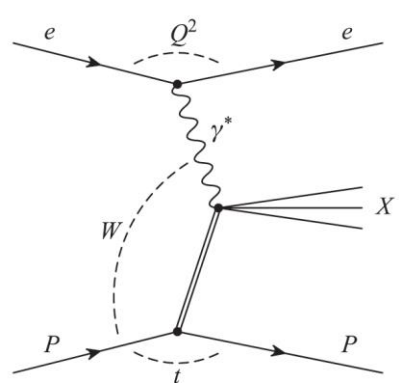
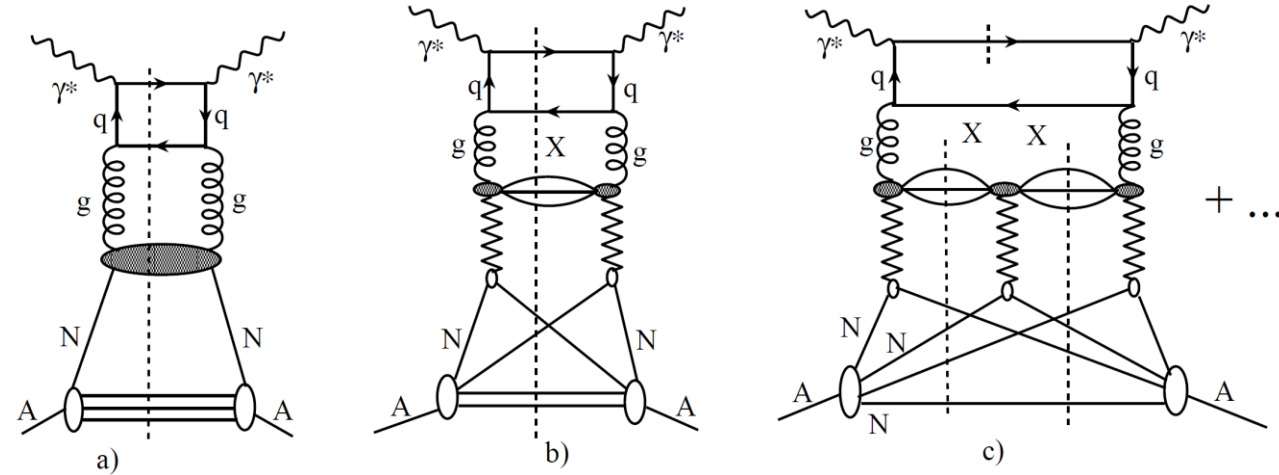


- Расчеты сечений когерентного рождения  $\rho$  и  $\phi$ -мезонов в Pb-Pb UPC @5.02 TeV: [Guzey, Kryshen, Zhalov, PRC 93 \(2016\) 055206](#)
- Расчеты сечений когерентного рождения  $\rho$  и  $\phi$ -мезонов в Xe-Xe UPC @5.44 TeV: [Guzey, Kryshen, Zhalov, PLB 782 \(2018\) 251](#)
- Расчеты некогерентных сечений: [Guzey, Kryshen, Zhalov, PRC102 \(2020\) 015208](#)

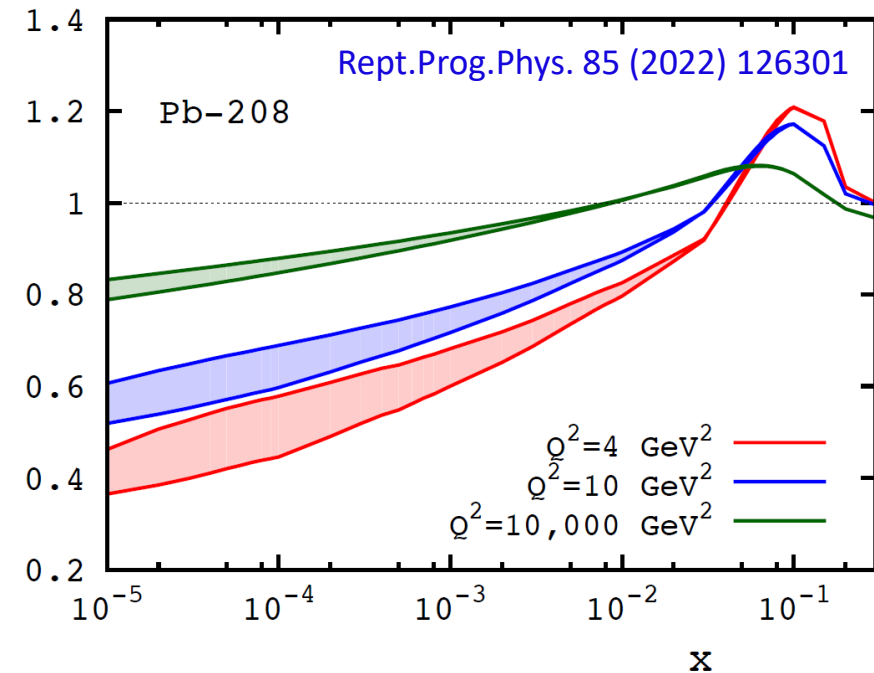


# Расчет nPDF в приближении лидирующих твистов

LTA (Leading twist approximation) – обобщение модели Грибова-Глаубера на партонный уровень  
 Frankfurt, Strikman, EPJ A5 (1999) 293



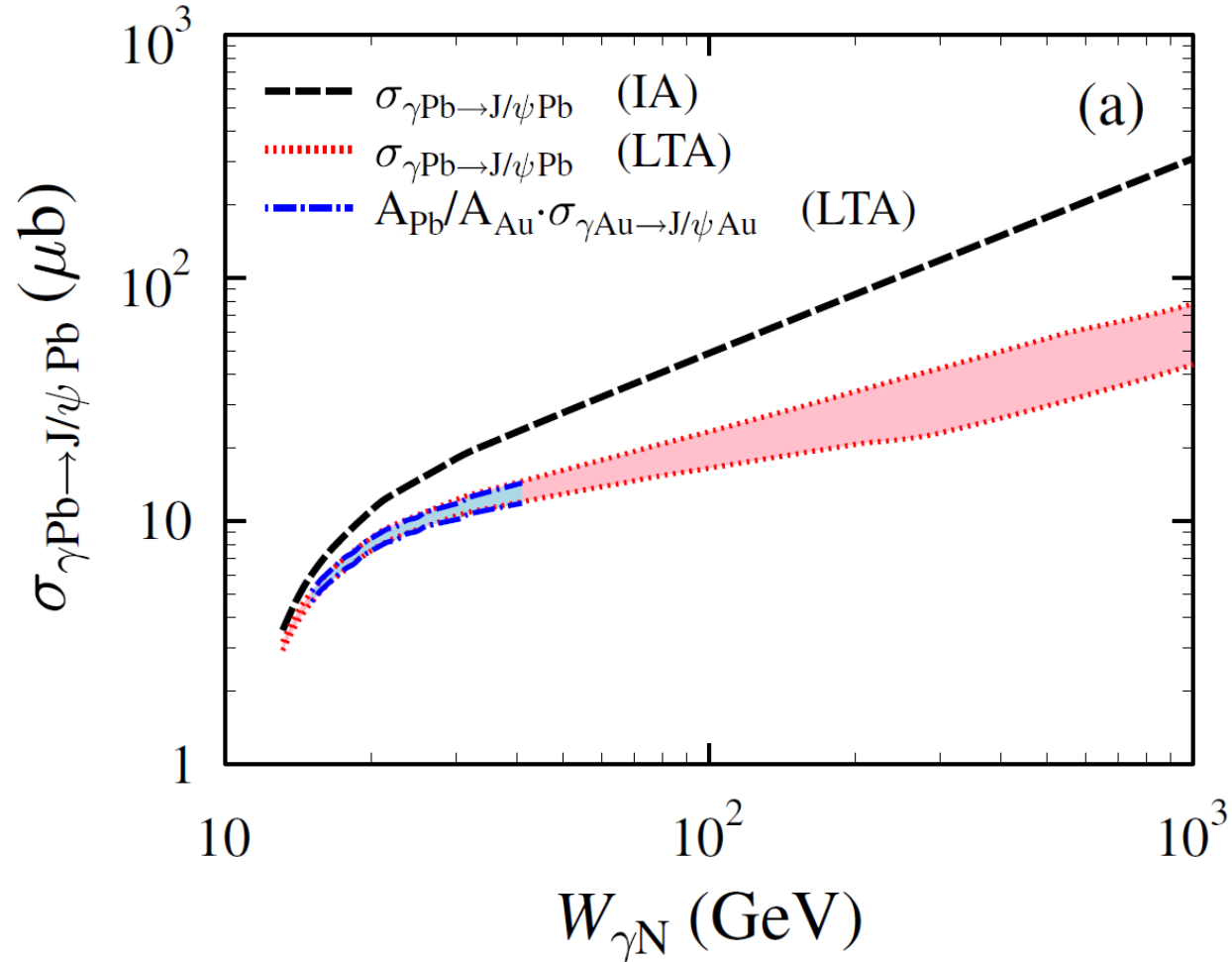
- основано на идее Грибова о связи ядерных экранировок и дифракции
- В расчетах используются дифракционные партонные распределения, измеренные на HERA
- Работают уравнения эволюции DGLAP



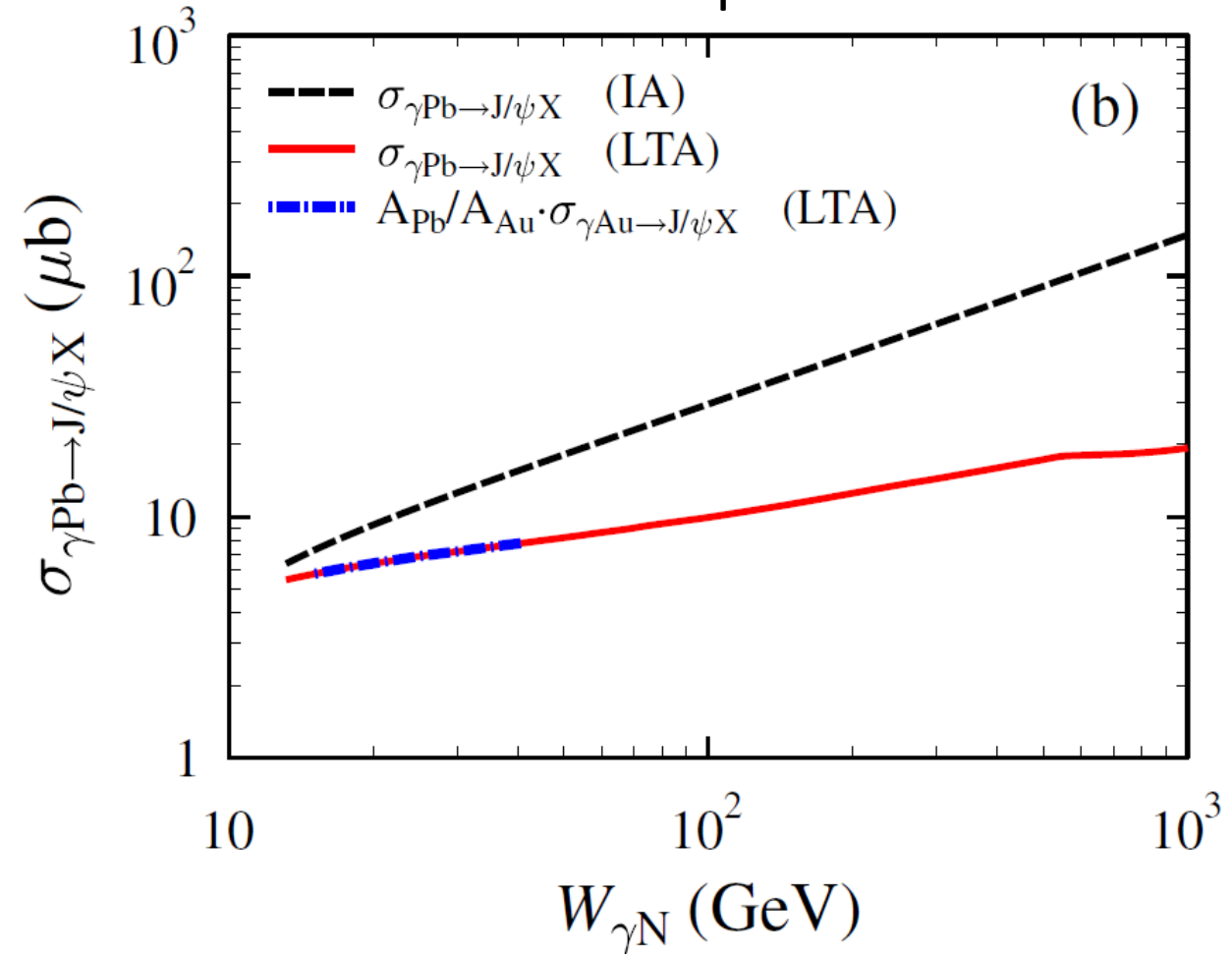
# Предсказания для сечения фоторождения $J/\psi$ в LTA

Kryshen, Strikman, Zhilov, PRC 108 (2023), 024904

когерентное

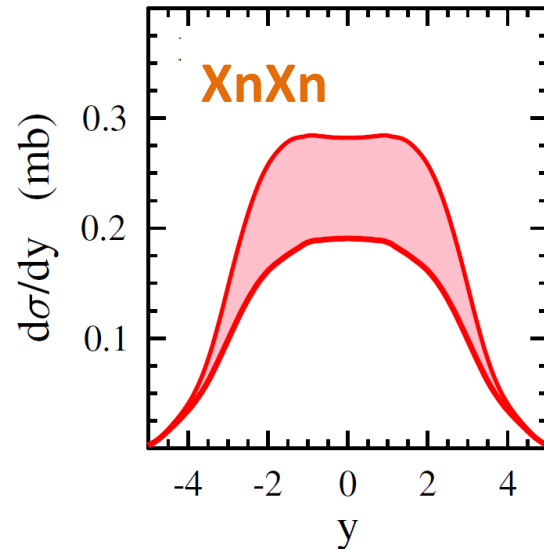
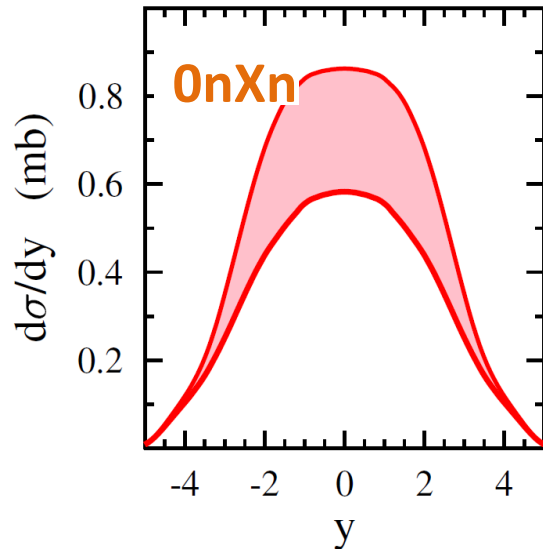
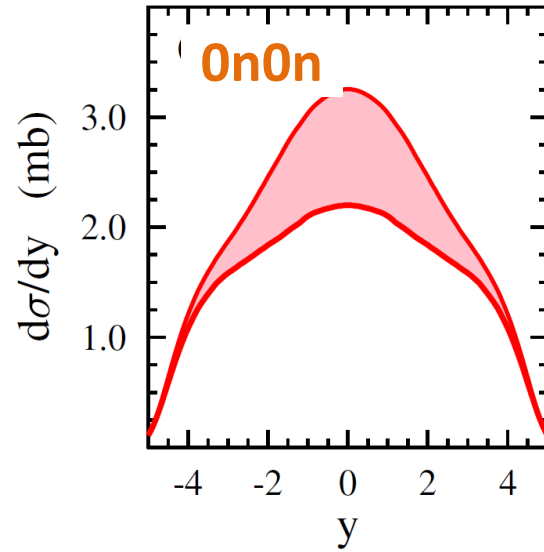
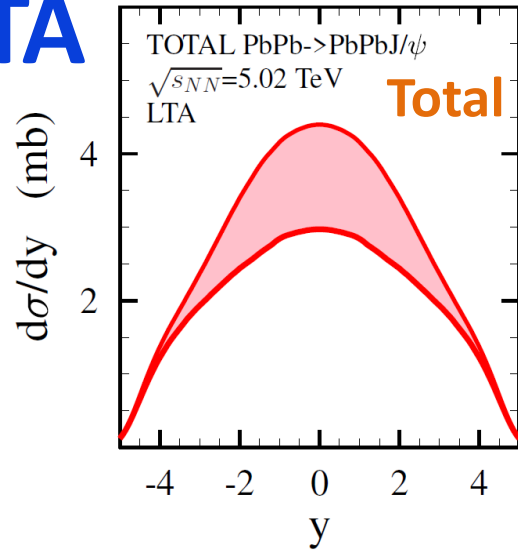


некогерентное

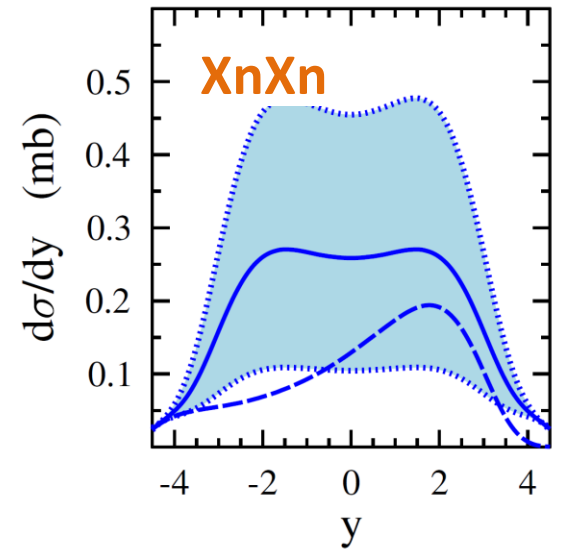
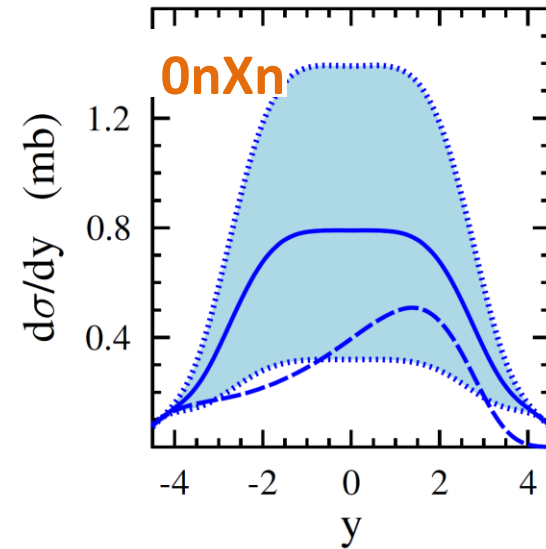
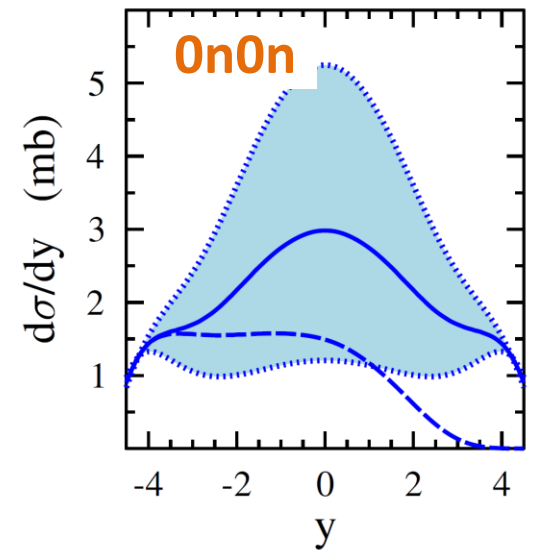
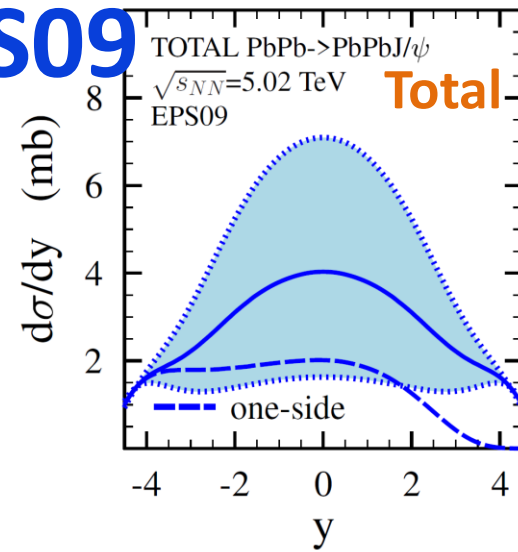


# Зависимость когерентных сечений J/ψ от быстроты

LTA

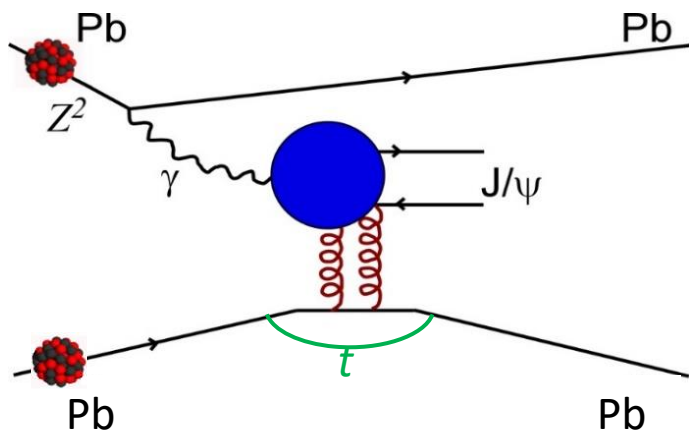


EPS09

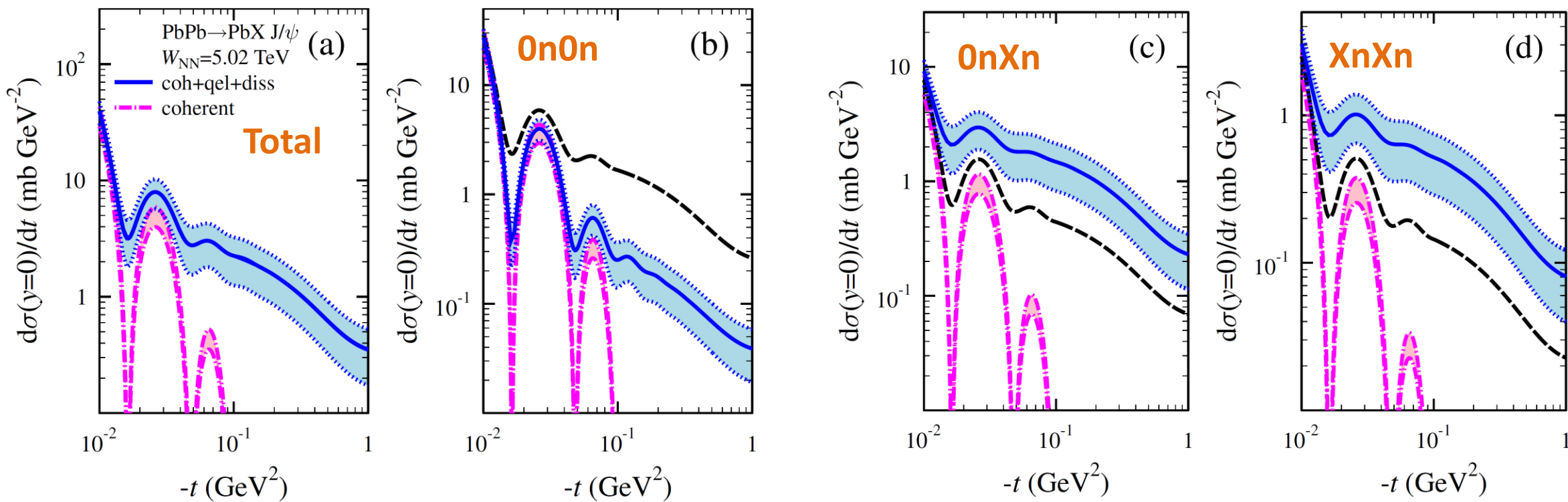


- Доля 0n0n  $\sim$  80%
- Предсказания для  $\psi(2S)$  и  $\Upsilon(1S)$  в приложении

# $t$ -зависимость сечений фоторождения $J/\psi$



Kryshen, Strikman, Zhalov, PRC108 (2023) 024904





A woman with her hair in a bun, wearing a white short-sleeved top with a dark back and a dark red skirt with a white frill, stands with her back to the camera. She is in a futuristic, circular control room filled with numerous glowing monitors and screens. The room is dimly lit with a strong blue and cyan glow emanating from a large circular opening in the background. The overall atmosphere is high-tech and mysterious.

# Глава 2

## Эксперимент ALICE\*



# Эксперимент ALICE

Покрытие по быстроте:

$$-3.7 < \eta < 5.1$$

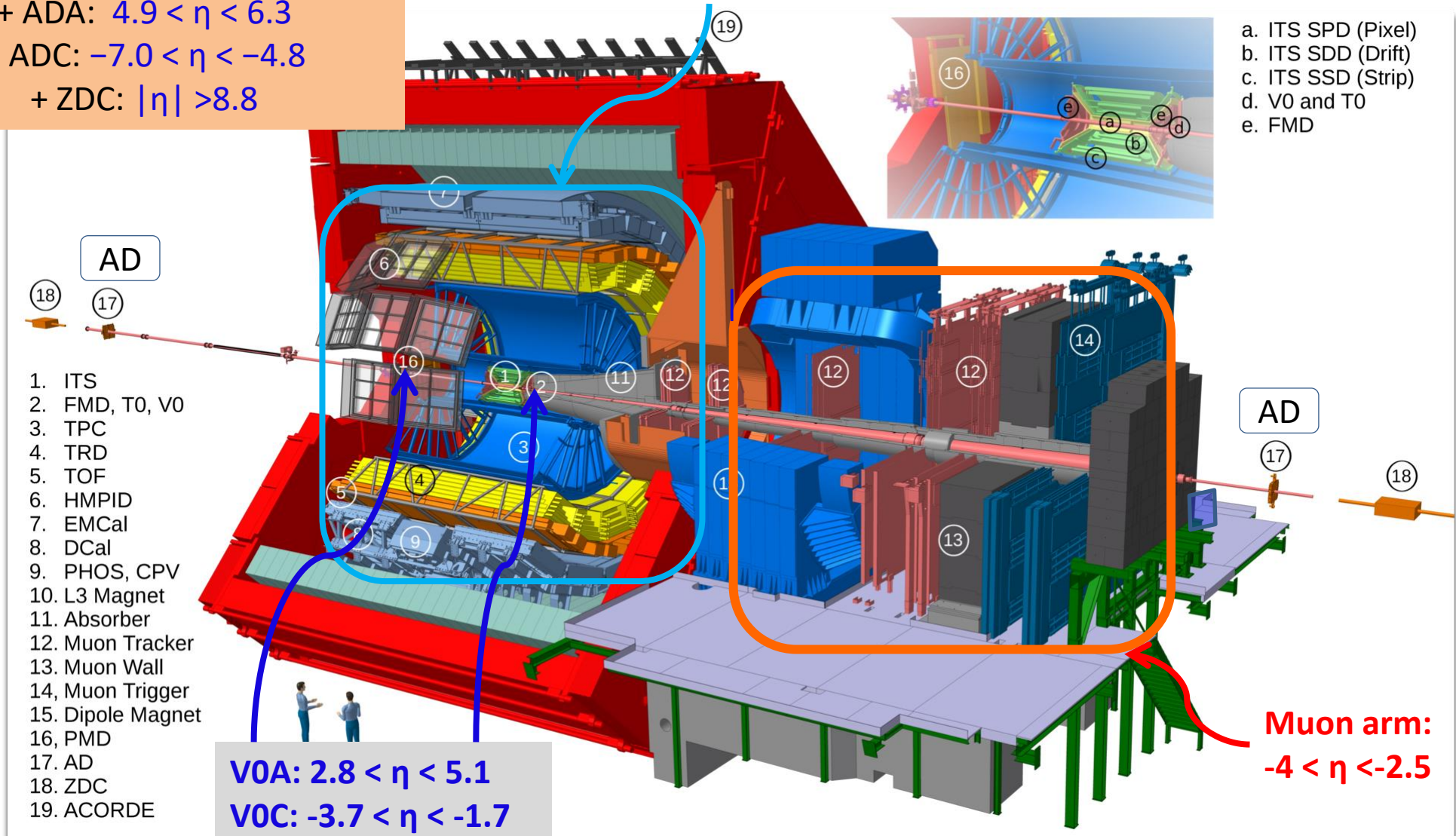
$$+ \text{ADA: } 4.9 < \eta < 6.3$$

$$+ \text{ADC: } -7.0 < \eta < -4.8$$

$$+ \text{ZDC: } |\eta| > 8.8$$

Central barrel:  $|\eta| < 0.9$

Inner SPD layer:  $|\eta| < 2.0$



# Периоды набора данных

Год	Система	$\sqrt{s_{NN}}$ , ТэВ	Канал	Быстрота	Светимость	Ссылки
2010	Pb–Pb	2.76	$\rho \rightarrow \pi\pi$	$ y  < 0.5$	214 мб <sup>-1</sup>	[A12]
2011	Pb–Pb	2.76	$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$-4 < y < -2.5$	55 мкб <sup>-1</sup>	[A16]
			$J/\psi \rightarrow \ell\ell$	$ y  < 0.9$	23 мкб <sup>-1</sup>	[A17, A18]
2013	p–Pb	5.02	$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$2.5 < y < 4.0$	3.9 нб <sup>-1</sup>	[A7]
			$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$1.2 < y < 2.7$	3.1 нб <sup>-1</sup>	[A8]
			$J/\psi \rightarrow \ell\ell$	$ y  < 0.8$	2.1 нб <sup>-1</sup>	[A8]
2013	Pb–p	5.02	$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$-3.6 < y < -2.6$	4.5 нб <sup>-1</sup>	[A7]
			$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$-2.5 < y < -1.2$	3.7 нб <sup>-1</sup>	[A8]
			$J/\psi \rightarrow \ell\ell$	$ y  < 0.8$	4.8 нб <sup>-1</sup>	[A8]
2015	Pb–Pb	5.02	$\rho \rightarrow \pi\pi$	$ y  < 0.8$	485 мб <sup>-1</sup>	[A2]
			$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$-4 < y < -2.5$	216 мкб <sup>-1</sup>	[A19]
2016	p–Pb	8.16	$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$-4 < y < -2.5$	7.9 нб <sup>-1</sup>	[A9]
2017	Xe–Xe	5.44	$\rho \rightarrow \pi\pi$	$ y  < 0.8$	280 мб <sup>-1</sup>	[A13]
2018	Pb–Pb	5.02	$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$-4 < y < -2.5$	538 мкб <sup>-1</sup>	[A19, A3]
			$J/\psi \rightarrow \ell\ell$	$ y  < 0.8$	233 мкб <sup>-1</sup>	[A20, A10, A21, A3]

# Триггерная стратегия

**Основная проблема** ALICE в сеансах 1 и 2:

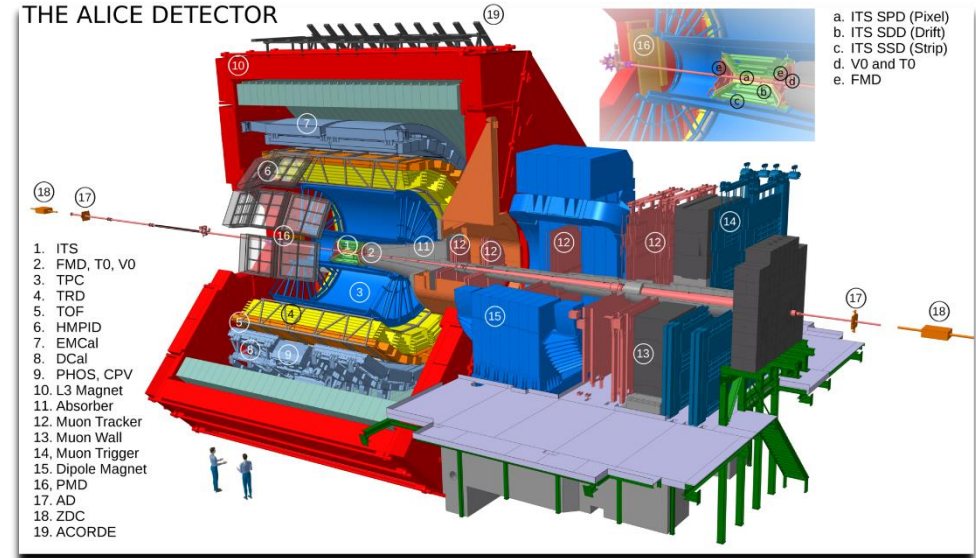
- Частота адронных Pb-Pb столкновений: до 8 кГц
- **Большое мертвое время:** до 2 мс/событие
- Частота записи не превышает 500 Гц
- Необходим жесткий отбор событий на уровне онлайн-триггера

**Триггерная стратегия для УПС-событий:**

- **Вето** на сигналы в детекторах V0 и/или AD в форвардной области
- В форвардной области быстрот: один или два трека в мюонном триггере **MTR**
- В центральной области быстрот: требование нескольких хитов в **SPD и/или TOF** + топологические ограничения
- **Прескейлинг** триггеров для снижения частоты считывания

**Пример триггера (PbPb2018) на распады  $J/\psi \rightarrow \mu\mu$  в области  $|y| < 0.8$ :**

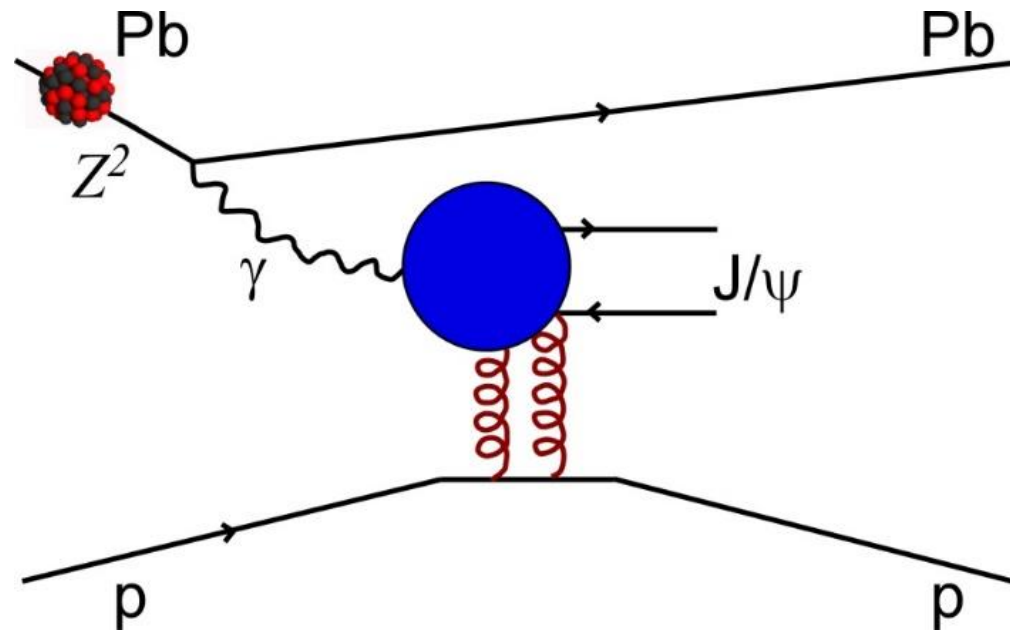
- Вето на активность в детекторах V0A, V0C, ADA, ADC
- Два хита в TOF с back-to-back топологией ( $\Delta\phi > 154^\circ$ )
- Не более 6 хитов в TOF
- Два трека в SPD с back-to-back топологией ( $\Delta\phi > 150^\circ$ )



Год	Система	$\sqrt{s_{NN}}$ , ТэВ	Канал	Быстрота	Основной триггер
2010	Pb-Pb	2.76	$\rho \rightarrow \pi\pi$	$ y  < 0.5$	SH2 OM2 $\overline{V0A}$ $\overline{V0C}$
2011	Pb-Pb	2.76	$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$-4 < y < -2.5$	MSL V0C $\overline{V0A}$
			$J/\psi \rightarrow \ell\ell$	$ y  < 0.9$	SH2 OMU $\overline{V0A}$ $\overline{V0C}$
2013	p-Pb	5.02	$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$2.5 < y < 4.0$	MUL $\overline{V0A}$
			$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$1.2 < y < 2.7$	MSL SMB $\overline{SM7}$ $\overline{V0A}$ $\overline{VC5}$
			$J/\psi \rightarrow \ell\ell$	$ y  < 0.8$	STP OMU $\overline{SM7}$ $\overline{V0A}$ $\overline{V0C}$
2013	Pb-p	5.02	$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$-3.6 < y < -2.6$	MUL V0C $\overline{V0A}$
			$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$-2.5 < y < -1.2$	MSL SMB V0C $\overline{SM7}$ $\overline{V0A}$ $\overline{VC5}$
			$J/\psi \rightarrow \ell\ell$	$ y  < 0.8$	STP OMU $\overline{SM7}$ $\overline{V0A}$ $\overline{V0C}$
2015	Pb-Pb	5.02	$\rho \rightarrow \pi\pi$	$ y  < 0.8$	STP $\overline{V0A}$ $\overline{V0C}$ ADA ADC
			$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$-4 < y < -2.5$	MUL $\overline{V0A}$ ADA ADC
2016	p-Pb	8.16	$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$-4 < y < -2.5$	MSL $\overline{V0A}$ ADA
2017	Xe-Xe	5.44	$\rho \rightarrow \pi\pi$	$ y  < 0.8$	SM4 $\overline{V0A}$ $\overline{V0C}$
2018	Pb-Pb	5.02	$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$-4 < y < -2.5$	MUL $\overline{V0A}$
			$J/\psi \rightarrow \ell\ell$	$ y  < 0.8$	STG OMU $\overline{V0A}$ $\overline{V0C}$ ADA ADC

# Глава 3

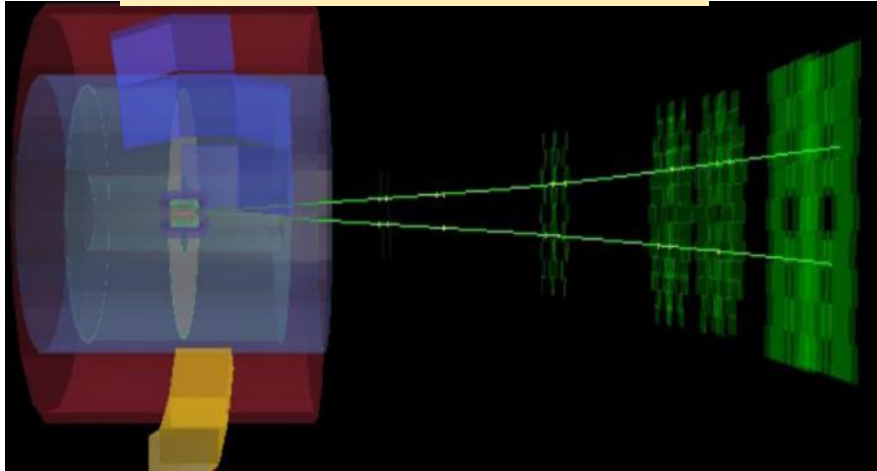
## Фоторождение $J/\psi$ на протоне



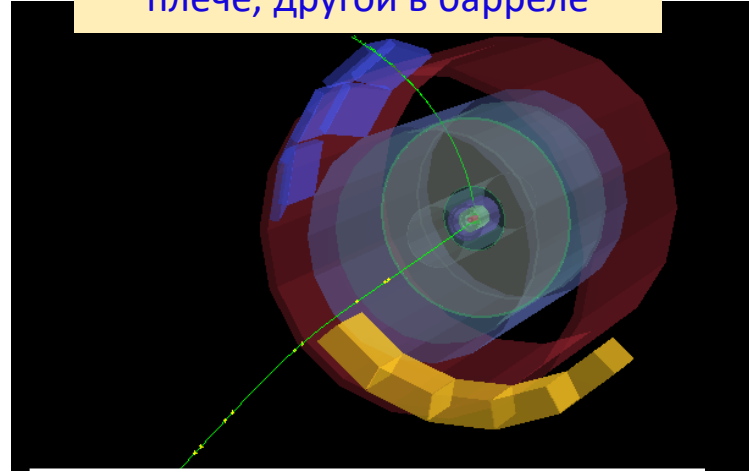


# Эксклюзивное рождение $J/\psi$ на протоне (p-Pb УПС)

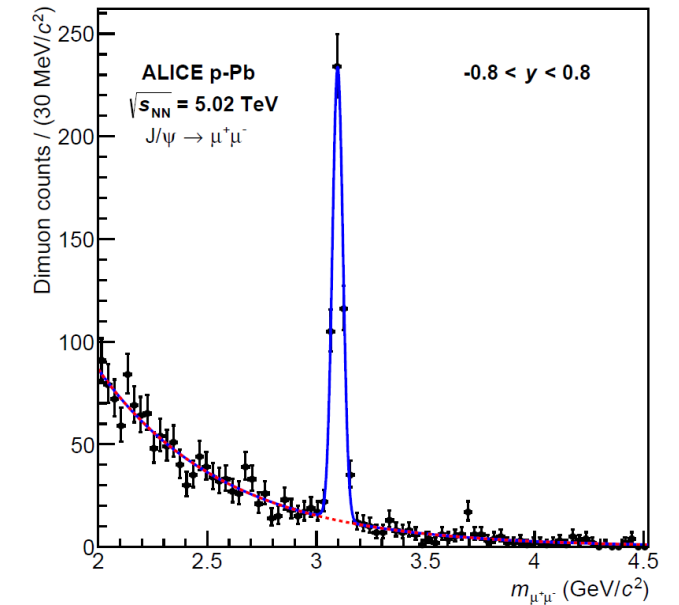
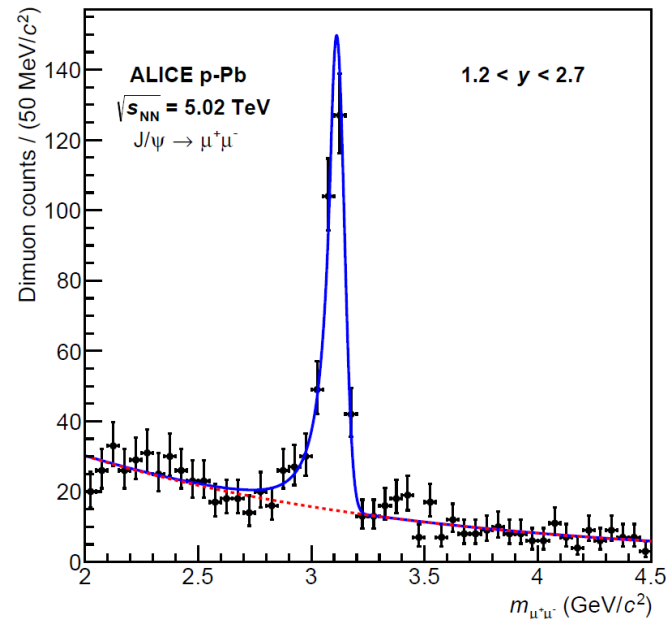
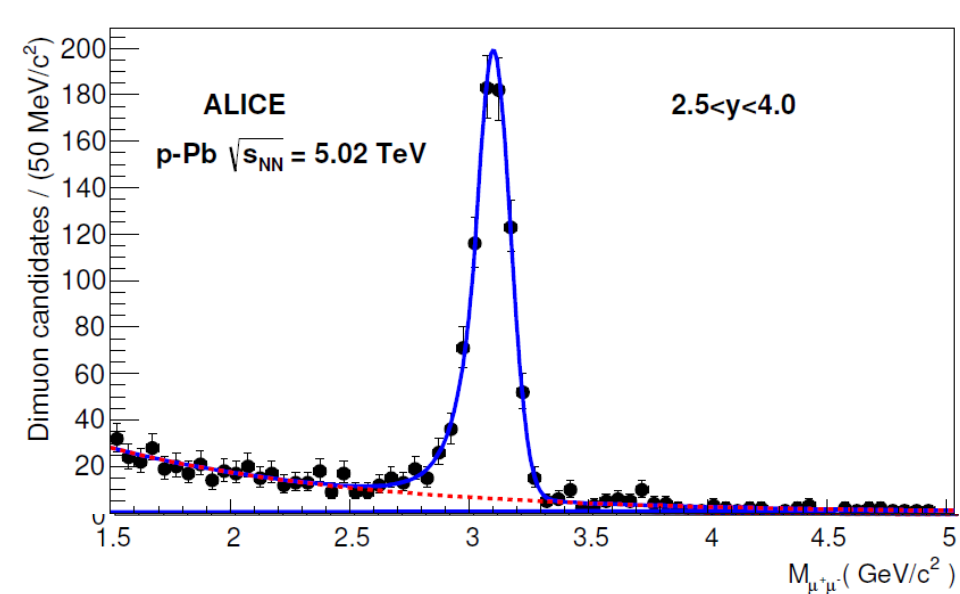
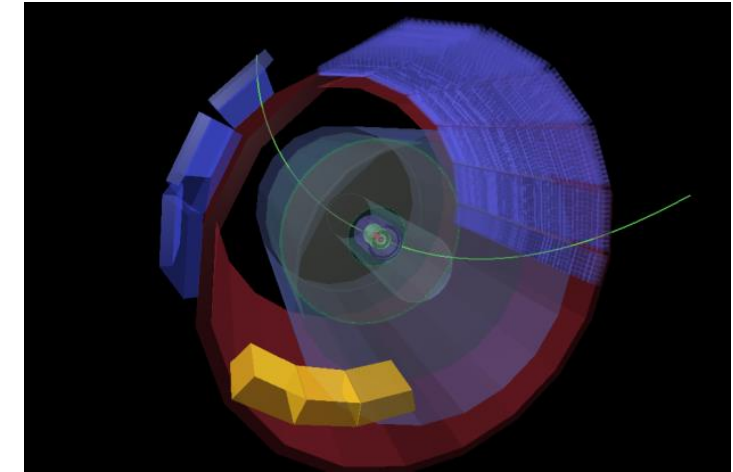
оба мюона с мюонным плече



один мюон в мюонном плече, другой в барреле



оба лептона в барреле



3 области измерения дилептонных распадов  $J/\psi$  x 2 конфигурации пучков (p-Pb и Pb-p)



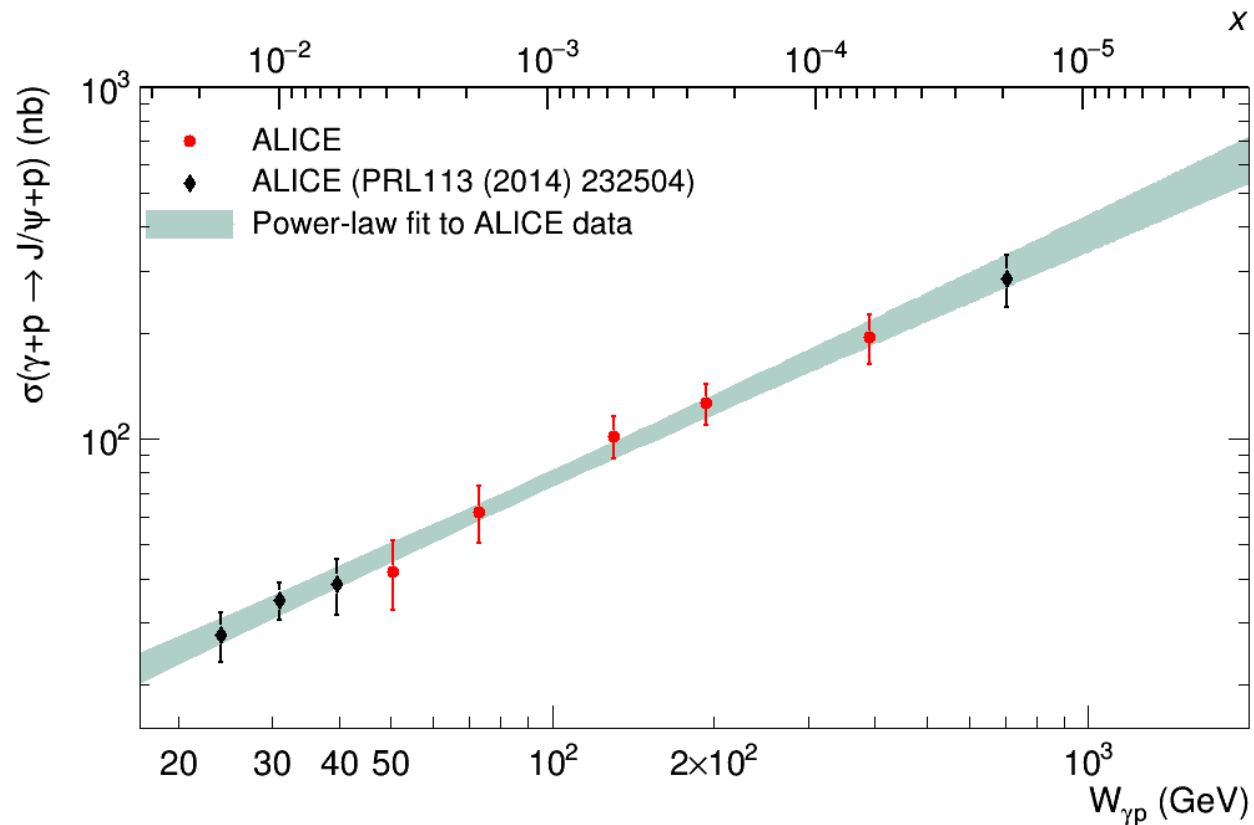
# Эксклюзивное рождение J/ψ на протоне (p-Pb УПС)

ALICE: PRL 113 (2014) 232504

ALICE: EPJC 79 (2019) 402

ALICE: PRD 108 (2023) 112004

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



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

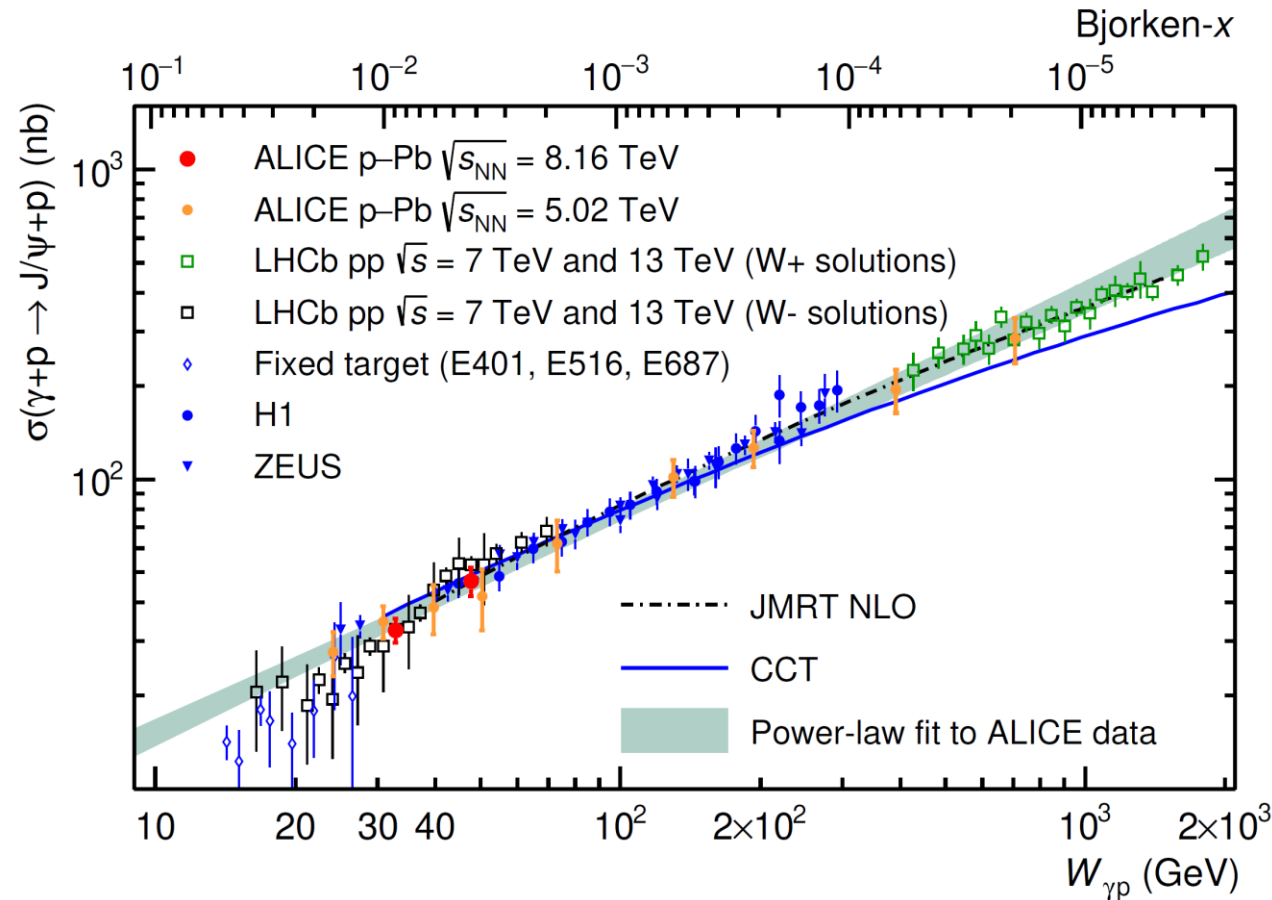
# Эксклюзивное рождение $J/\psi$ на протоне (p-Pb УПС)

ALICE: PRL 113 (2014) 232504

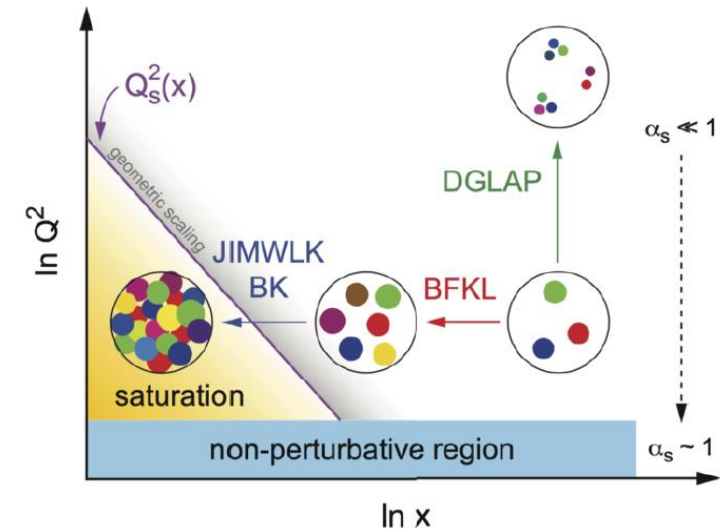
ALICE: EPJC 79 (2019) 402

ALICE: PRD 108 (2023) 112004

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



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



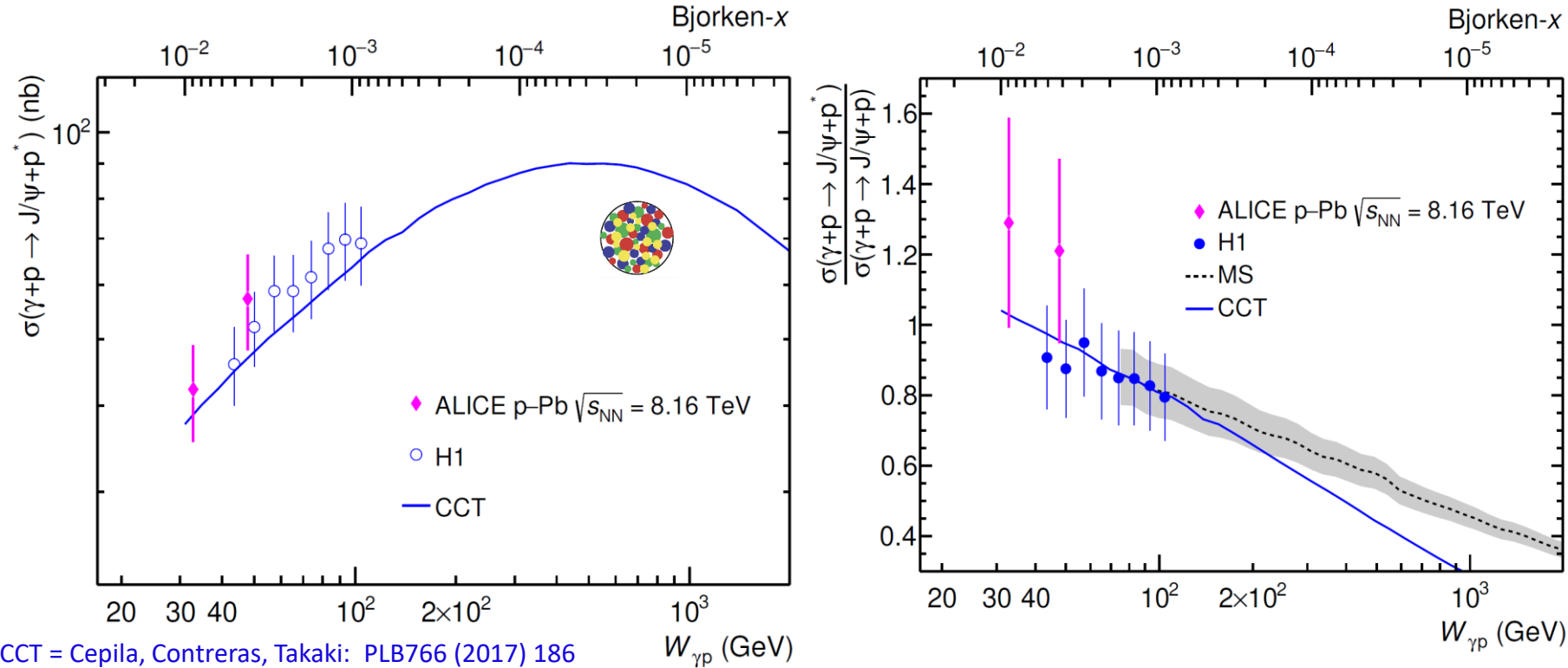
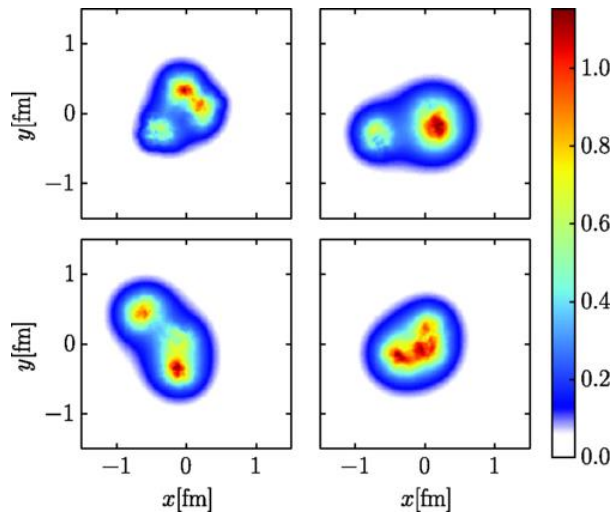
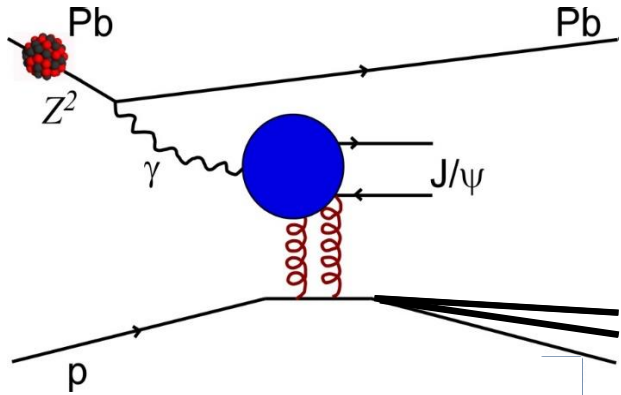
- В согласии с H1 и ZEUS
- В согласии с данными LHCb, полученными в pp
- Измерения хорошо описываются степенной зависимостью:

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

- Явных признаков насыщения не обнаружено ☹️

# Дифракционное рождение $J/\psi$ на протоне (p-Pb УПС)

ALICE: PRD 108 (2023) 112004



CCT = Cepila, Contreras, Takaki: PLB766 (2017) 186

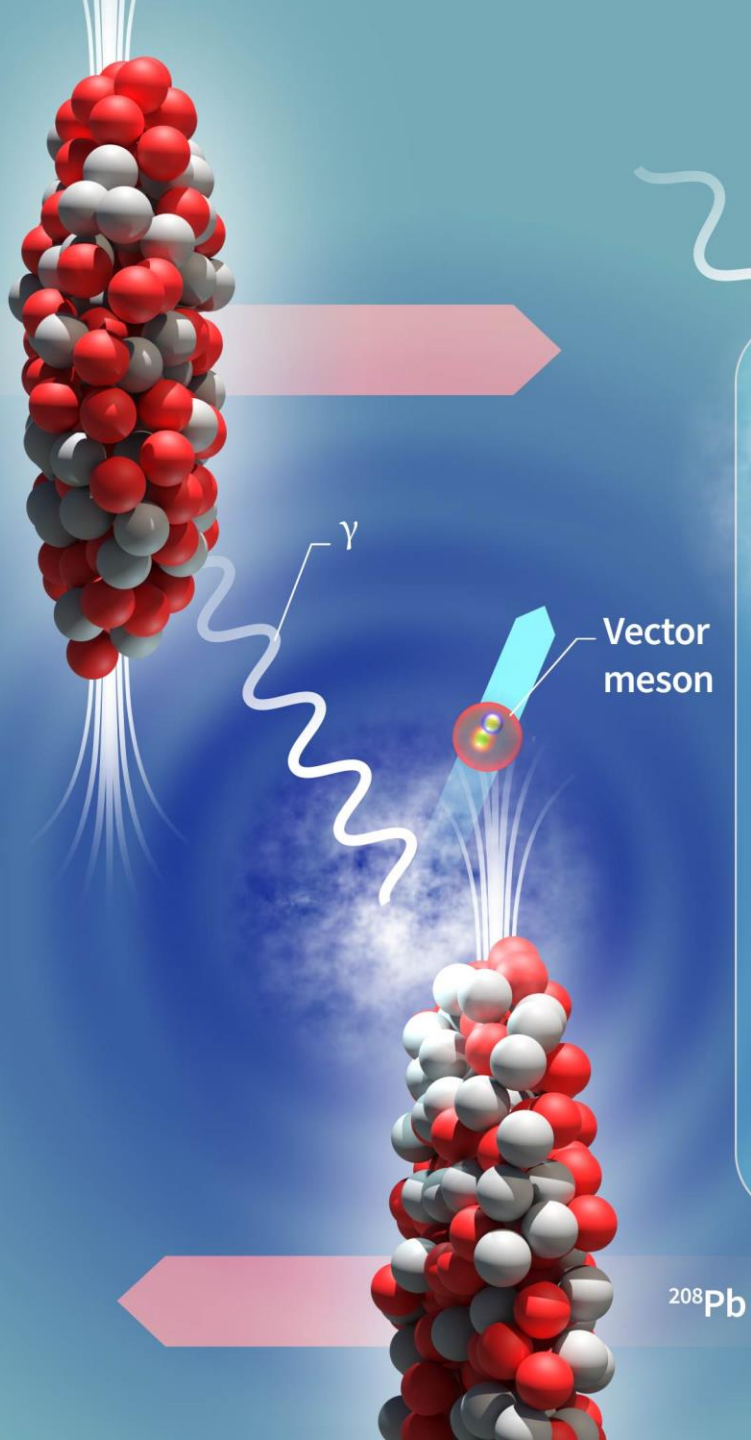
- Сечение дифракционного рождения  $J/\psi$  (с диссоциацией протона-мишени) чувствительно к флуктуациям глюонной плотности
- В режиме насыщения ожидается уменьшение флуктуаций:  
→ насыщение и спад дифракционного сечения возможен при энергиях, доступных на LHC
- Первые измерения при низких энергиях в согласии с H1



# Глава 4

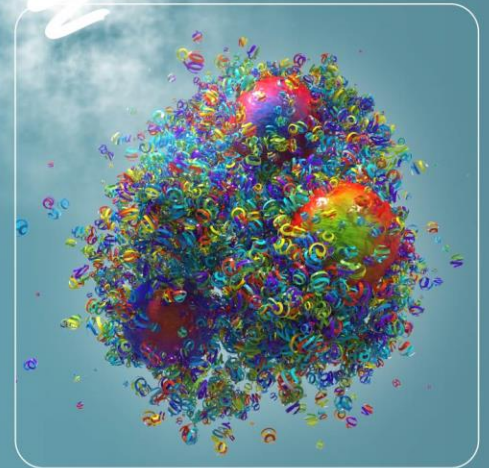
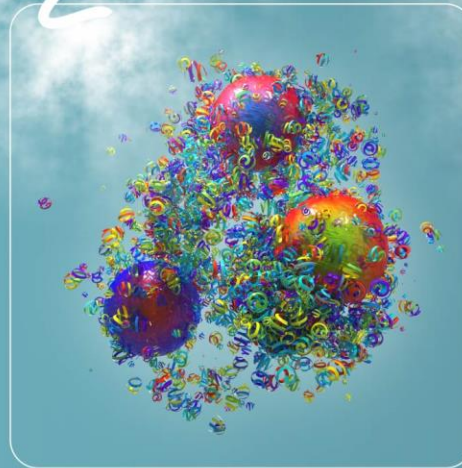
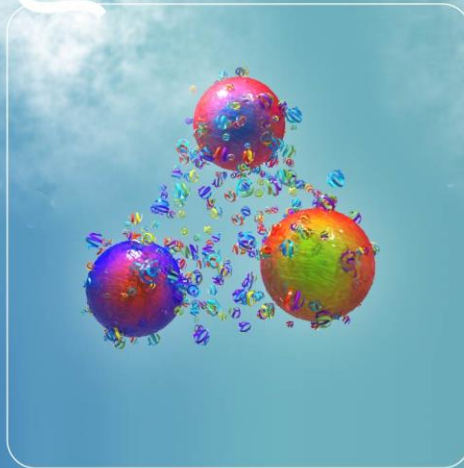
## Фоторождение $J/\psi$ и $\psi(2S)$ на ядрах

$^{208}\text{Pb}$



Photon energy

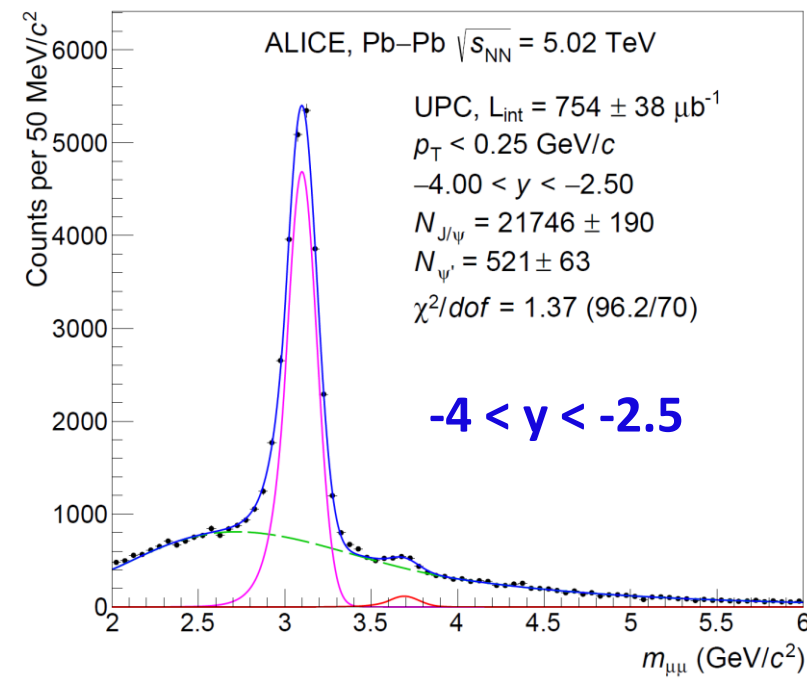
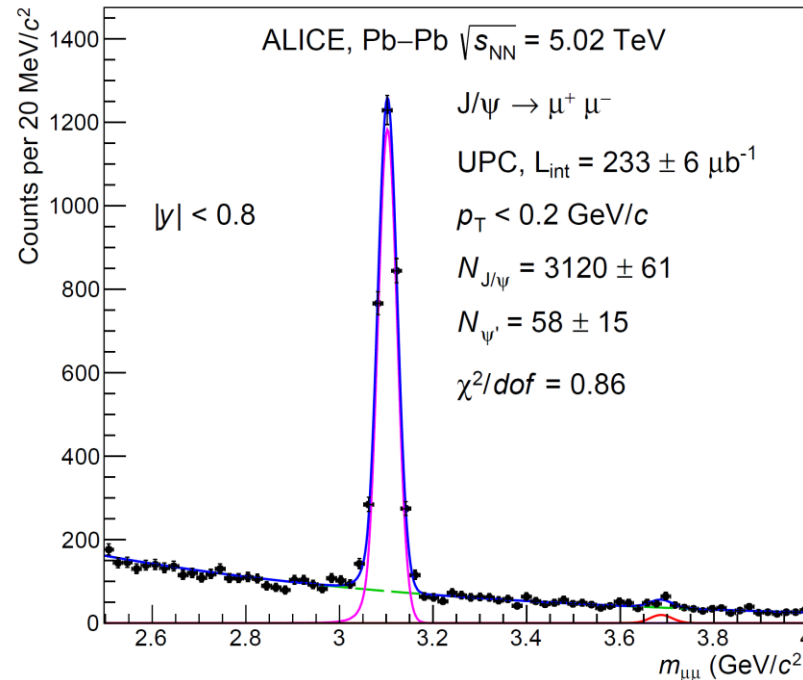
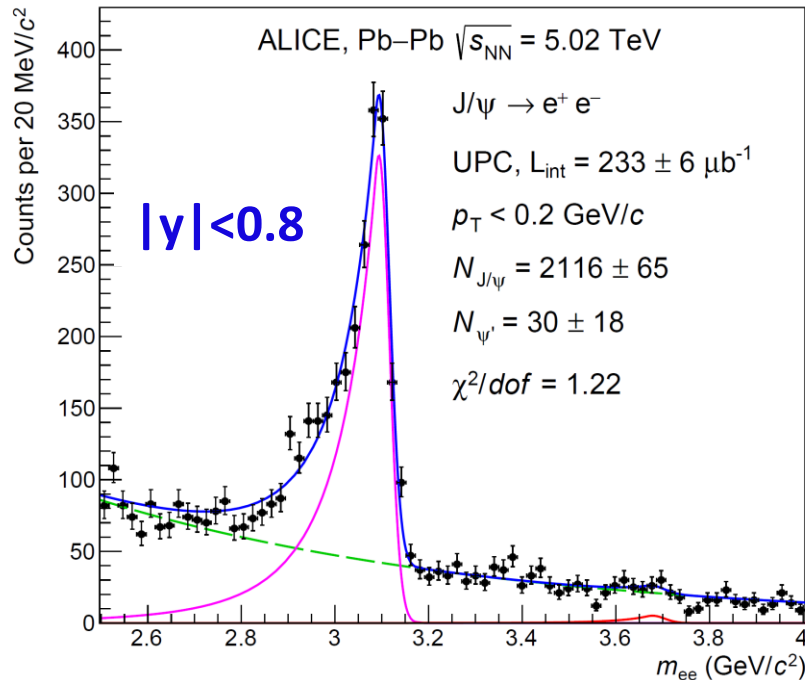
$^{208}\text{Pb}$



# Измерение сечений

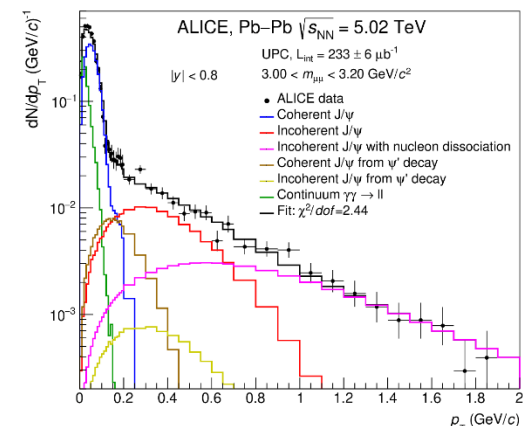
ALICE, EPJC 81 (2021) 712

ALICE, PLB 798 (2019) 134926



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

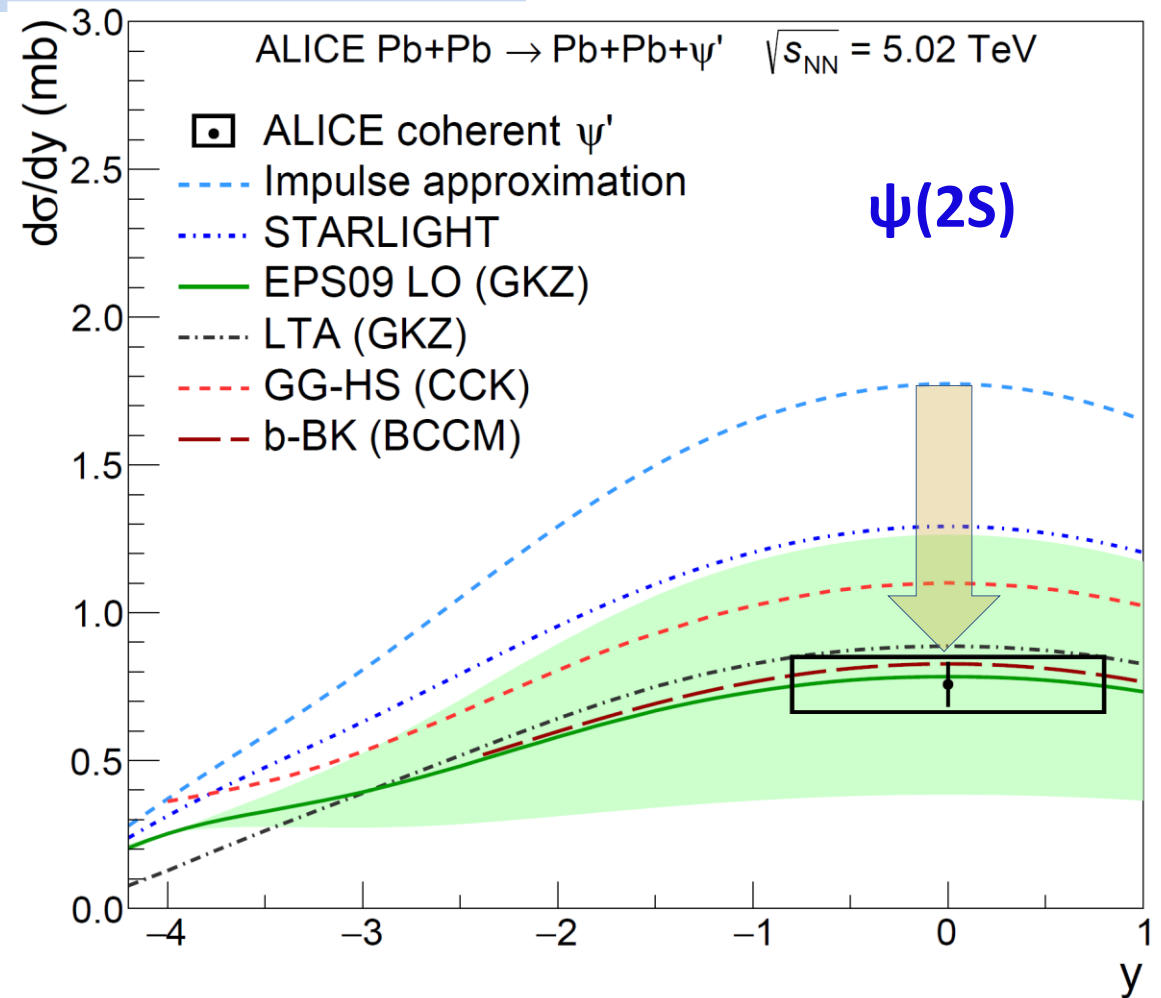
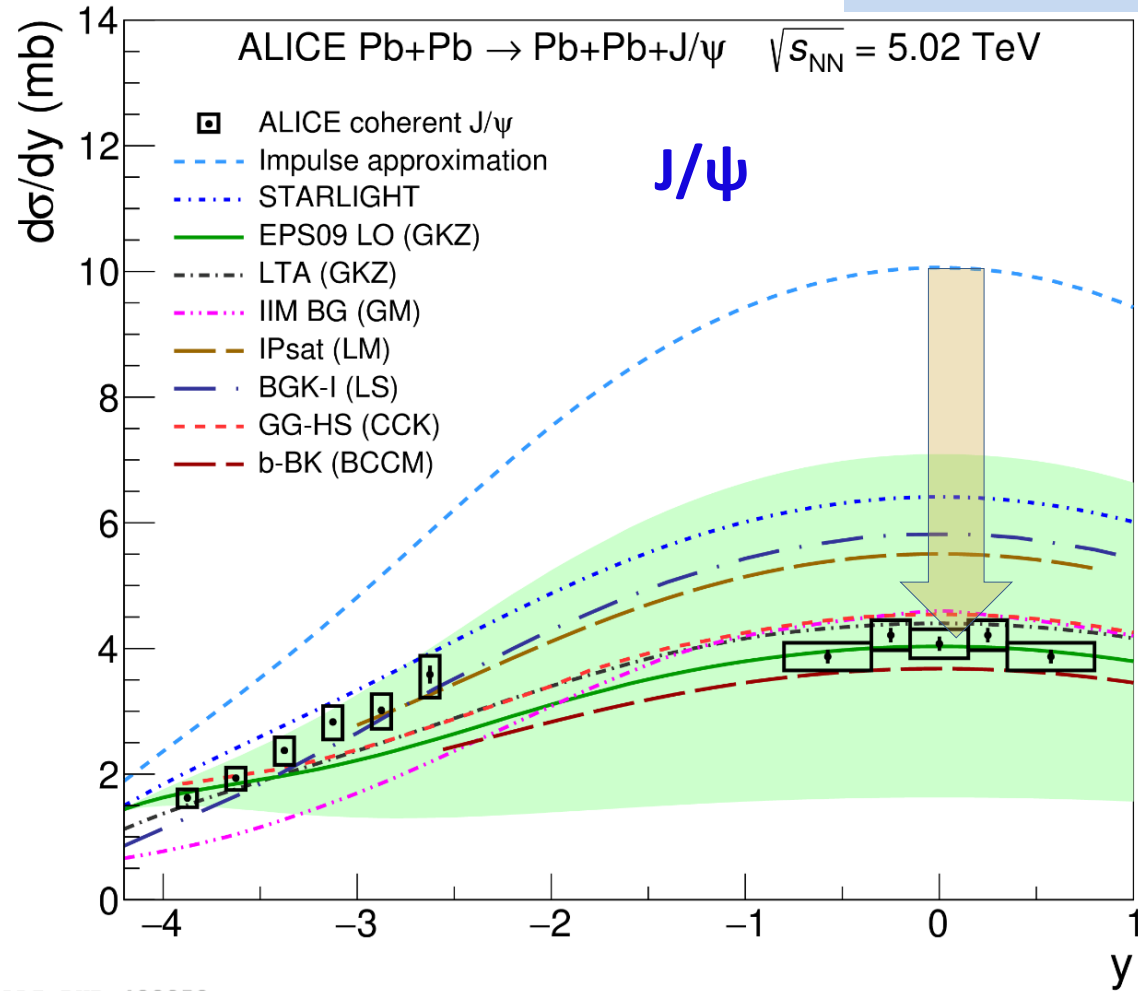
эффективность реконструкции      эффективность вето      branching      светимость      диапазон по быстроте





# Сечения когерентного рождения на ядрах

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



ALI-PUB-499958

$$S(W_{\gamma p}) \equiv \sqrt{\frac{\sigma_{\gamma A \rightarrow V A}^{\text{exp}}(W_{\gamma p})}{\sigma_{\gamma A \rightarrow V A}^{\text{IA}}(W_{\gamma p})}} \sim 0.65 \text{ при } y \sim 0 \quad (x \sim 10^{-3})$$

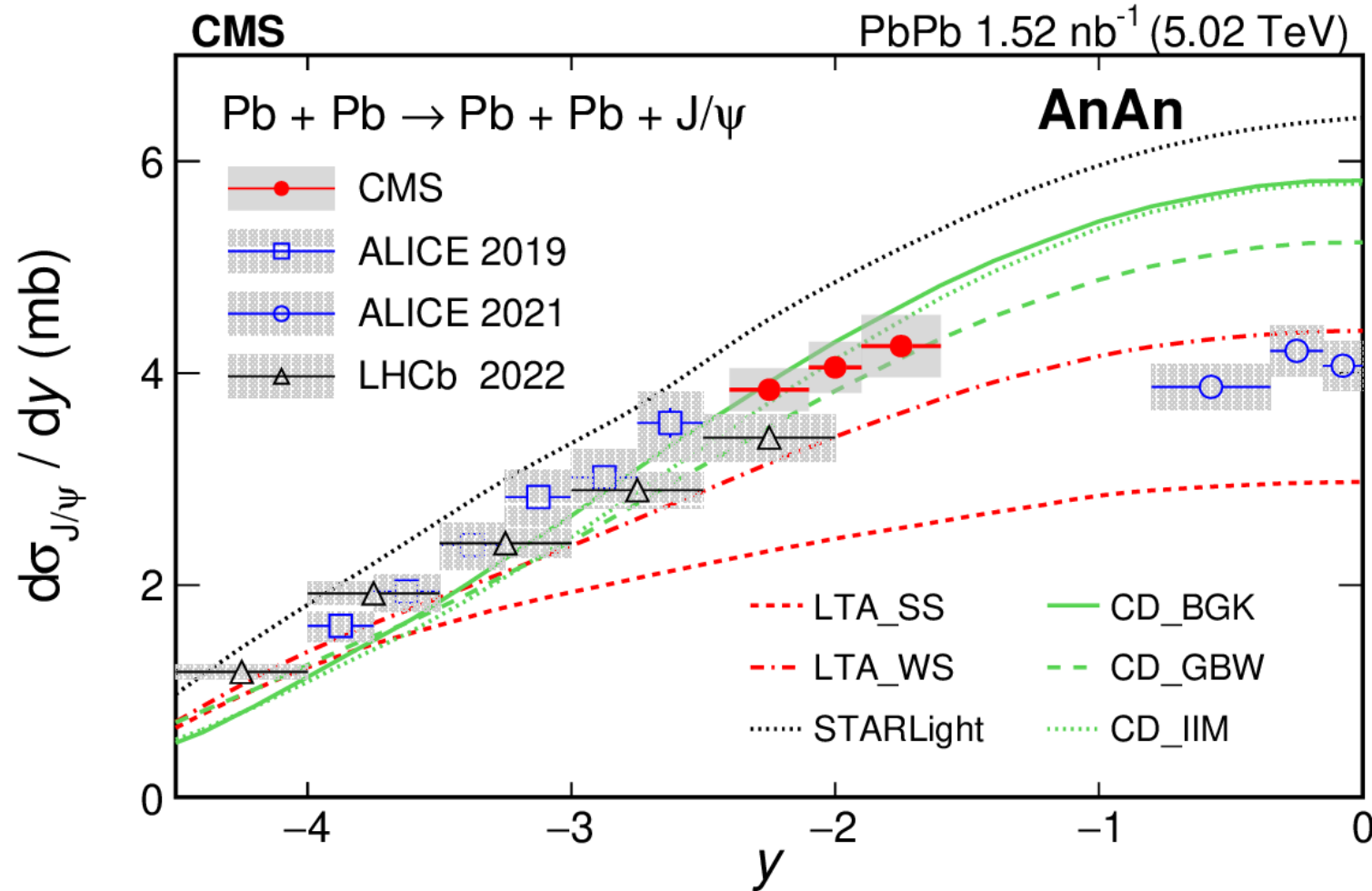
Прямое свидетельство сильных глюонных экранировок!

# Сравнение с результатами CMS и LHCb

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

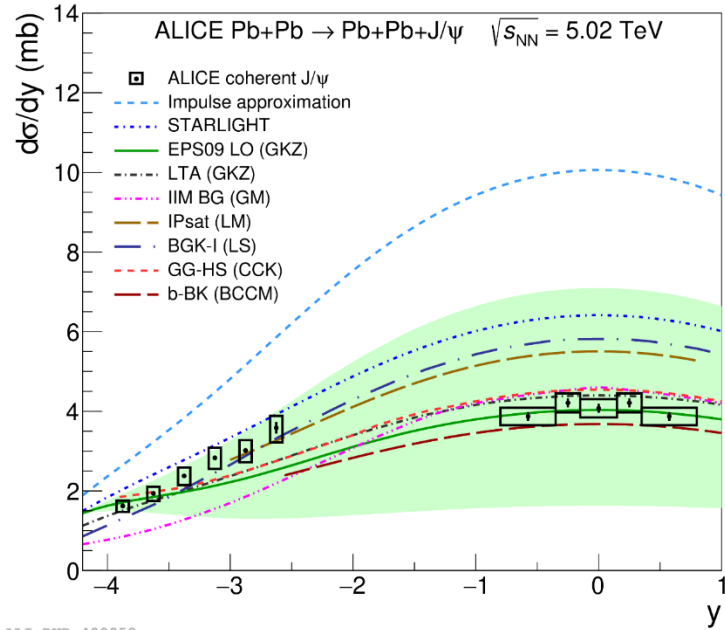
LHCb JHEP 06 (2023) 146

CMS, PRL 131 (2023) 262301



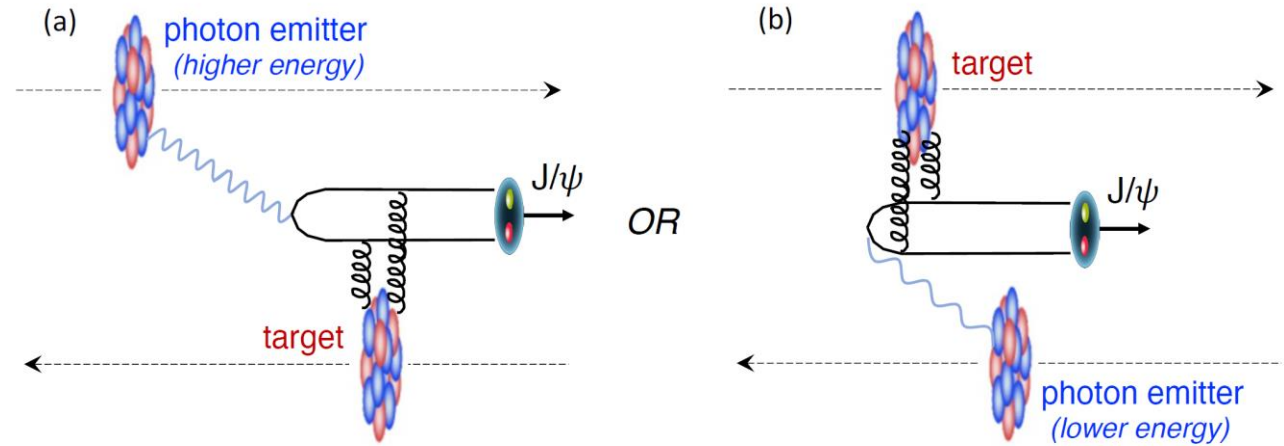
- Согласие с LHCb в области больших быстрот
- Согласие с последними результатами CMS

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



ALI-PUB-499958  
 $x \sim 10^{-2}$  (~95%)  
 $x \sim 10^{-5}$  (~5%)

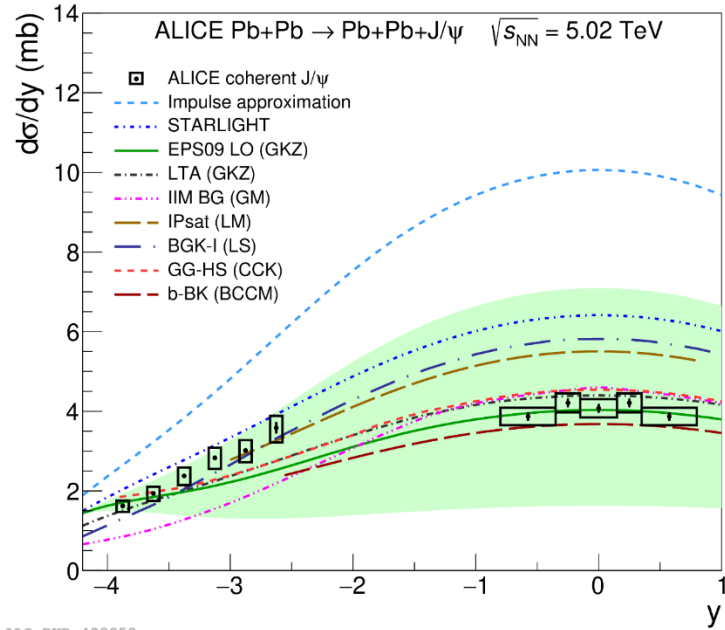
$x \sim 10^{-3}$



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

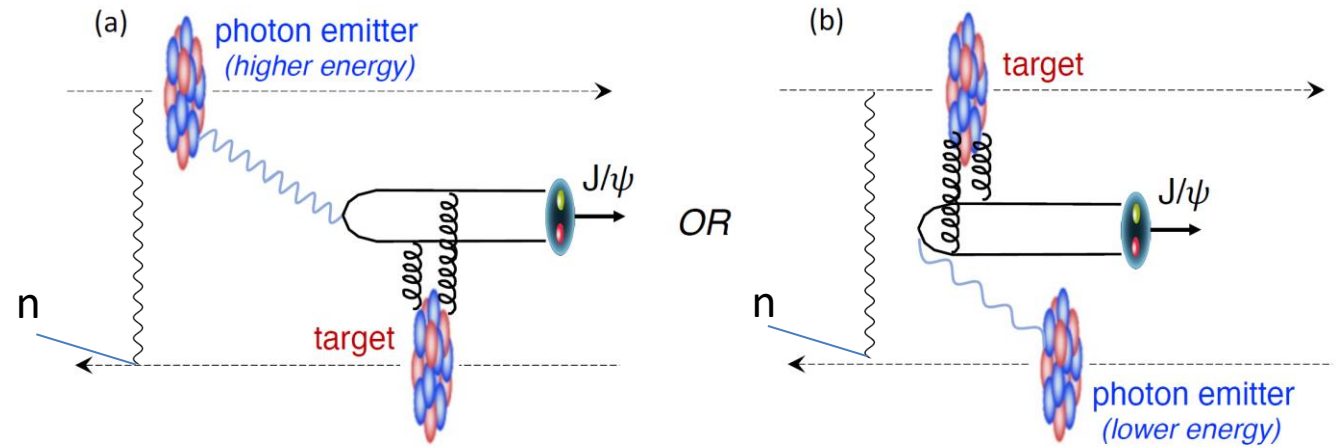
↑ low-energy photons     ↑ high-x gluons     ↑ high-energy photons     ↑ low-x gluons

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



$x \sim 10^{-2}$  (~95%)  
 $x \sim 10^{-5}$  (~5%)

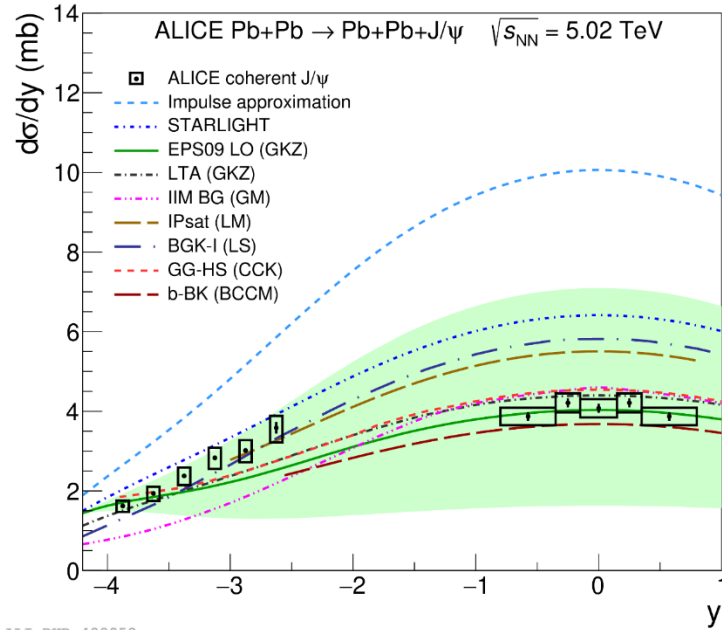
$x \sim 10^{-3}$



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

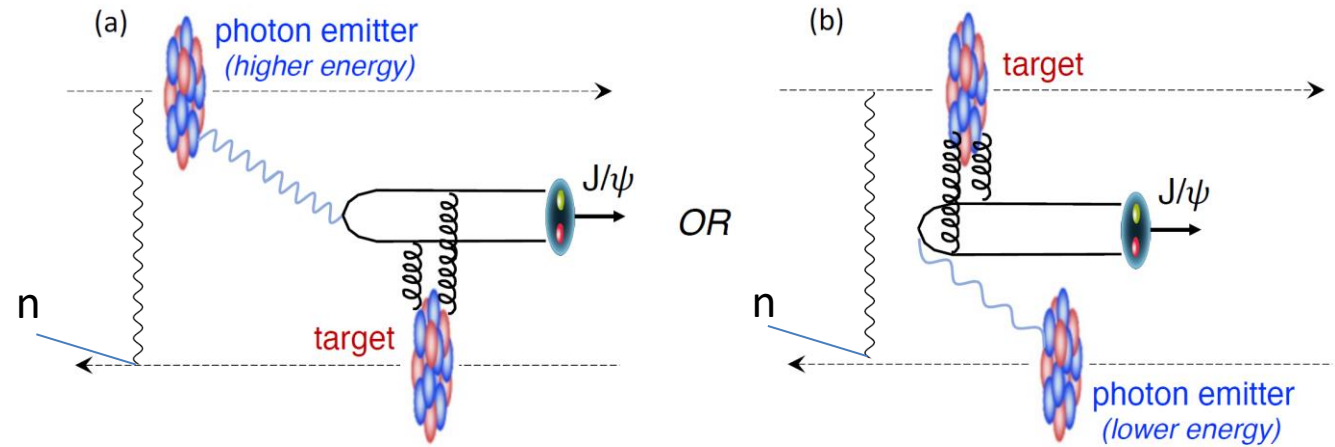
↑ **low-energy photons**     ↑ **high-x gluons**     ↑ **high-energy photons**     ↑ **low-x gluons**

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



$x \sim 10^{-2}$  (~95%)  
 $x \sim 10^{-5}$  (~5%)

$x \sim 10^{-3}$



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

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

Измерения сечений с/без испускания нейтронов позволяют разделить вклады, соответствующие высоким и низким энергиям фотонов

измерения      потоки (можно рассчитать с хорошей точностью)

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

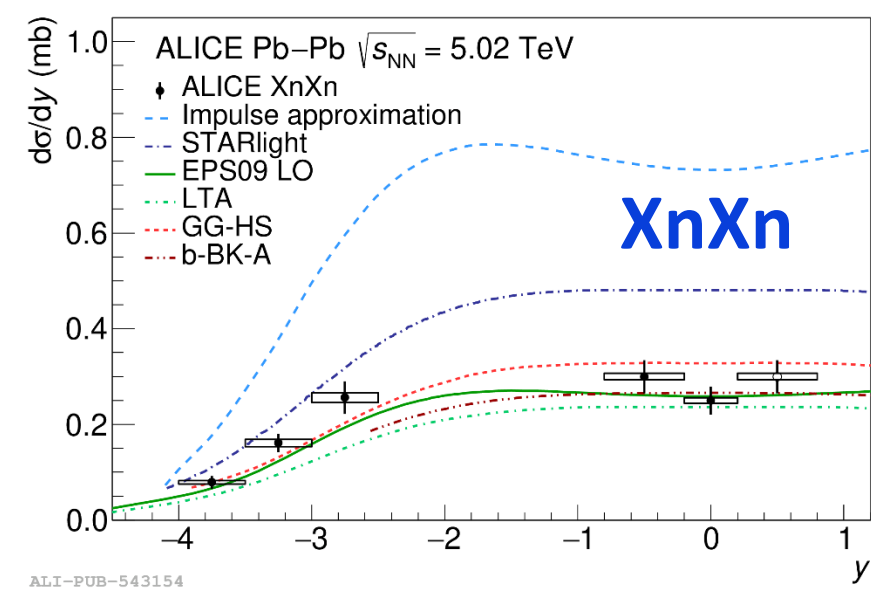
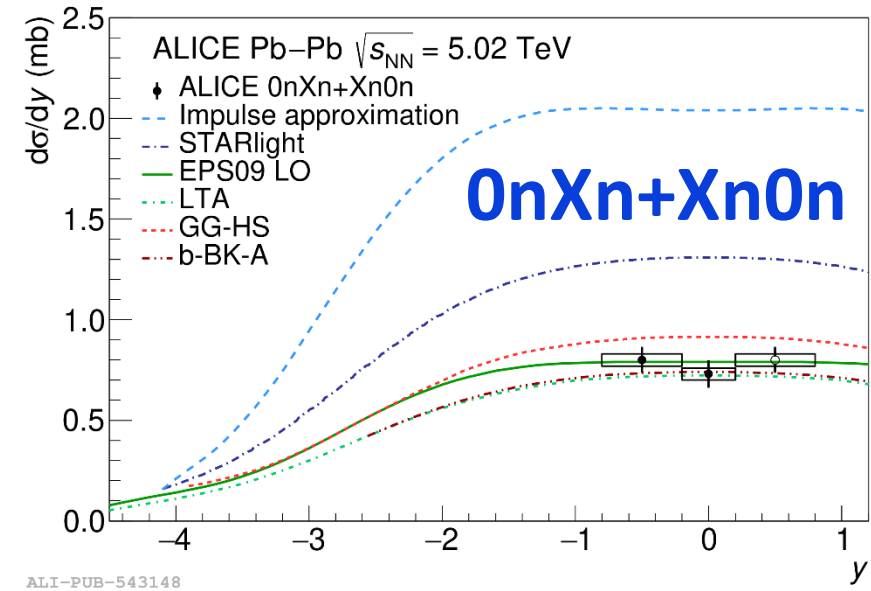
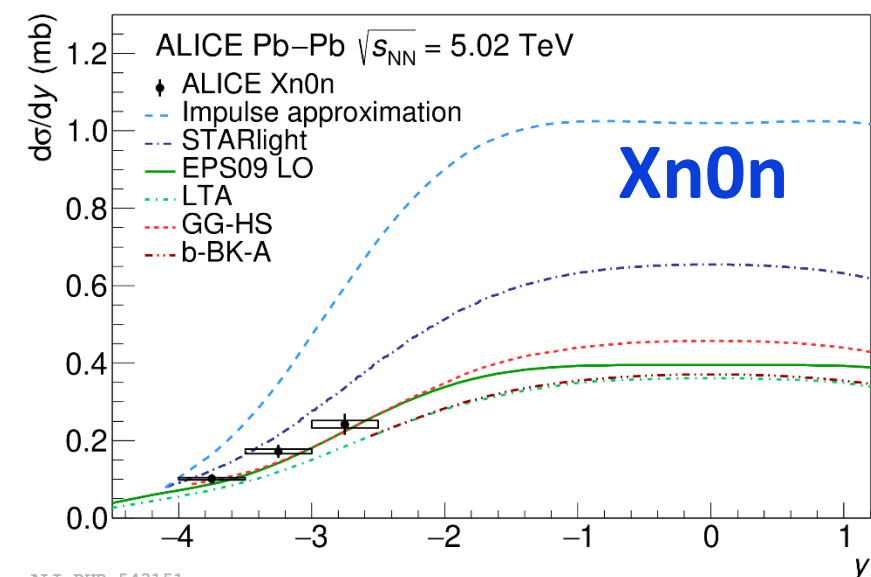
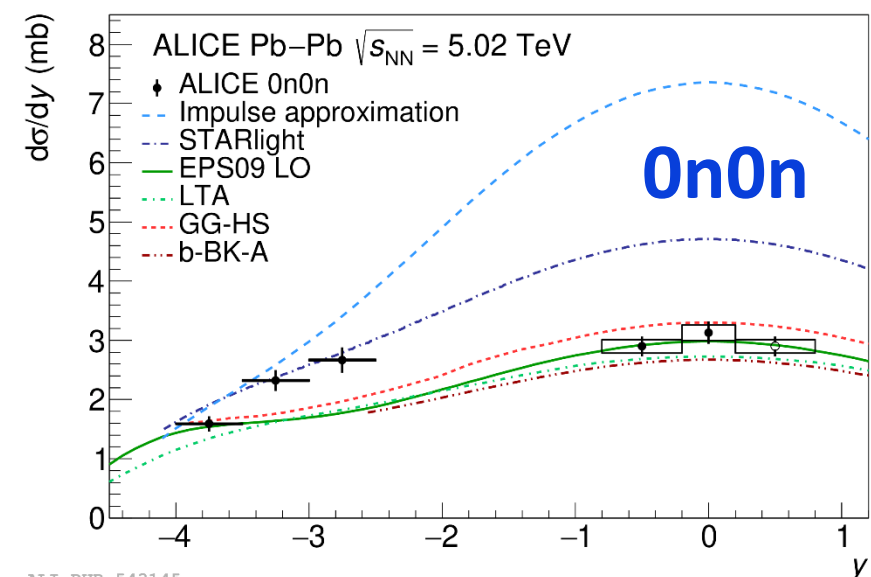
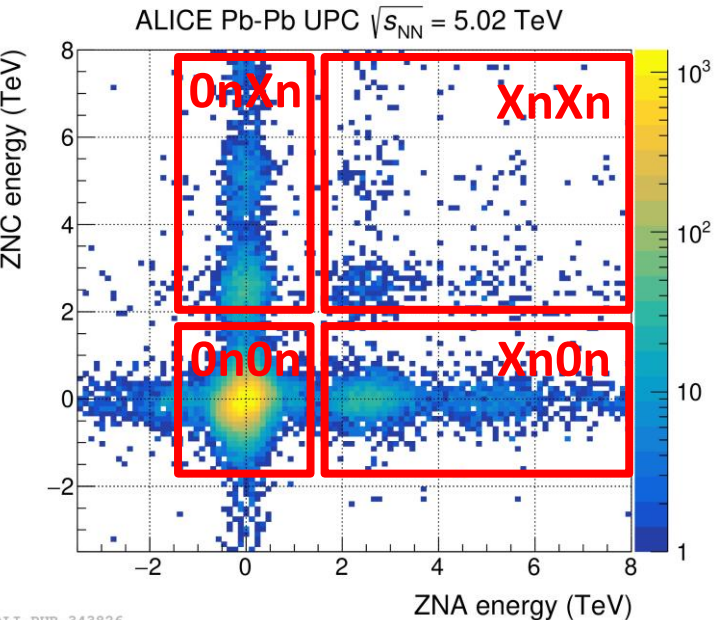
$$0nXn: \quad \frac{d\sigma_{\text{PbPb}}^{0nXn}(y)}{dy} = n_{\gamma}^{0nXn}(y)\sigma_{\gamma\text{Pb}}(y) + n_{\gamma}^{0nXn}(-y)\sigma_{\gamma\text{Pb}}(-y)$$

**Неизвестные фотоядерные сечения**



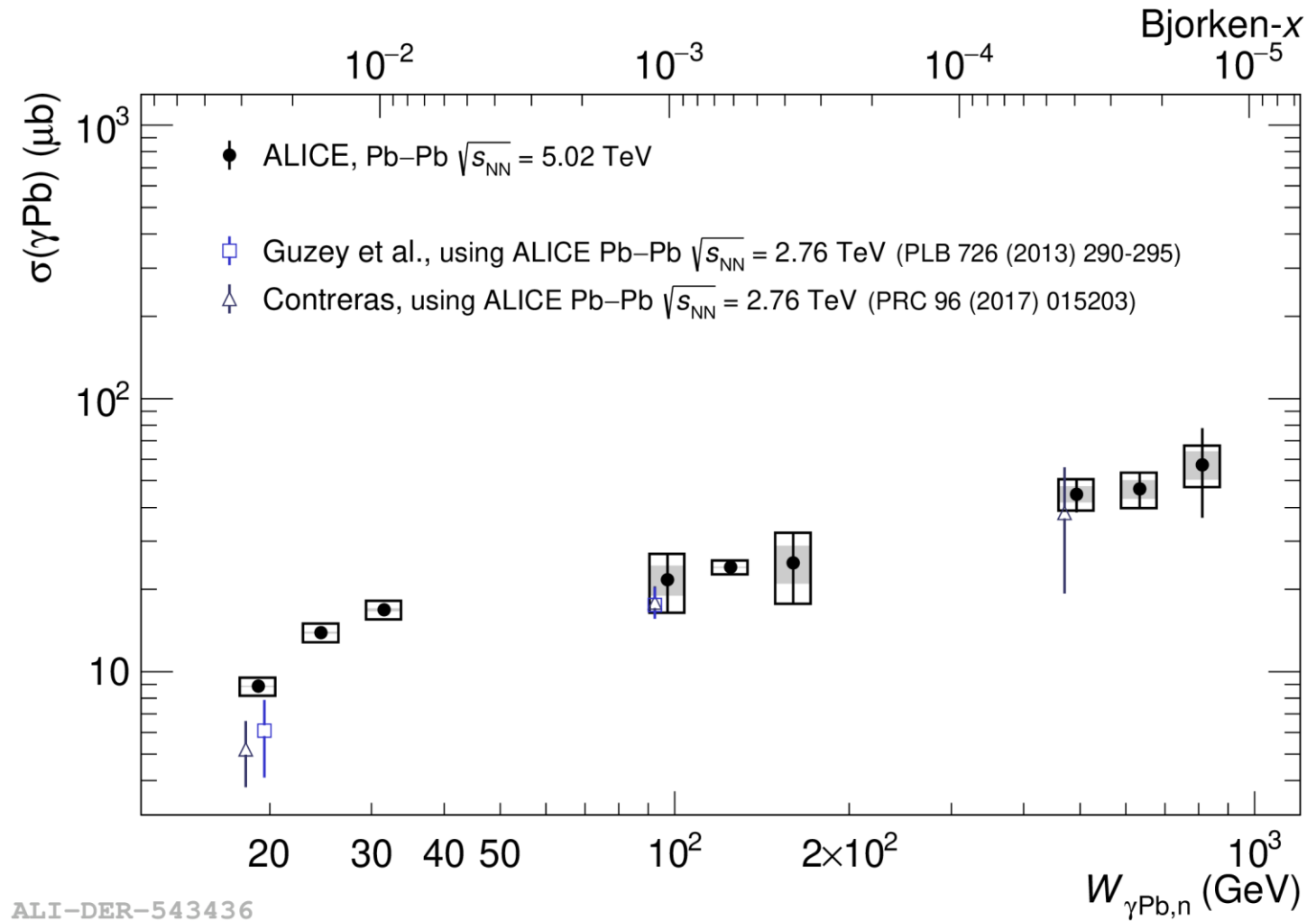
# Когерентное сечение $J/\psi$ + испускание нейтронов

ALICE, JHEP 06 (2020) 035



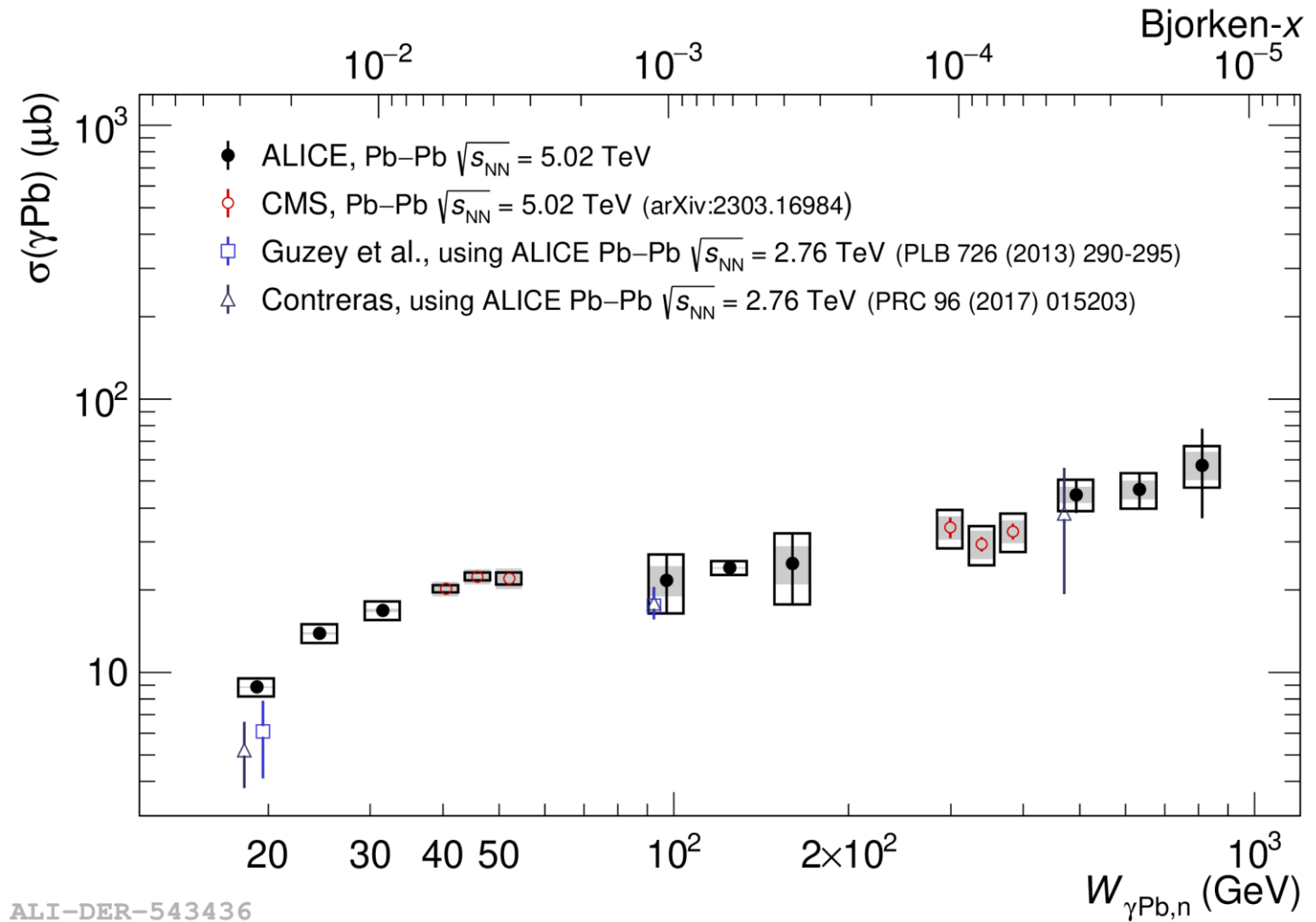
# Зависимость фотоядерных сечений от энергии

- ALICE: впервые фотоядерное сечение измерено до энергий  $\sim 1$  ТэВ!



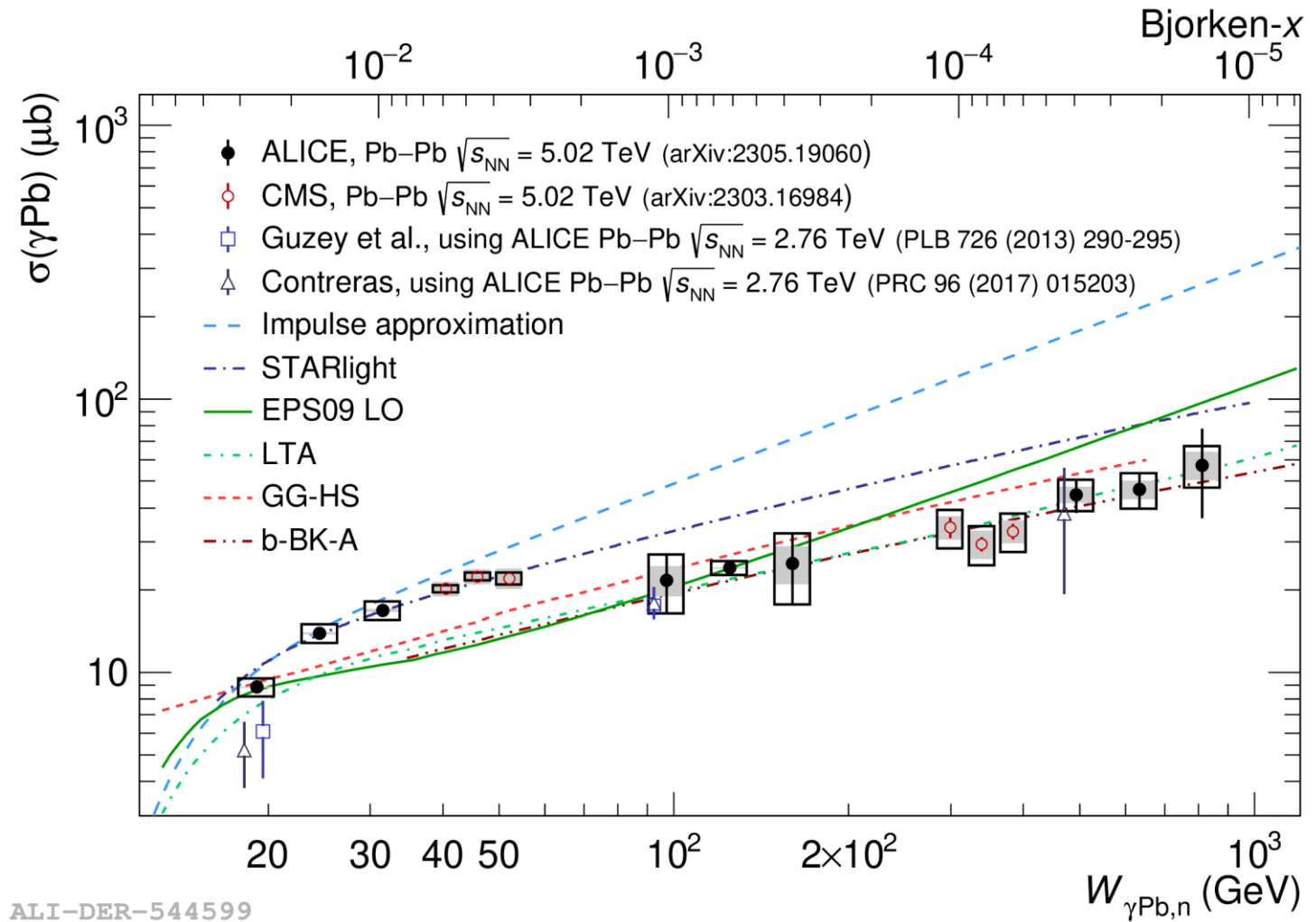
# Зависимость фотоядерных сечений от энергии

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



# Зависимость фотоядерных сечений от энергии

- ALICE: впервые фотоядерное сечение измерено до энергий  $\sim 1$  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)



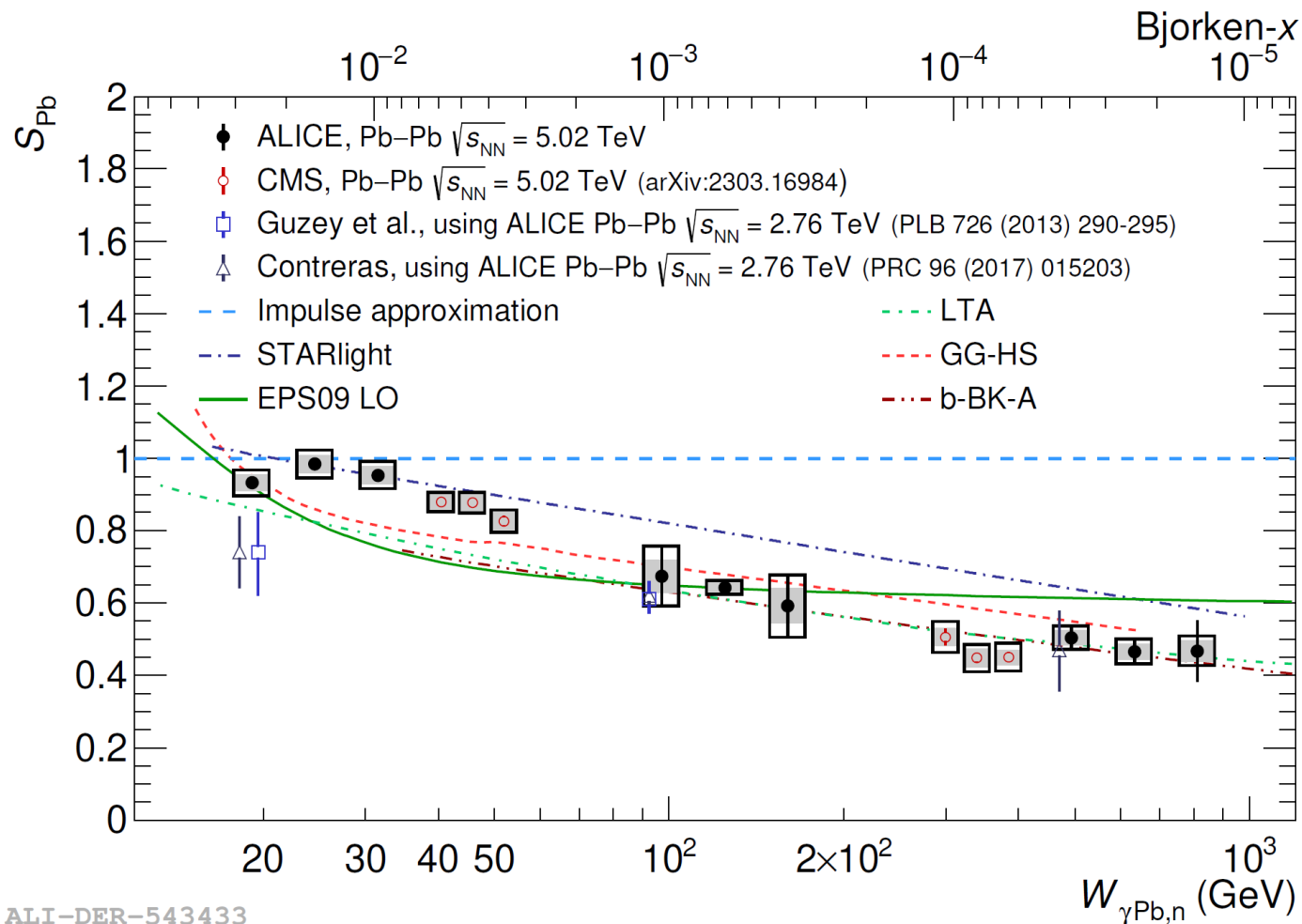
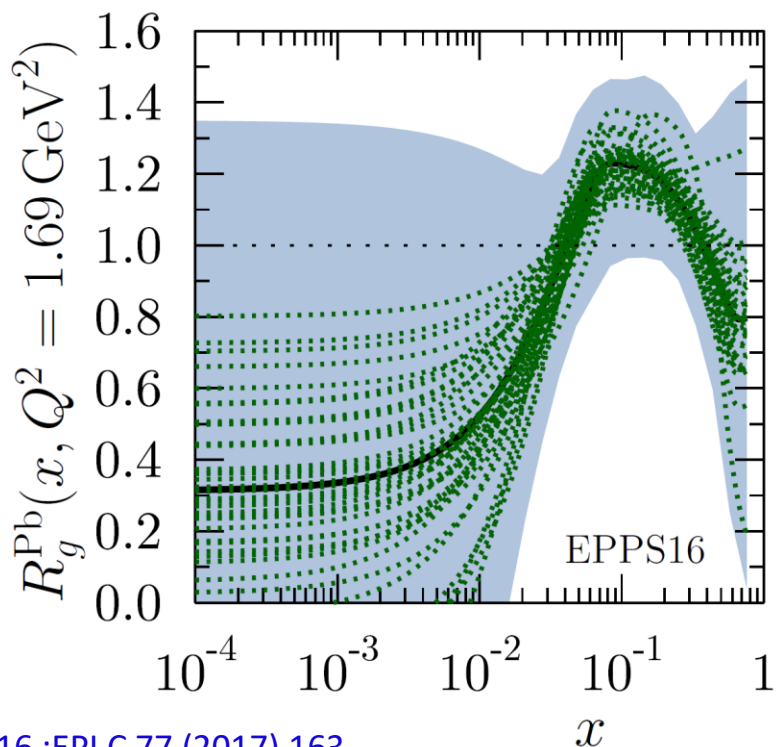
# Фактор ядерного подавления

ALICE, JHEP 10 (2023) 119

CMS, PRL 131 (2023) 262301

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

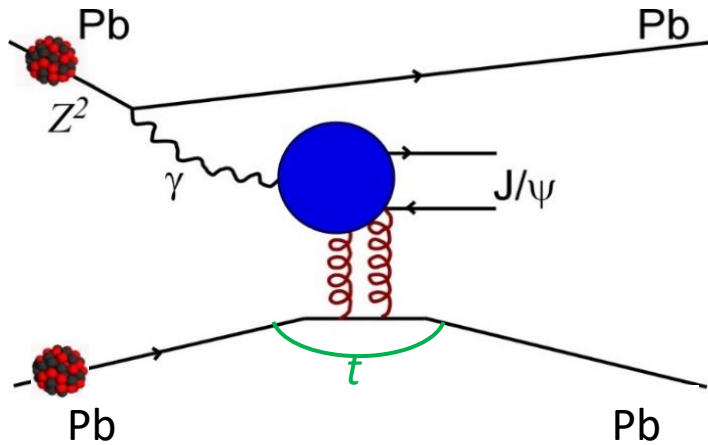
$$S(W_{\gamma p}) \equiv \sqrt{\frac{\sigma_{\gamma A \rightarrow V A}^{\text{exp}}(W_{\gamma p})}{\sigma_{\gamma A \rightarrow V A}^{\text{IA}}(W_{\gamma p})}}$$



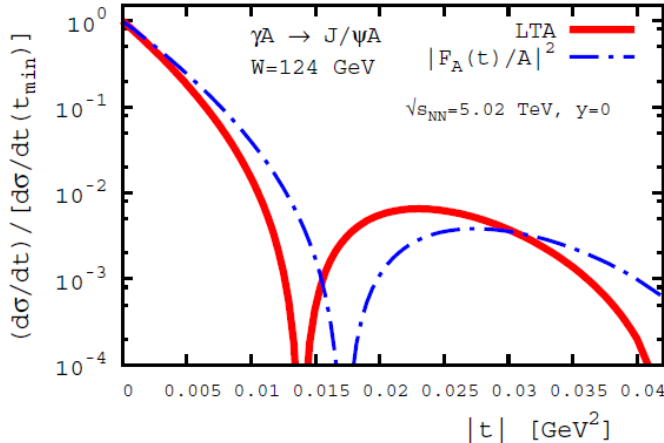
При малых  $x$ : согласие как с моделью LTA (глюонные экранировки), так и с моделями, основанными на эффектах насыщения глюонной плотности



# t-зависимость сечения фоторождения J/ψ

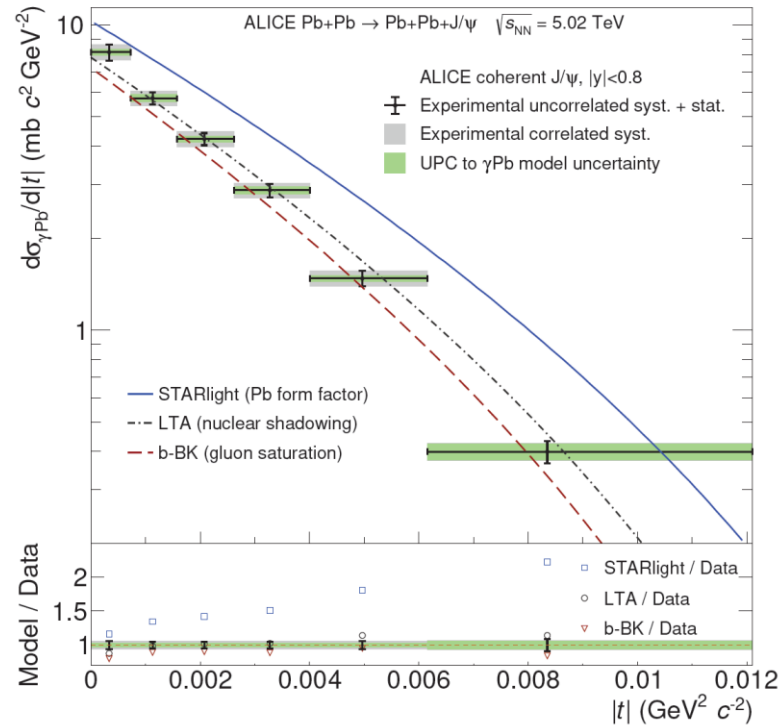


Guzey, Strikman, Zhalov PRC95 (2017) 025204



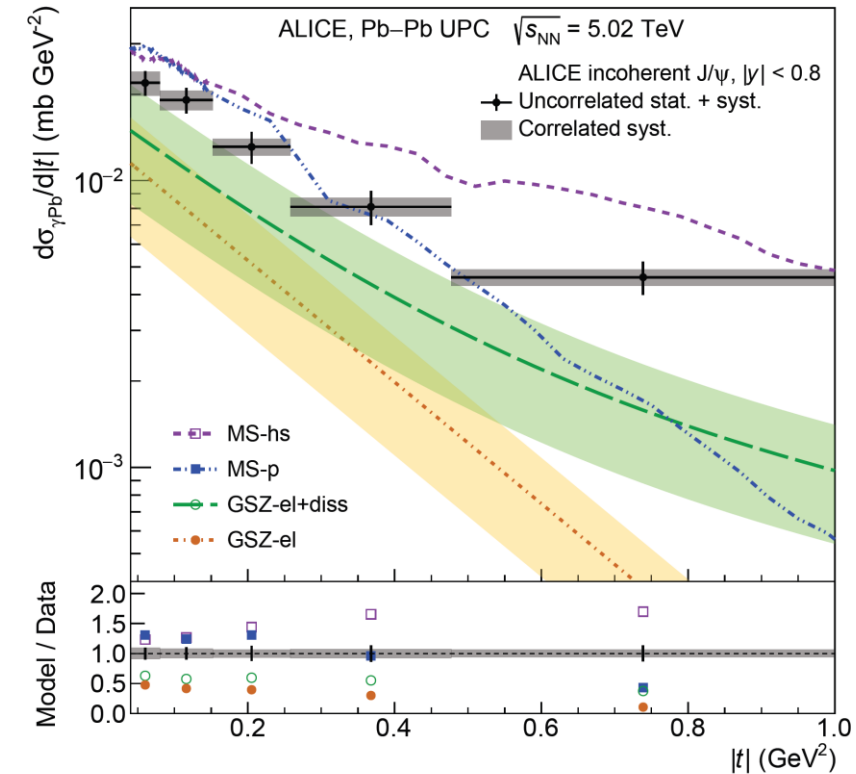
Измерение t-зависимости когерентного сечения позволяет изучать эффекты экранировок в поперечной плоскости

ALICE, JHEP 10 (2023) 119



$$|t| \approx p_T^2$$

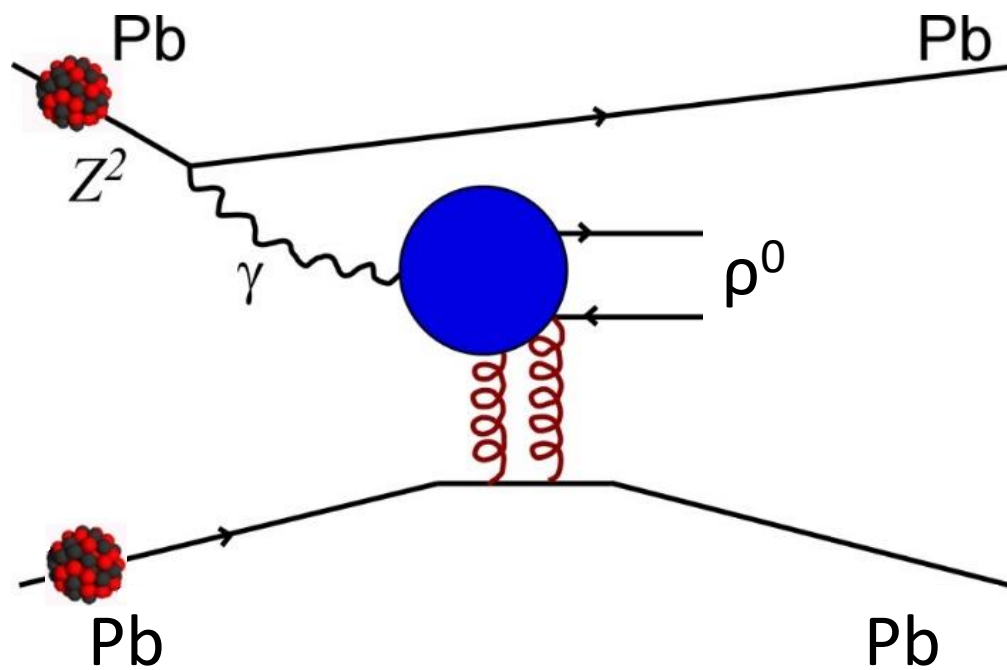
ALICE, PRL 132 (2024) 162302



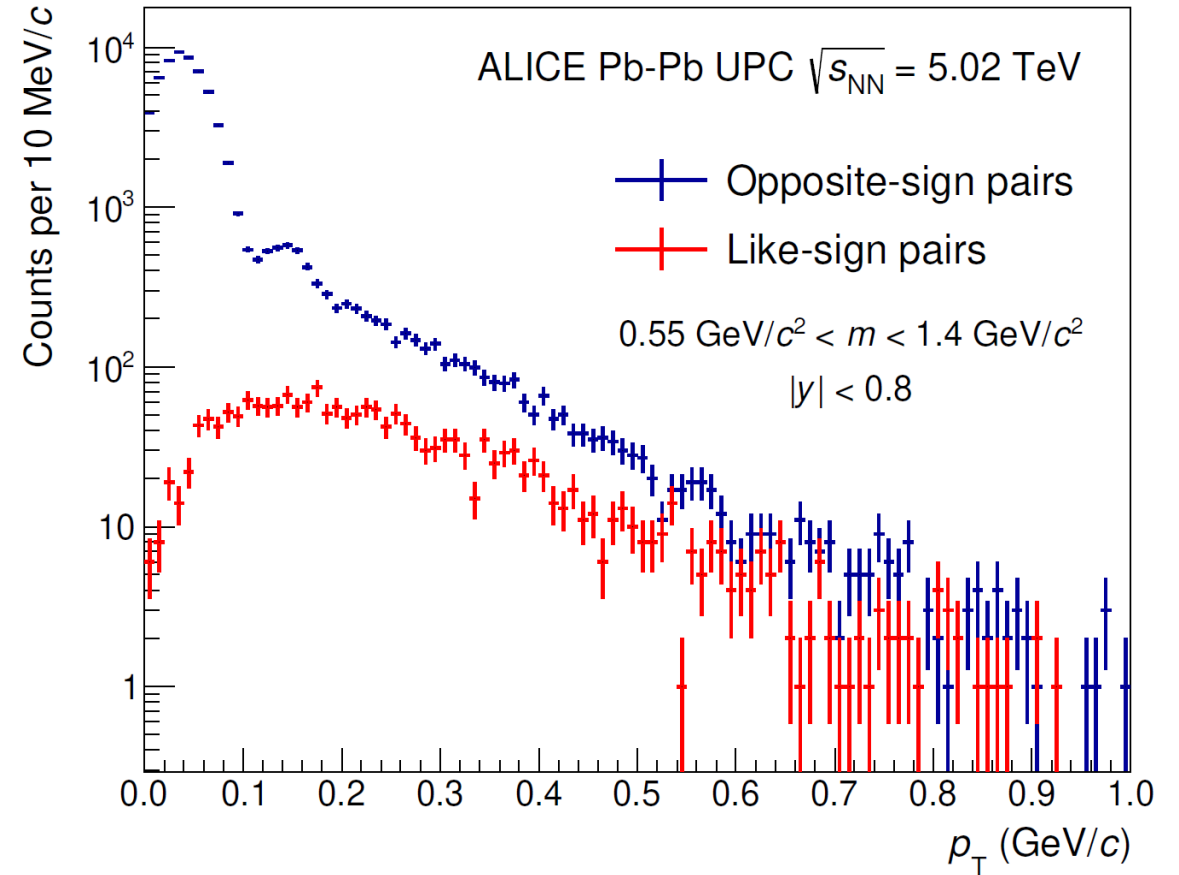
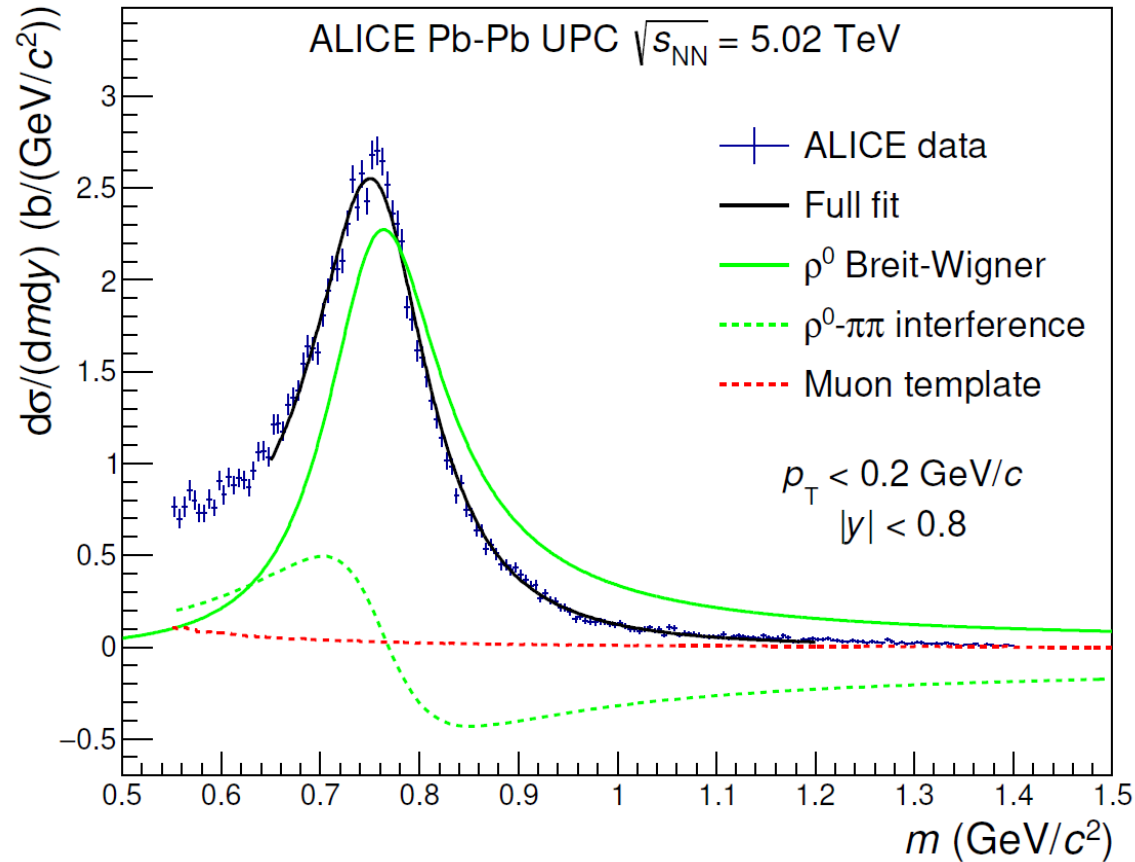
- Измеренная t-зависимость когерентного сечения значительно отклоняется от простой модели, определяемой квадратом форм-фактора
- Измеренная t-зависимость некогерентного сечения свидетельствует о важности учета дифракционного процесса, связанного с флуктуациями плотности партонов в ядрах

## Глава 5

### Фоторождение $\rho^0$ в Pb-Pb и Xe-Xe УПС



# Когерентное рождение $\rho^0$ в Pb-Pb @ 5.02 ТэВ



- Извлечение сечений  $\rho^0$  производится путем аппроксимации скорректированного на эффективность спектра по инвариантной массе с учетом интерференции с нерезонансным рождением  $\pi^+\pi^-$ :

$$\frac{d^2\sigma}{dm dy} = |A \cdot BW_\rho + B|^2 + M$$

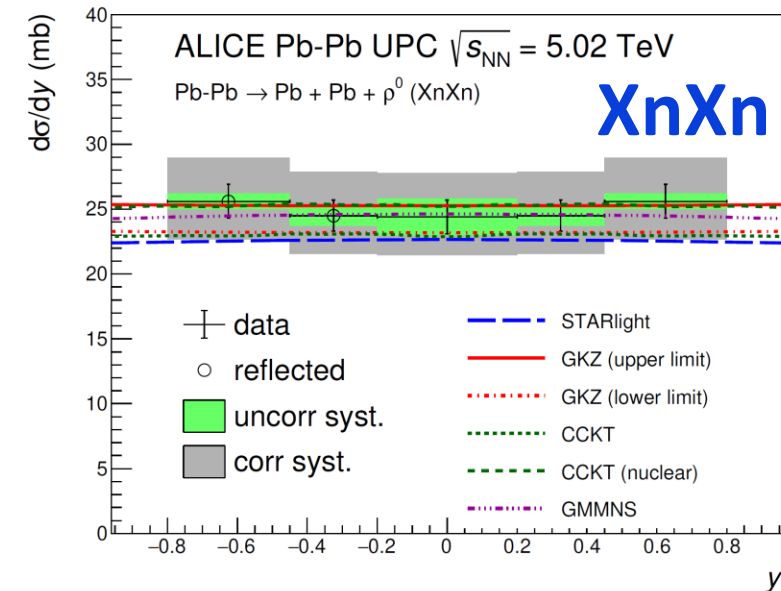
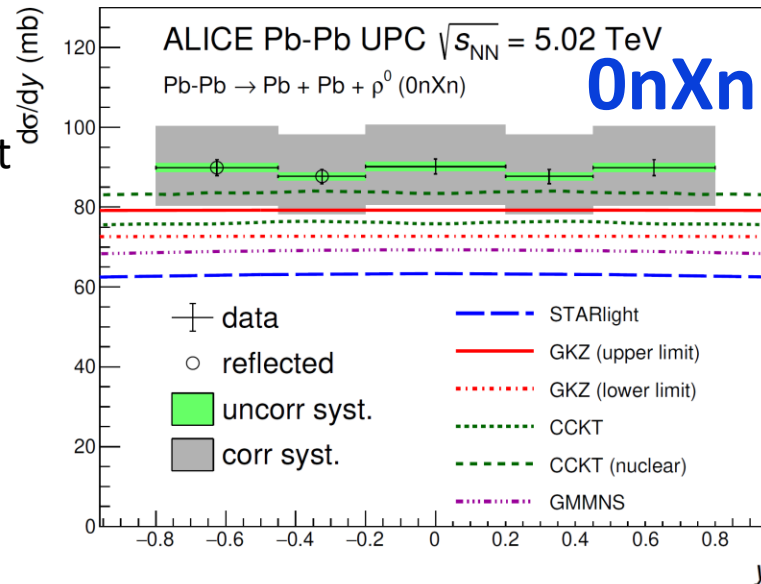
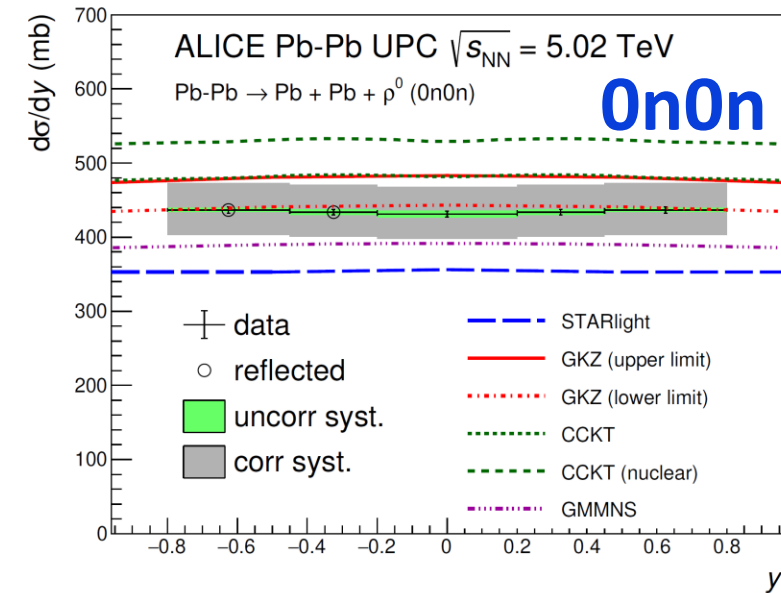
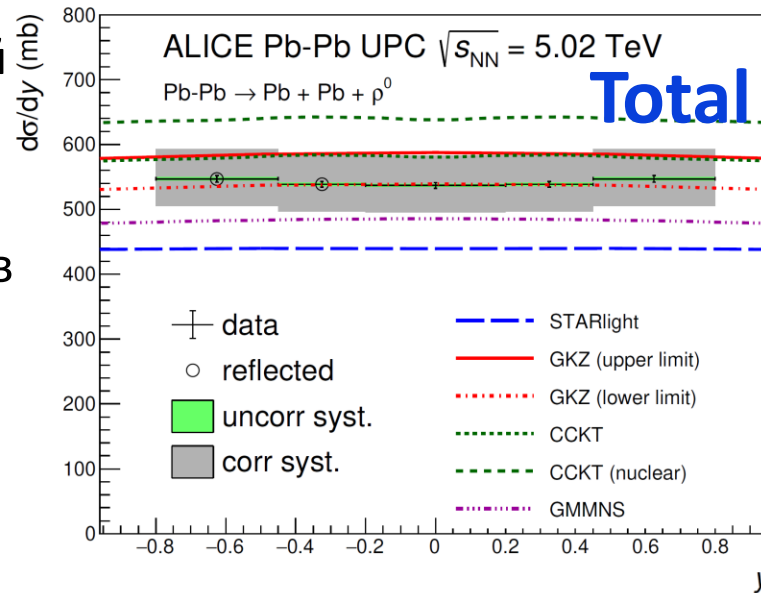
$$BW_\rho = \frac{\sqrt{m \cdot m_{\rho^0} \cdot \Gamma(m)}}{m^2 - m_{\rho^0}^2 + im_{\rho^0} \cdot \Gamma(m)}$$

# Сечение когерентного рождения $\rho^0$ в Pb-Pb @ 5.02 ТэВ

- Измерения проведены в центральной области быстрот для различных нейтронных классов
- Хорошее согласие с предсказаниями в модели Грибова-Глаубера

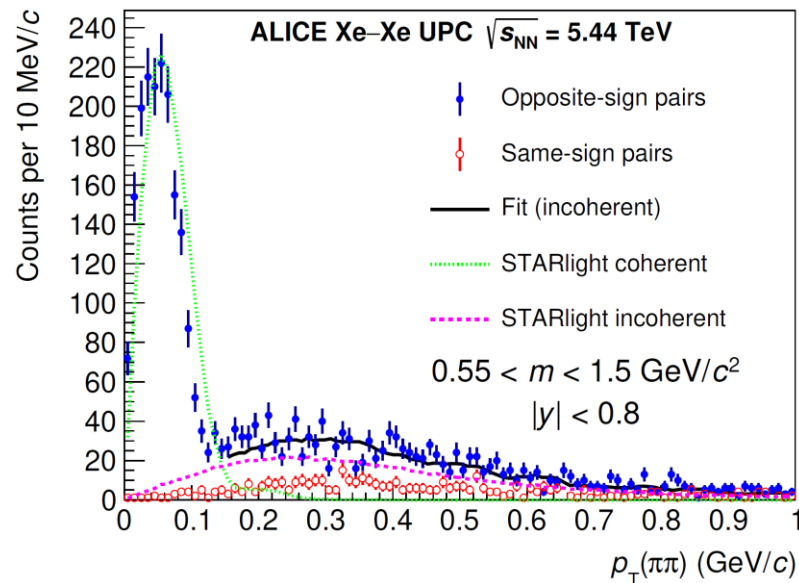
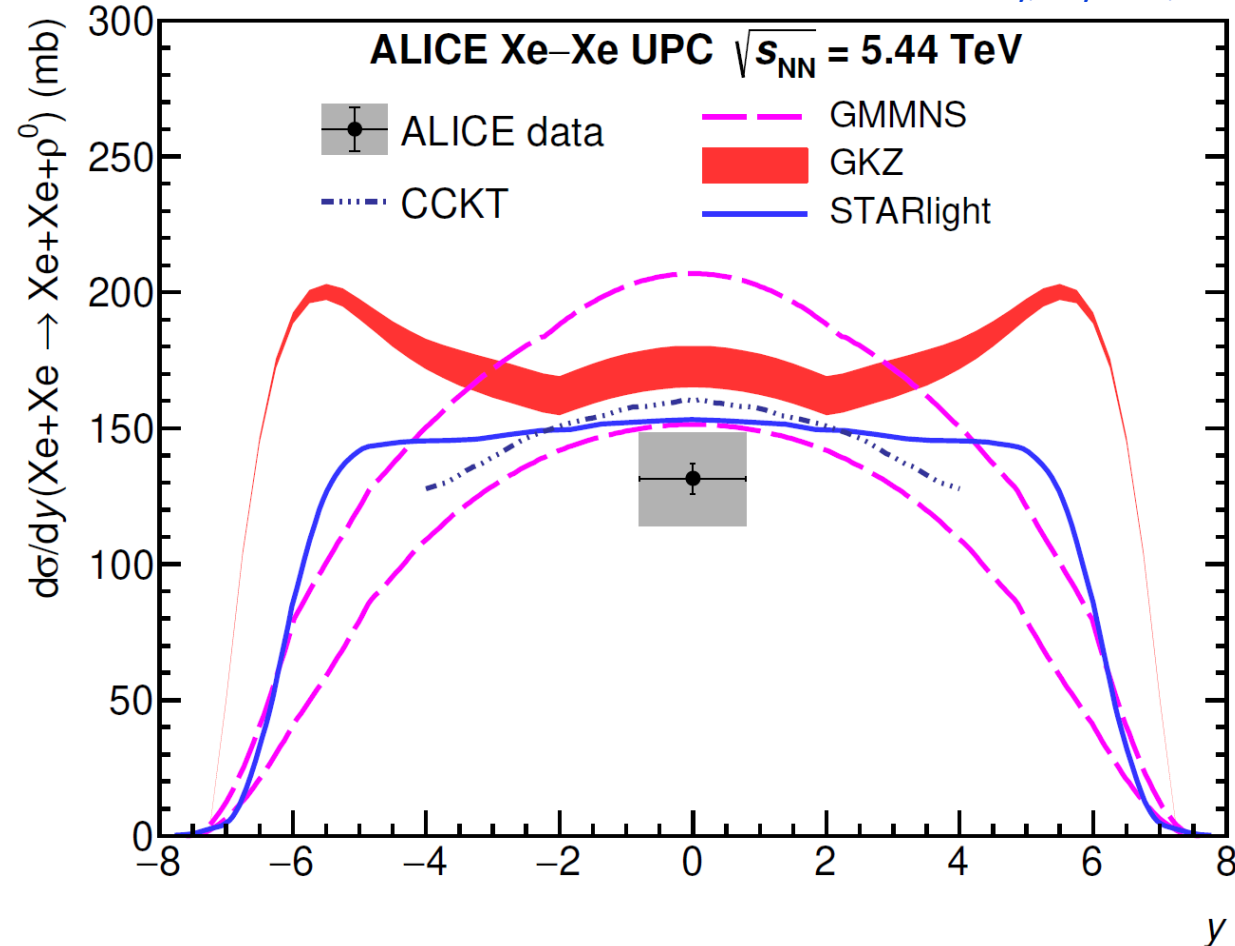
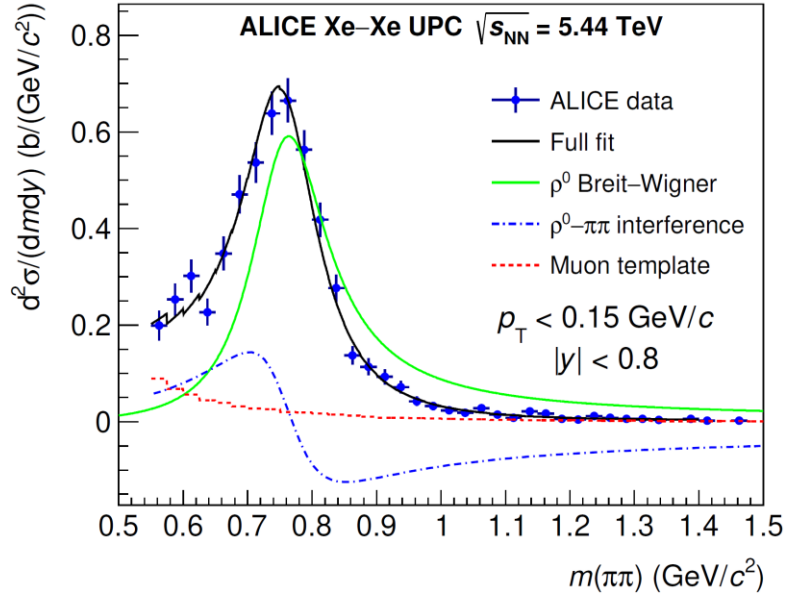
## Модели:

- **STARLIGHT: VDM + Glauber.** Klein, Nystrand et al: Comput. Phys. Commun. 212 (2017) 258
- **GKZ: VDM+Gribov-Glauber shadowing.** Frankfurt et al, PLB752 (2016) 51, Guzey, Kryshen, Zhalov, PRC93 (2016) 055206
- **GM CDM.** Gonçalves, Machado et al, PRC80 (2009), 054901, PRC91 (2015) 025203



# Сечение когерентного рождения $\rho^0$ в Xe-Xe

GKZ = Guzey, Kryshen, Zhalov, PLB 782 (2018) 251



- Измерения в коротком сеансе Xe-Xe столкновений 2017 года
- Предсказания в модели Грибова-Глаубера немного переоценивают измеренное сечение когерентного рождения  $\rho^0$  в Xe-Xe



# A-зависимость когерентного сечения фоторождения $\rho^0$

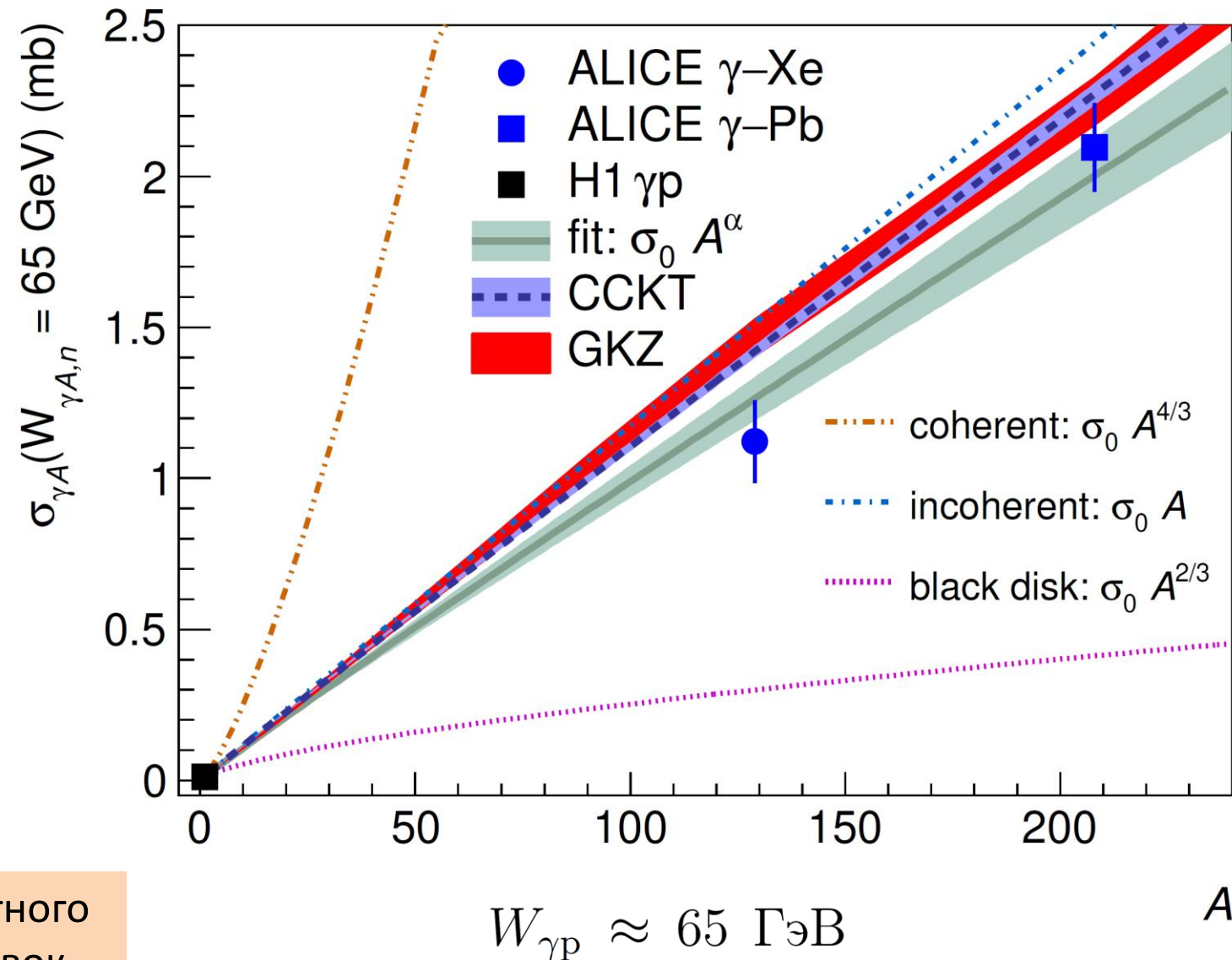
$$\sigma_{\gamma A \rightarrow A \rho^0}(W_{\gamma p}) = \frac{\sigma_{AA \rightarrow AA \rho^0}(y=0)}{2N_{\gamma A}(y=0)}$$

Измеренная зависимость:  $\alpha = 0.96 \pm 0.02$

Экстремальные случаи:

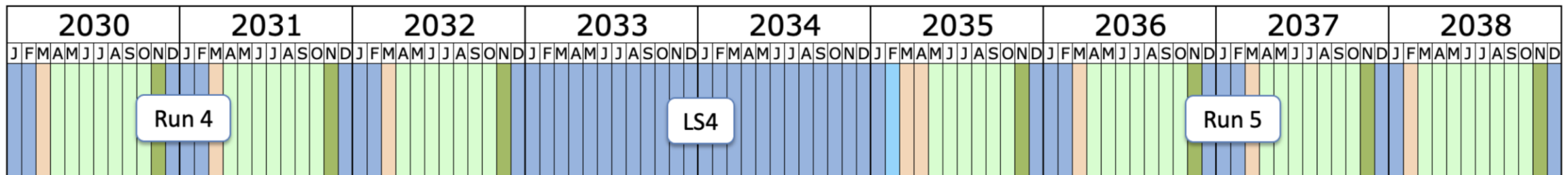
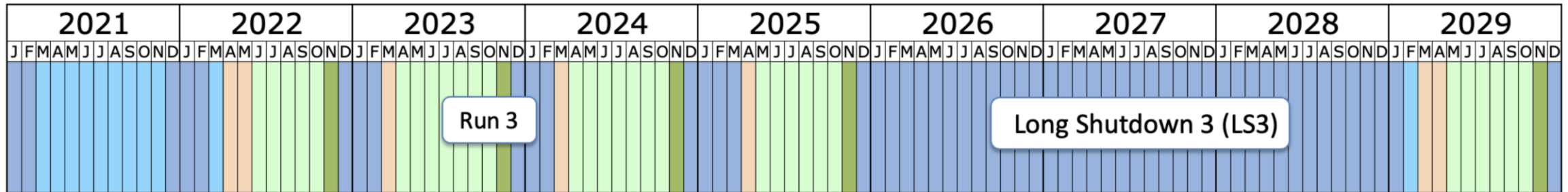
- $\alpha = 4/3$  – когерентное рождение без ядерных эффектов
- $\alpha = 2/3$  – режим черного диска

Значительное отклонение от чисто когерентного поведения => важность ядерных экранировок



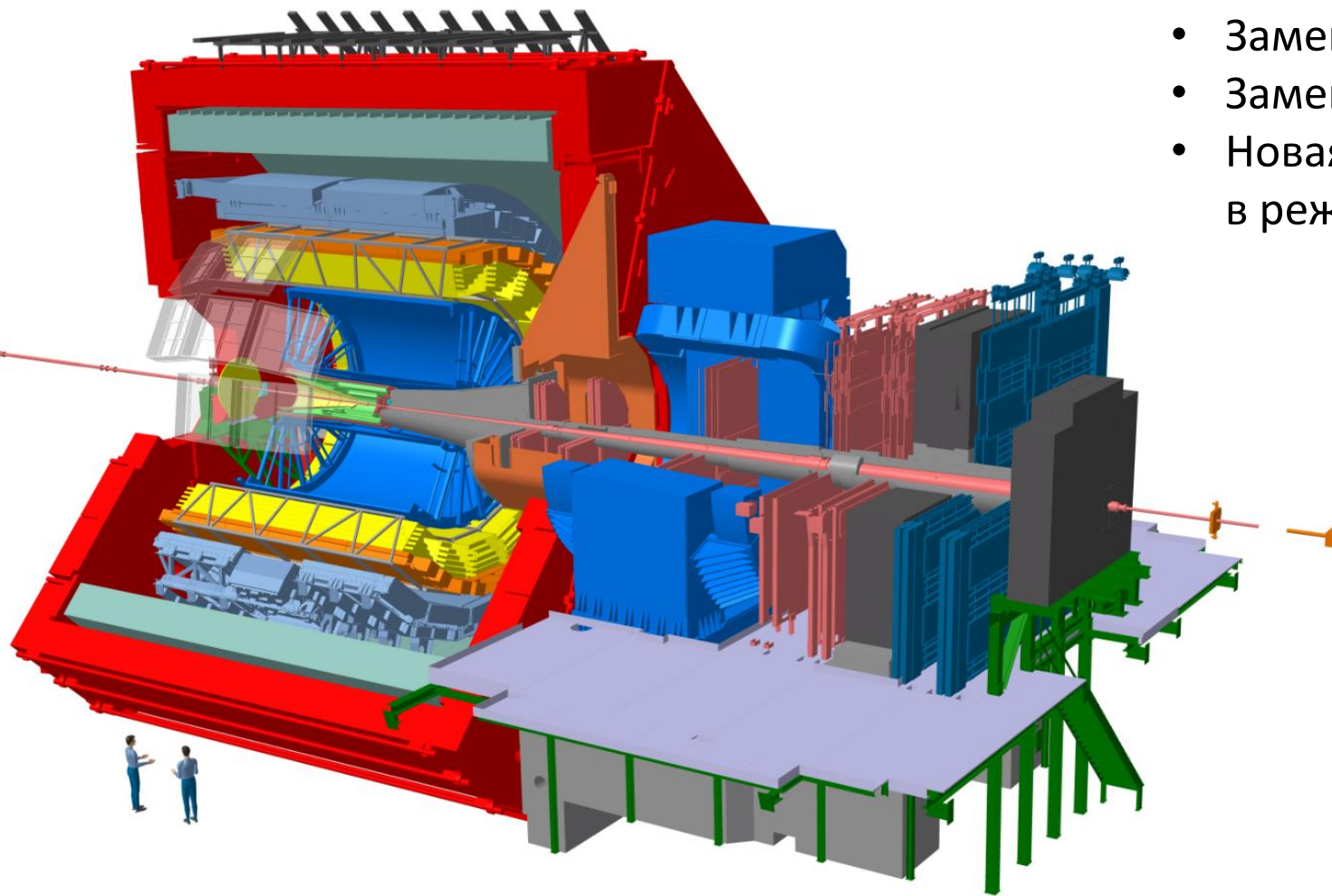
# Глава 6

## Перспективы измерений в УПС



# ALICE в Run 3 и Run 4

- Новая ITS (Inner Tracking System)
- Замена MWPC в TPC на GEM
- Замена форвардных детекторов (FIT)
- Новая система считывания данных и переход в режим непрерывного считывания



**Основная цель:** набрать 13/нб в сеансах Run 3-4 в режиме непрерывного считывания (x100 минимум-байас событий)

# Перспективы измерений УПС в сеансах Run 3 и Run 4

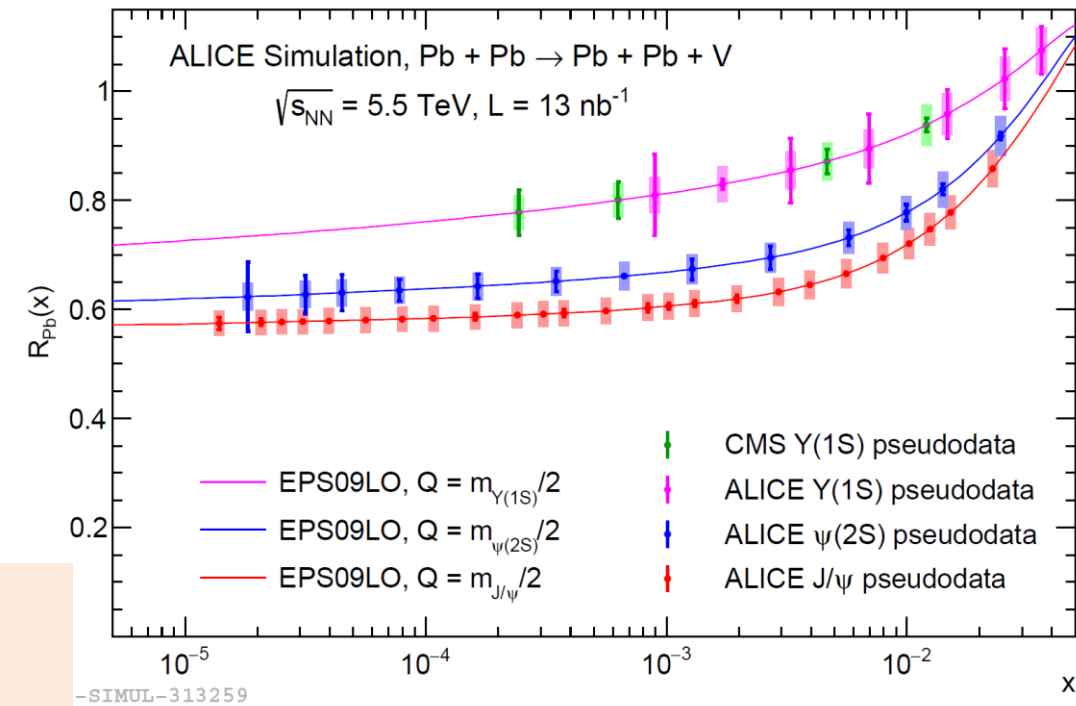
Ожидаемая статистика в Run 3-4 (13 /нб):

Канал распада	$\sigma$	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

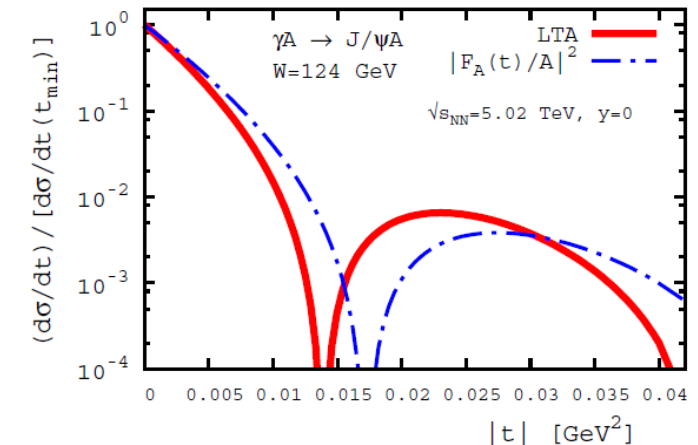
## Основные цели в Run 3-4:

- прецизионное измерение экранировок при малых  $x$
- изучение зависимости экранировок от  $Q^2$
- изучение экранировок в плоскости прицельных параметров
- фоторождение двухструйных событий и пар D-мезонов

Z. Citron, ..., E. Kryshen et al. CERN Yellow Rep. Monogr. 7 (2019) 1159

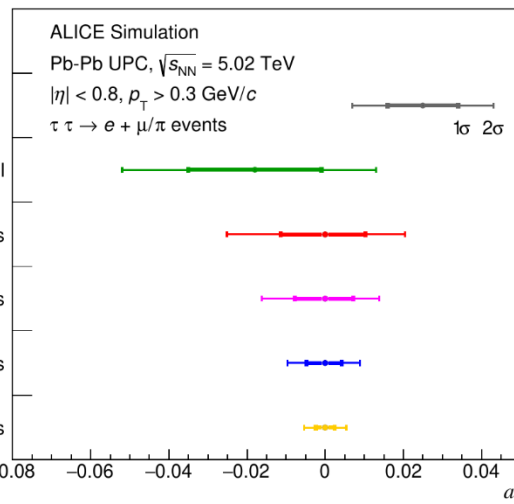
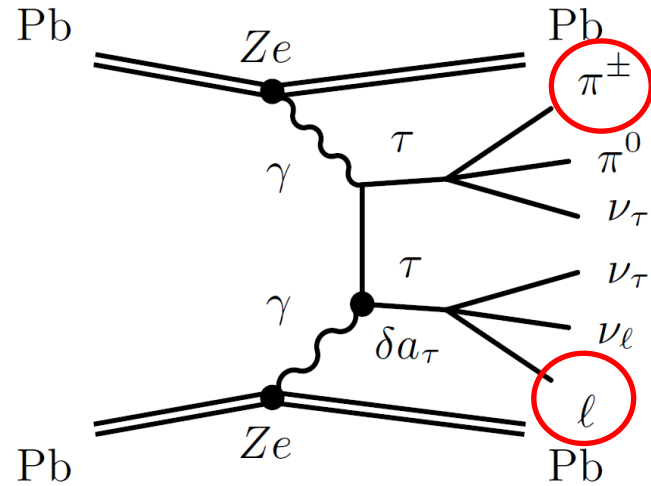


Guzey, Strikman, Zhilov PRC95 (2017) 025204

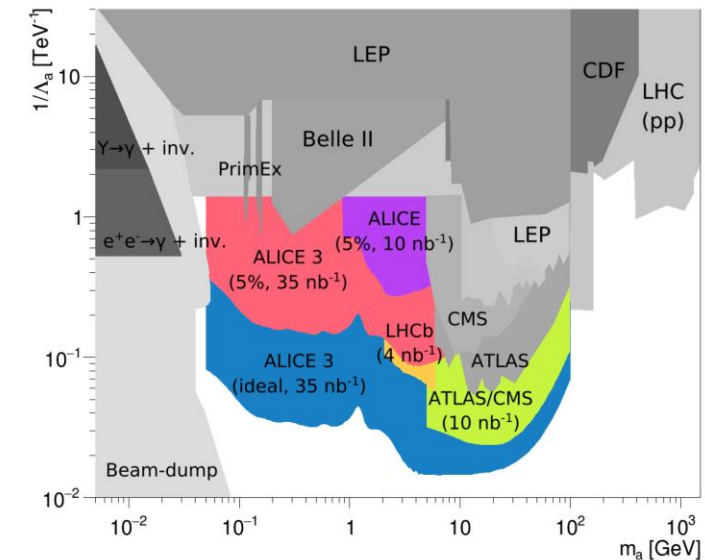
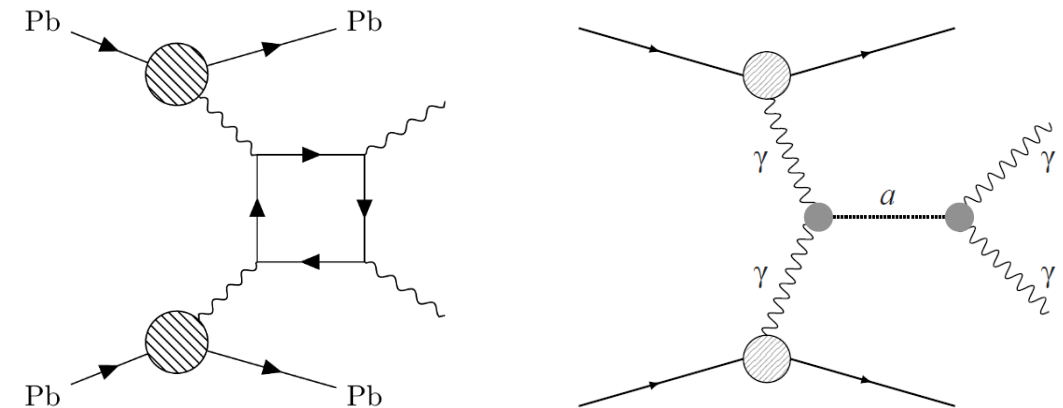


# Перспективы исследования фотон-фотонных процессов

Измерение  $a_\tau$



Измерение рассеяния света на свете и поиск аксионоподобных частиц



Burmasov, Kryshen et al. Phys. Part. Nucl. 54 (2023) 590

Burmasov, Kryshen et al. Comput.Phys.Commun. 277 (2022) 108388

ALICE 3 LOI, arXiv: 2211.02491

D. d'Enterria, ..., E. Kryshen, ... J. Phys. G50 (2023) 050501



# Публикации с ALICE Collaboration

1. B. Abelev, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Exclusive  $J/\psi$  photoproduction off protons in ultra-peripheral p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV. Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 232504.
2. S. Acharya, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Energy dependence of exclusive  $J/\psi$  photoproduction off protons in ultra-peripheral p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV. Eur. Phys. J. C79 (2019) 402.
3. S. Acharya, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Exclusive and dissociative  $J/\psi$  photoproduction, and exclusive dimuon production, in p-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$  TeV, Phys. Rev. D108 (2023) 112004
4. B. Abelev, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Coherent  $J/\psi$  photoproduction in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV. Phys. Lett. B718 (2013) 1273.
5. E. Abbas, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Charmonium and  $e^+e^-$  pair photoproduction at mid-rapidity in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV. Eur. Phys. J. C73 (2013) 2617.
6. J. Adam, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Coherent  $\psi(2S)$  photo-production in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV. Phys. Lett. B751 (2015) 358.
7. S. Acharya, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Coherent  $J/\psi$  photoproduction at forward rapidity in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV. Phys. Lett. B798 (2019) 134926.
8. S. Acharya, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Coherent  $J/\psi$  and  $\psi'$  photoproduction at midrapidity in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV. Eur. Phys. J. C81 (2021) 712.
9. S. Acharya, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), First measurement of the  $|t|$ -dependence of coherent  $J/\psi$  photonuclear production. Phys. Lett. B817 (2021) 136280.
10. S. Acharya, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Energy dependence of coherent photonuclear production of  $J/\psi$  mesons in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV. JHEP 10 (2023) 119.
11. J. Adam, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Coherent  $\rho^0$  photoproduction in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV. JHEP09 (2015) 095.
12. S. Acharya, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), First measurement of coherent  $\rho^0$  photoproduction in ultra-peripheral XeXe collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$  TeV. Phys. Lett. B820 (2021) 136481.
13. S. Acharya, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Coherent photoproduction of  $\rho^0$  vector mesons in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV. JHEP06 (2020) 035.
14. S. Acharya, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), ALICE luminosity determination for Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV. JINST 19 (2024) P02039
15. B. Abelev, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Measurement of visible cross sections in proton-lead collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV in van der Meer scans with the ALICE detector. JINST 9 (2014) P11003.
16. B. Abelev, ..., E. Kryshen et al. (ALICE collaboration) Performance of the ALICE Experiment at the CERN LHC, Int.J.Mod.Phys.A 29 (2014) 1430044

3 публикации по фоторождению  $J/\psi$  на протоне в p-Pb ПУПС

7 публикаций по фоторождению  $J/\psi$  и  $\psi(2S)$  в Pb-Pb УПС

3 публикации по фоторождению  $\rho^0$

Измерение видимых сечений для калибровки светимости

ALICE performance

# Публикации

17. V. Guzey, E. Kryshen, M. Strikman, and M. Zhalov. Evidence for nuclear gluon shadowing from the ALICE measurements of PbPb ultraperipheral exclusive  $J/\psi$  production. Phys. Lett. B726 (2013) 290.
18. V. Guzey, E. Kryshen, M. Strikman, and M. Zhalov. Nuclear suppression from coherent  $J/\psi$  photoproduction at the Large Hadron Collider. Phys. Lett. B816 (2021) 136202.
19. V. Guzey, E. Kryshen, and M. Zhalov. Coherent photoproduction of vector mesons in ultraperipheral heavy ion collisions: Update for run 2 at the CERN Large Hadron Collider. Phys. Rev. C93 (2016) 055206.
20. V. Guzey, E. Kryshen, and M. Zhalov. Photoproduction of light vector mesons in XeXe ultraperipheral collisions at the LHC and the nuclear density of Xe-129. Phys. Lett. B782 (2018) 251.
21. V. Guzey, E. Kryshen, and M. Zhalov. Incoherent  $\rho$  meson photoproduction in ultraperipheral nuclear collisions at the CERN Large Hadron Collider. Phys. Rev. C102 (2020) 015208.
22. E. Kryshen, M. Strikman, and M. Zhalov. Photoproduction of  $J/\psi$  with neutron tagging in ultraperipheral collisions of nuclei at RHIC and at the LHC. Phys. Rev. C108 (2023) 024904.
23. Z. Citron, ..., E. Kryshen et al. Report from Working Group 5: Future physics opportunities for high-density QCD at the LHC with heavy-ion and proton beams. CERN Yellow Rep. Monogr. 7 (2019) 1159.
24. N. Burmasov, E. Kryshen, P. Bühler, and R. Lavicka. Upcgen: A Monte Carlo simulation program for dilepton pair production in ultra-peripheral collisions of heavy ions. Comput. Phys. Commun., 277 (2022) 108388.
25. N. Burmasov, E. Kryshen, P. Bühler, and R. Lavicka. Feasibility Studies of Tau-Lepton Anomalous Magnetic Moment Measurements in Ultraperipheral Collisions at the LHC. Phys. Part. Nucl. 54 (2023) 590.
26. D. d'Enterria, ..., E. Kryshen et al. Opportunities for new physics searches with heavy ions at colliders. J. Phys. G50 (2023) 050501.
27. E. Kryshen. Heavy Vector Meson Photoproduction in Ultra-peripheral Collisions at the LHC. Acta Phys. Polon. B 50 (2019) 1095.
28. E. Kryshen. Photoproduction of heavy vector mesons in ultra-peripheral Pb-Pb collisions. Nucl. Phys. A967 (2017) 273.

6 публикаций в коллаборации с В. Гузеем, М. Стрикманом и М. Жаловым: расчеты по фоторождению векторных мезонов в УПС

4 публикации по перспективам измерений в УПС в будущих сеансах

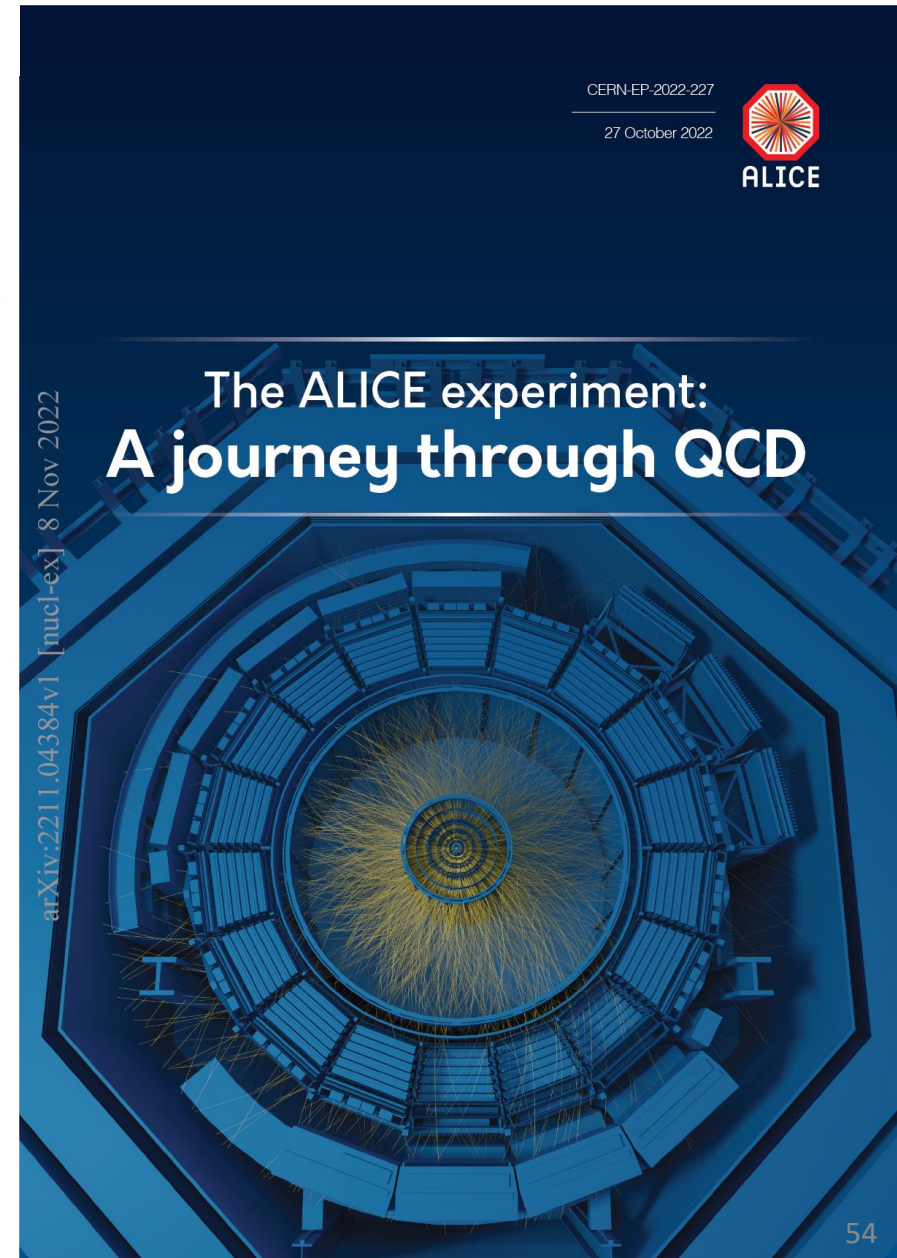
Обзоры по УПС

+7 публикаций в материалах конференций и др.

# A journey through QCD

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>The quark–gluon plasma and its properties</b>	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>High-density QCD effects in proton–proton and proton–nucleus collisions</b>	<b>147</b>
<b>4</b>	<b>The initial state of the collision</b>	<b>170</b>
4.1	Electroweak-boson measurements . . . . .	171
4.2	Photon-induced processes in heavy-ion collisions . . . . .	172
4.3	Multiplicity and flow measurements . . . . .	177
4.4	Conclusions . . . . .	181
<b>5</b>	<b>Nuclear physics at the LHC: (anti)nuclei formation and hadron–hadron interactions</b>	<b>184</b>
<b>6</b>	<b>QCD studies with high-<math>Q^2</math> processes in pp collisions</b>	<b>198</b>
<b>7</b>	<b>ALICE contributions beyond QCD physics and synergies of heavy-ion physics with other fields</b>	<b>213</b>
<b>8</b>	<b>Summary</b>	<b>225</b>
<b>9</b>	<b>Outlook: ALICE detector and physics for the next two decades</b>	<b>230</b>

[ALICE, arXiv:2211.04384](https://arxiv.org/abs/2211.04384), Accepted to EPJC.



# Апробация: 23 доклада на конференциях

- Overview of recent ALICE results. XXXV [International Workshop on High Energy Physics](#) (Protvino, Russia, 29 Nov 2023).
- Overview of recent ALICE results. XXI [Lomonosov](#) Conference (Moscow, Russia, 26 Aug 2023).
- Recent ALICE results on photon-induced interactions. 13th International workshop on [Multiple Partonic Interactions](#) at the LHC (15 Nov 2022, Madrid, Spain).
- ALICE performance highlights. [LHCP 2022](#) conference. (16 May 2022, Taipei, Taiwan).
- Overview of recent heavy-ion collision results from ALICE. [ICPPA 2022](#). (2 December 2022, Moscow, Russia).
- Feasibility of tau g-2 measurements in ultra-peripheral collisions of heavy ions. The 16th International [Workshop on Tau Lepton Physics](#) (TAU2021). 1 October 2021
- ALICE 3 potential for light-by-light and UPC measurements. ALICE workshop on a next-generation heavy-ion experiment for LHC Run 5 and beyond: [ALICE3](#). 18 June 2021
- Light-by-light measurements, axion-like particle searches and tau g-2 constraints with ultra-peripheral collisions. [EMMI Rapid Reaction Task Force](#) workshop (14 Sep 2021).
- Recent ALICE results on coherent J/ψ photoproduction in ultra-peripheral Pb-Pb collisions. XXVII Int. Workshop on [Deep Inelastic Scattering](#) (Torino, Italy, 10 Apr 2019).
- Heavy vector meson photoproduction in ultra-peripheral collisions at the LHC. XXV [EPIPHANY Conference](#) On Advances In Heavy Ion Physics (Cracow, Poland, 11 Jan 2019).
- QCD at forward rapidity, in ultra peripheral collisions, and multi parton interactions. [LHCP](#) conference (Bologna, Italy, 5 June 2018).
- Overview of ALICE results on ultra-peripheral collisions. XXIV International [Baldin Seminar](#) on High Energy Physics Problems (Dubna, Russia, 20 September 2018).
- ALICE results on VM photoproduction in ultraperipheral p-Pb and Pb-Pb collisions. Probing QCD in Photon-Nucleus Interactions at RHIC and LHC (Seattle, USA, 13 Feb 2017).
- Photoproduction of heavy vector mesons in ultra-peripheral Pb-Pb collisions. [Quark Matter 2017](#) (Chicago, USA, 7 January 2017).
- First look at 13 TeV and highlights from the most recent analyses. Large Hadron Collider Physics Conference [LHCP 2015](#) (Saint-Petersburg, Russia, 31 August 2015).
- Overview of recent ALICE results. The XXII International Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory, [QFTHEP 2015](#) (Samara, 30 June 2015).
- ALICE results on charmonium photoproduction in p-Pb and Pb-Pb collisions. [PDF4LHC](#) meeting. (CERN, Geneva, 3 November 2014).
- ALICE results on vector meson photoproduction in ultra-peripheral p-Pb and Pb-Pb collisions. [PANIC 2014](#) (Hamburg, 24--29 August 2014).
- ALICE status and perspectives on photoproduction and diffractive processes in pA and AA collisions. [First Sapore Gravis Workshop](#) (Nantes, 2--5 December, 2013).
- Overview of ALICE results. International conference: "[New trends in High Energy Physics 2013](#)" (Alushta, Ukraine, September 23-29, 2013).
- Diffraction and ultra-peripheral collisions at ALICE. International conference "[Rencontres de Moriond: QCD and High Energy Interactions](#)" (La Thuile, Italy, 9 March, 2013).
- Ultra-peripheral collisions with ALICE. International workshop "[Results and prospects of forward physics at the LHC](#)" (CERN, Switzerland, 11 February, 2013).
- ALICE status and plans. International workshop "[LHC on the March](#)" (Protvino, Russia, 20-- November, 2012).



# Апробация: 7 докладов на семинарах

---

- ALICE Status Report. 145th [LHCC Meeting](#) - OPEN Session. 3 March 2021
- Shedding light on hadron structure with ultra-peripheral collisions. [EMMI NQM Seminar](#). (Darmstadt, Germany, 7 February 2019).
- Shedding light on hadron structure with ultra-peripheral collisions in ALICE. [CERN LHC Seminar](#) (Geneva, Switzerland, 18 June 2019).
- Ultraperipheral collisions at the LHC. [EMMI Physics day 2017](#). (Darmstadt, Germany, 28 November 2017).
- $J/\psi$  photoproduction in pp, p-Pb and Pb-Pb collisions at LHC. [Collider Cross Talk](#) (CERN, Geneva, 13 March 2014)
- Recent ALICE results on Pb-Pb and p-Pb ultraperipheral collisions. [CERN LHC seminar](#) (Geneva, December 17, 2013).



# Личный вклад

## Участие в работе коллаборации:

- 2012-2016 – координатор триггерной системы ALICE
- 2017-2019 – координатор физической рабочей группы по УПС, дифракции и космике
- 2014 – н.в. – координатор группы по отбору событий
- 2019 – н.в. - член координационного совета группы подготовки данных
- 2021 – н.в. – член комитета по конференциям (по УПС, дифракции и космике)
- 2021-2022 – ответственный за написание главы по начальному состоянию (УПС и т.д.) в обзорной статье ALICE

## Активное участие в анализе и интерпретации данных:

- формирование триггерной стратегии
- стратегия и ПО для расчета светимости, включая эффективность вето (2 внутренние ноты)
- алгоритмы и ПО для определения триггерной эффективности SPD и TOF (внутренняя нота)
- подготовка Монте-Карло данных
- анализ спектров по инвариантной массе и поперечному импульсу, расчет сечений, анализ погрешностей
- участие в комитетах по написанию и внутреннему рецензированию статей (14 статей)

## Разработка программы исследований для будущих сеансов

- Разработка стратегии извлечения глюонных экранировок и ожидаемых погрешностей в Run 3-4 → Yellow Report
- Анализ возможностей измерения аномального магнитного момента тау-лептона в УПС (с Н. Бурмасовым)
- Анализ возможностей измерения сечения рассеяния света на свете и поиска аксионов (с Н. Бурмасовым) → ALICE 3 LOI

## Участие в проведении теоретических расчетов в коллаборации с В. Гузеем, М. Жаловым и М. Стрикманом:

- Формирование стратегии извлечения фактора глюонных экранировок из сечений в УПС
- Анализ данных по фоторождению векторных мезонов на протоне, расчеты в импульсном приближении
- Расчеты с использованием параметризации EPS09 и т.д.

## Рецензент в PLB, EPJC, JHEP и NPA по тематике ультрапериферических столкновений

# Научная новизна

- В представленном цикле работ сечения фоторождения тяжелых векторных мезонов были впервые измерены с использованием ультрапериферических столкновений.
- В ультрапериферических p-Pb столкновениях впервые измерены сечения эксклюзивного фоторождения J/ψ на протоне. По сравнению с результатами по фоторождению J/ψ, полученными на коллайдере HERA, диапазон энергий расширен более чем в два раза. Степенная зависимость сечения, измеренная вплоть до энергии фотон-протонных столкновений ~700 ГэВ, свидетельствует об отсутствии явных сигналов насыщения глюонных плотностей вплоть до бьеркеновских x ~ 10<sup>-5</sup>.
- Когерентное сечение фоторождения J/ψ впервые измерено на ядрах свинца в широком диапазоне энергий от 20 до 800 ГэВ. Из измеренных факторов подавления J/ψ впервые получено надежное экспериментальное свидетельство о значительных эффектах глюонных экранировок при малых x ~ 10<sup>-5</sup>.
- Впервые измерено сечение рождения ρ-мезонов в ультрапериферических Pb-Pb и Xe-Xe столкновениях и исследована A-зависимость сечения когерентного фоторождения ρ-мезонов. Наблюдаемое подавление сечений по сравнению с импульсным приближением свидетельствует о важности учета грибовских экранировок.
- Разработанные в проведенном цикле работ методики обработки экспериментальных данных широко используются в экспериментах на БАК для анализа УПС. Выполненные измерения позволяют проверить предсказания различных моделей фоторождения векторных мезонов на протонах и ядрах.

# На защиту выносятся следующие положения (1)

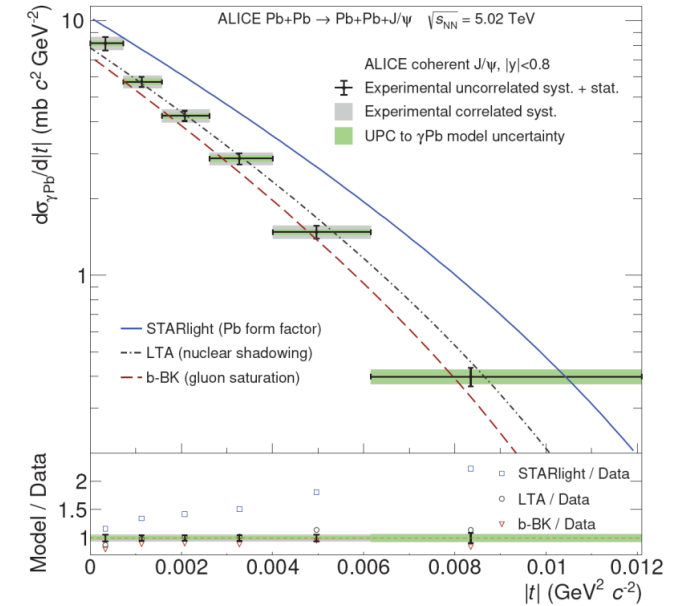
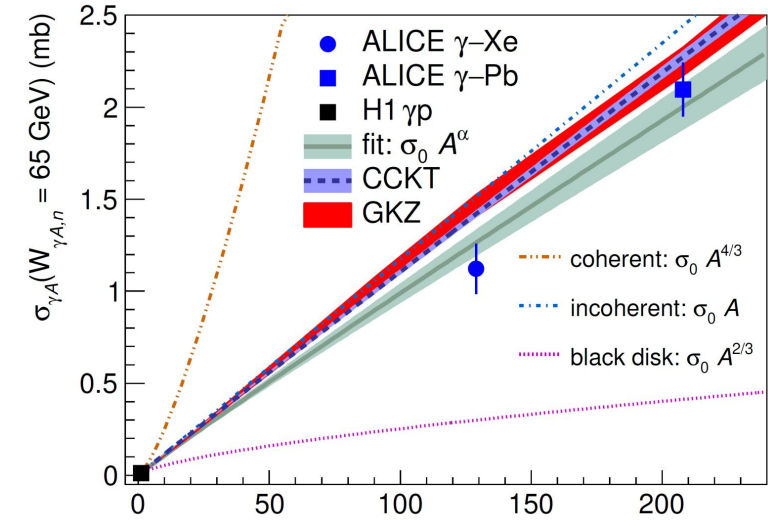
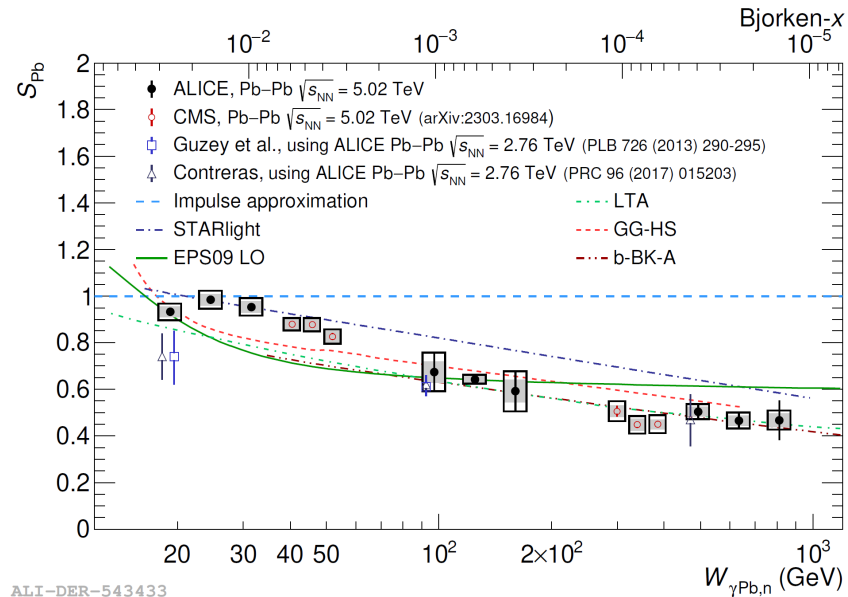
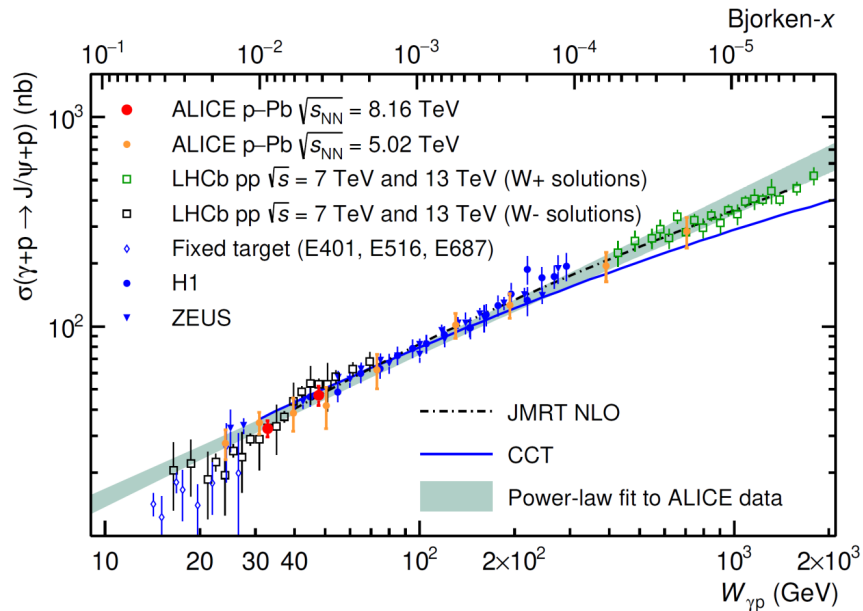
- Результаты расчетов сечений когерентного и некогерентного фоторождения тяжелых векторных мезонов в зависимости от быстроты и квадрата переданного импульса в ультрапериферических Pb-Pb столкновениях в приближении лидирующих твистов.
- Результаты расчетов сечений когерентного и некогерентного фоторождения легких векторных мезонов в зависимости от быстроты в ультрапериферических Pb-Pb столкновениях в формализме Грибова-Глаубера.
- Методика извлечения глюонных экранировок из экспериментальных измерений когерентного рождения тяжелых векторных мезонов в ультрапериферических столкновениях.
- Результаты измерений энергетической зависимости сечений эксклюзивного фоторождения  $J/\psi$  на протоне в диапазоне энергий от 20 до 700 ГэВ, извлеченные из сечений рождения  $J/\psi$  в зависимости от быстроты в ультрапериферических p-Pb столкновениях. Измеренные сечения свидетельствуют об отсутствии явных сигналов насыщения глюонных плотностей вплоть до бьеркеновских  $x \sim 10^{-5}$ .
- Результаты измерений сечения когерентного рождения  $J/\psi$  в центральной и форвардной области быстрот в ультрапериферических Pb-Pb столкновениях при энергии 5.02 ТэВ. Расчеты в приближении лидирующих твистов находятся в согласии с измеренными сечениями в широкой области быстрот, кроме промежуточной области  $y \sim 2.5$ , где измеренные сечения оказываются значительно выше предсказаний.
- Результаты измерений сечения когерентного рождения  $\psi(2S)$  мезонов в ультрапериферических Pb-Pb столкновениях при энергии 5.02 ТэВ, свидетельствующих о том, что эффекты ядерного подавления оказываются близкими по величине для 1S и 2S состояний чармония.

# На защиту выносятся следующие положения (2)

- Результаты измерений сечения когерентного рождения  $J/\psi$  в ультрапериферических Pb-Pb столкновениях при энергии 5.02 ТэВ, сопровождающихся дополнительным обменом фотонами и диссоциацией одного или обоих сталкивающихся ядер. Из измеренных сечений извлечена энергетическая зависимость сечений когерентного фоторождения  $J/\psi$  мезонов вплоть до энергий  $\sim 800$  ГэВ и фактор ядерного подавления, который можно использовать в качестве фактора глюонных экранировок в широком диапазоне бьеркеновских  $x$  от  $10^{-2}$  до  $10^{-5}$  на масштабе  $\mu^2 \sim 3$  ГэВ<sup>2</sup>.
- Результаты измерений  $t$ -зависимости сечений когерентного фоторождения  $J/\psi$  в ультрапериферических Pb-Pb столкновениях, которые можно использовать для исследования эффектов подавления глюонной плотности в плоскости прицельных параметров. Результаты согласуются с предсказаниями в рамках приближения лидирующих твистов.
- Результаты измерений  $t$ -зависимости сечений некогерентного фоторождения  $J/\psi$  в ультрапериферических Pb-Pb столкновениях, которые свидетельствуют о важности учета флуктуаций плотности партонов в ядрах.
- Результаты измерений сечения когерентного рождения  $\rho$ -мезонов в ультрапериферических Pb-Pb столкновениях при энергии 5.02 ТэВ и Xe-Xe столкновениях при энергии 5.44 ТэВ. Измеренные сечения находятся в согласии с расчетами в рамках модели Грибова-Глаубера, что свидетельствует о важности учета грибовских экранировок. Измерения сечений фоторождения  $\rho$ -мезонов, сопровождающихся дополнительным обменом фотонами и диссоциацией одного или обоих сталкивающихся ядер, находятся в хорошем согласии с предсказаниями моделей.
- Результаты расчетов ожидаемых статистических и систематических погрешностей факторов ядерного подавления для  $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$  и  $\Upsilon(1S)$  мезонов, которые могут быть измерены в ультрапериферических Pb-Pb столкновениях в будущих сеансах работы Большого Адронного Коллайдера.

# Основные результаты

- Рассчитаны сечения фоторождения векторных мезонов в УПС
- Измерены сечения фоторождения  $J/\psi$  на протоне
- Измерены сечения фоторождения  $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$  на ядрах
- Извлечен фактор ядерной модификации для фоторождения  $J/\psi$  на ядрах
- Измерена  $t$ -зависимость сечений фоторождения  $J/\psi$
- Измерены сечения фоторождения  $\rho$ -мезонов на ядрах



ALI-DER-543433

A



**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, in various shades of blue and cyan, extend from the center towards the edges of the frame. The overall effect is one of depth and energy, with a strong sense of perspective as if looking down a long, brightly lit corridor.

# Значимость

- Проведенные измерения сечений фоторождения тяжелых векторных мезонов и глюонных экранировок являются критически важными для точного описания начального состояния ядро-ядерных столкновений и интерпретации всех измерений, проводимых в столкновениях тяжелых ионов на БАК. В частности, точность описания жестких процессов сильно зависит от продольного распределения импульсов глюонов внутри ядра, описываемых глюонными функциями распределения, а распределение и флуктуации глюонной плотности в плоскости прицельных параметров важны для правильной интерпретации наблюдаемых величин, связанных с азимутальной анизотропией импульсов частиц и многочастичными корреляциями.
- Проведенные измерения сечений фоторождения  $\rho$ -мезонов свидетельствуют о важности учета грибовских экранировок в столкновениях ядер при высоких энергиях.
- Разработанные методики изучения процессов фоторождения векторных мезонов в ультрапериферических столкновениях оказываются востребованными и в других измерениях, например в исследованиях фотон-фотонных взаимодействий в УПС тяжелых ионов и измерениях центральных дифракционных событий в протон-протонных столкновениях. Проведенные исследования возможных измерений фотон-протонных, фотон-ядерных и фотон-фотонных взаимодействий в будущих сеансах работы БАК необходимы для планирования работы эксперимента ALICE и стратегии анализа данных.

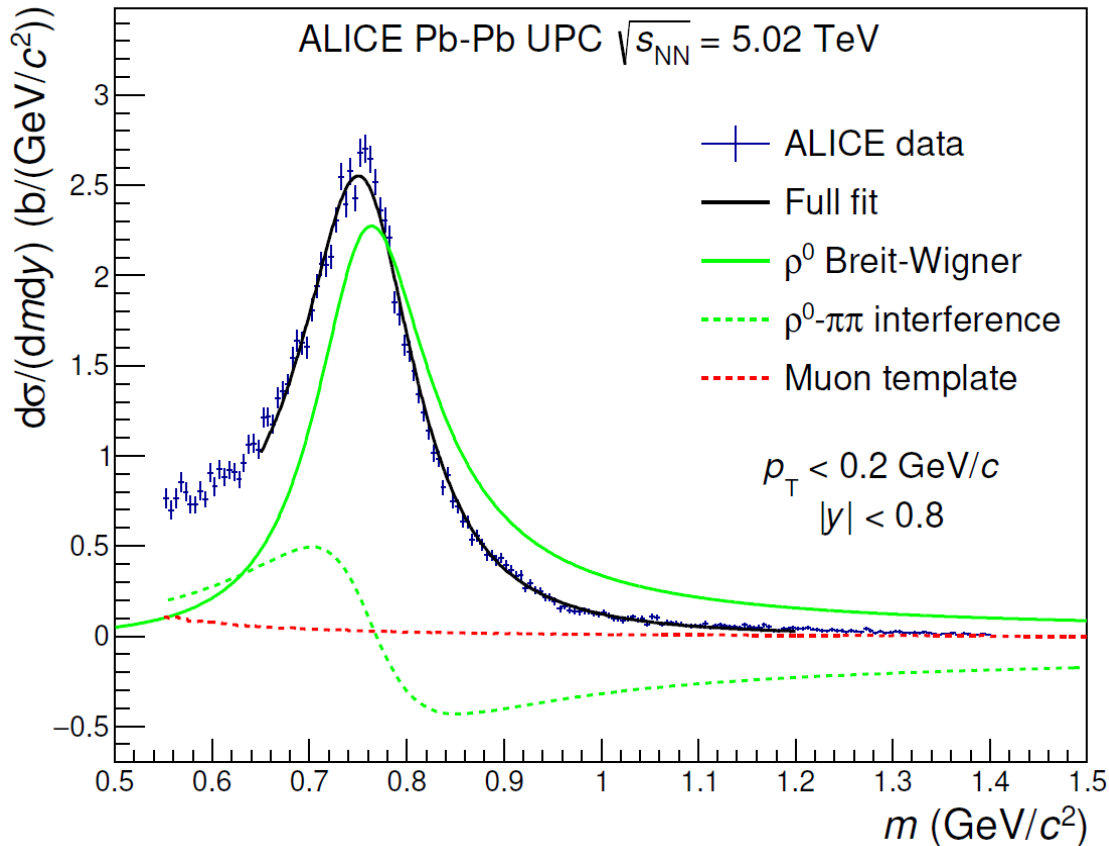
# Достоверность

---

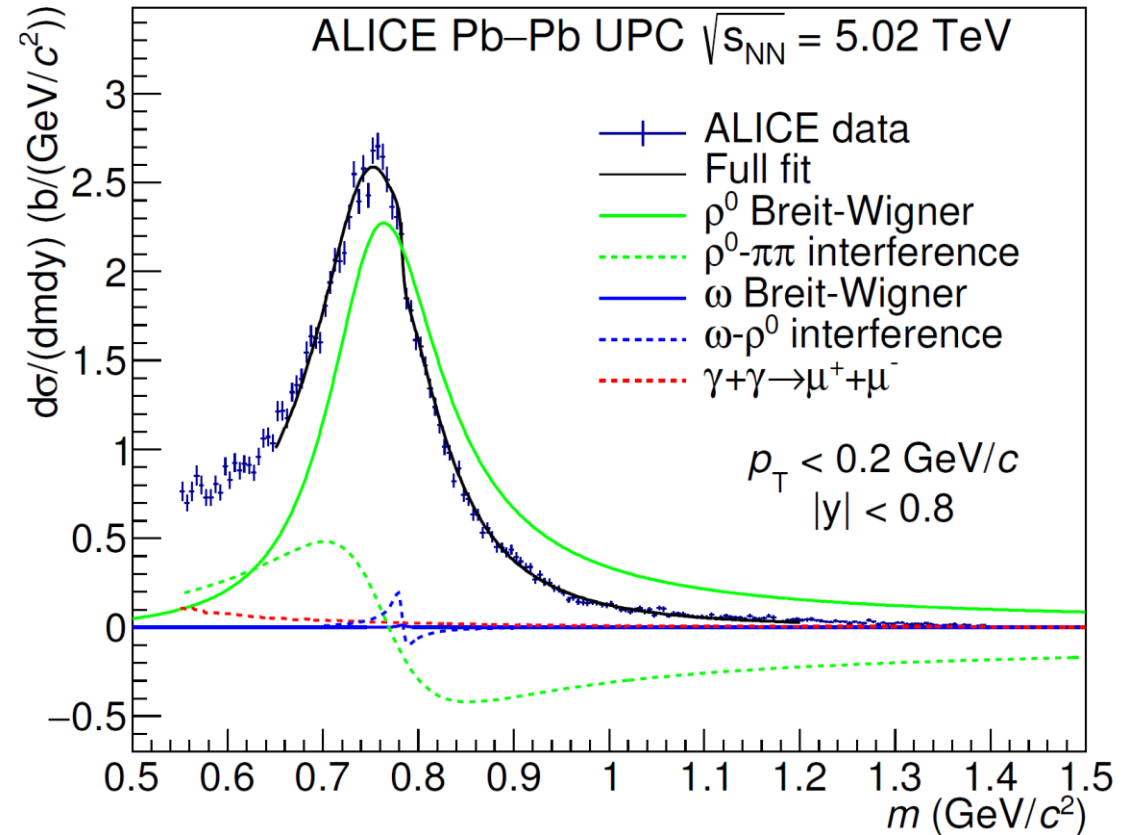
Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов базируется на использовании современных экспериментальных методик физики высоких энергий и общепринятых методов математической статистики, а также на сопоставлении полученных результатов с данными других экспериментов и теоретическими расчетами. Достоверность результатов также подтверждается их апробацией на международных конференциях и публикациями в реферируемых научных изданиях.

# Вклад $\omega$ -мезона

Финальная версия:



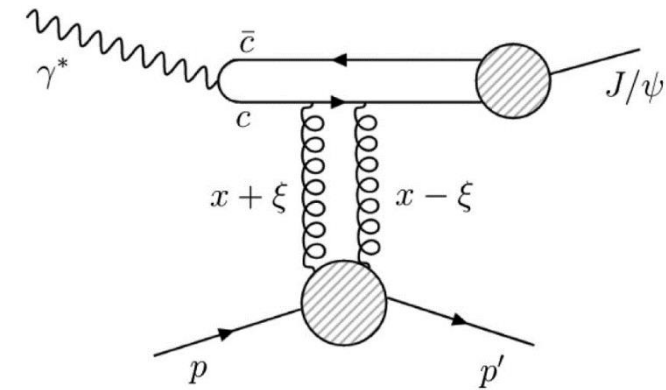
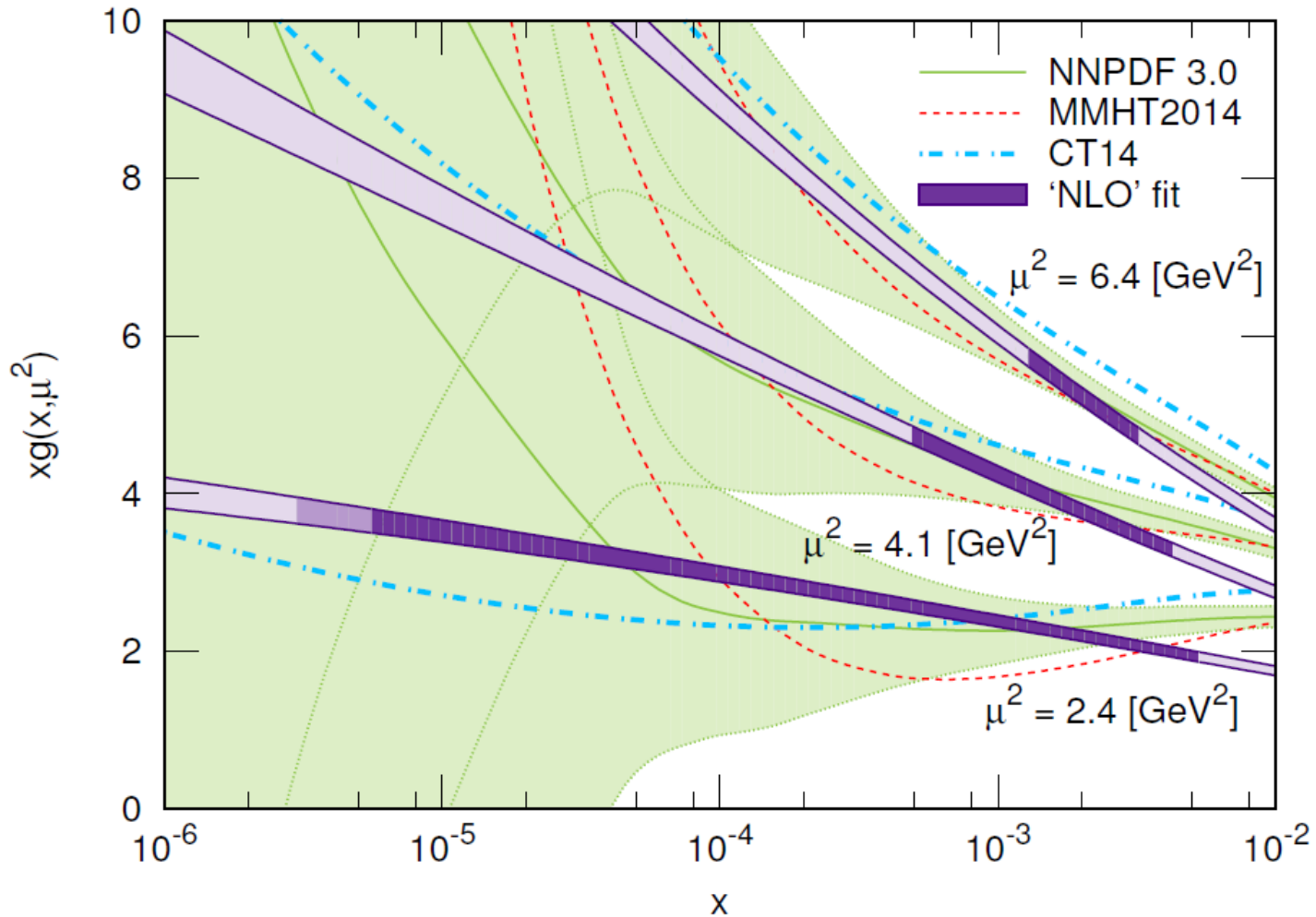
В предварительной версии статьи вклад  $\omega$ -мезона был включен:



$$\frac{d^2\sigma}{dm dy} = |A \cdot BW_\rho + B|^2 + M$$

$$\frac{d\sigma}{dm dy} = |A \cdot BW_\rho + B + C \cdot \exp(i\Phi) \cdot BW_\omega|^2 + M$$

# Извлечение глюонных распределений из данных?



## Caveats:

- $J/\psi$  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, Zhalov: JHEP 1310 (2013) 207
- **NLO contributions**



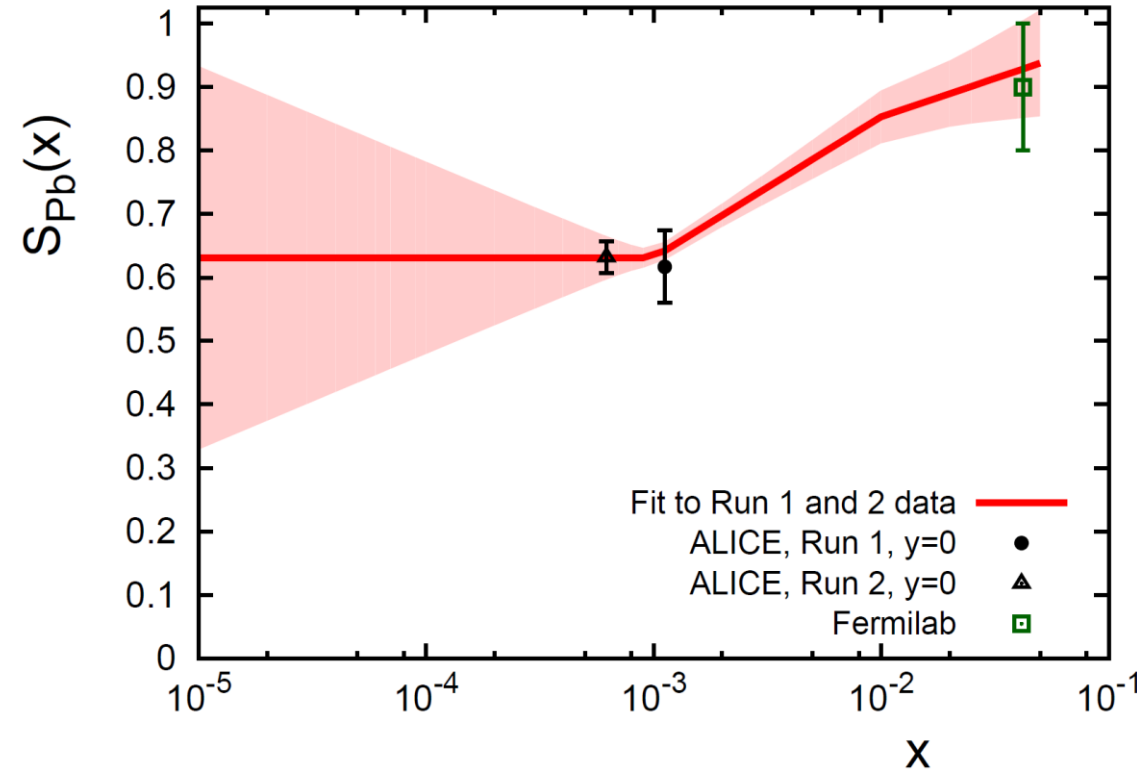
# Перевзвешивание глобальных параметризаций с использованием УПС

Строго говоря, включение данных по когерентному фоторождению  $J/\psi$  в глобальные параметризации требует учета многих эффектов (связь обобщенных и обычных партонных плотностей, релятивистские поправки и т. п.).

Вместо полноценного совместного анализа всех данных, можно оценить влияние фактора ядерного подавления, который мы извлекли из данных, на текущие неопределенности глюонной плотности, используя метод статистического взвешивания

В работе 2021 года вклады при малых и больших  $x$  были разделены на основании предполагаемого поведения  $S_{Pb}(x)$ :

$$S_{Pb}(x) = \begin{cases} a + b_1 \ln(x_1/x_0) + b_2 \ln(x/x_1), & \text{for } x \geq x_1 \\ a + b_1 \ln(x/x_0), & \text{for } x_1 > x > x_0 \\ a + c \ln(x/x_0), & \text{for } x \leq x_0, \end{cases}$$



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

$$S(W_{\gamma p}) \equiv \sqrt{\frac{\sigma_{\gamma A \rightarrow V A}^{\text{exp}}(W_{\gamma p})}{\sigma_{\gamma A \rightarrow V A}^{\text{IA}}(W_{\gamma p})}}$$

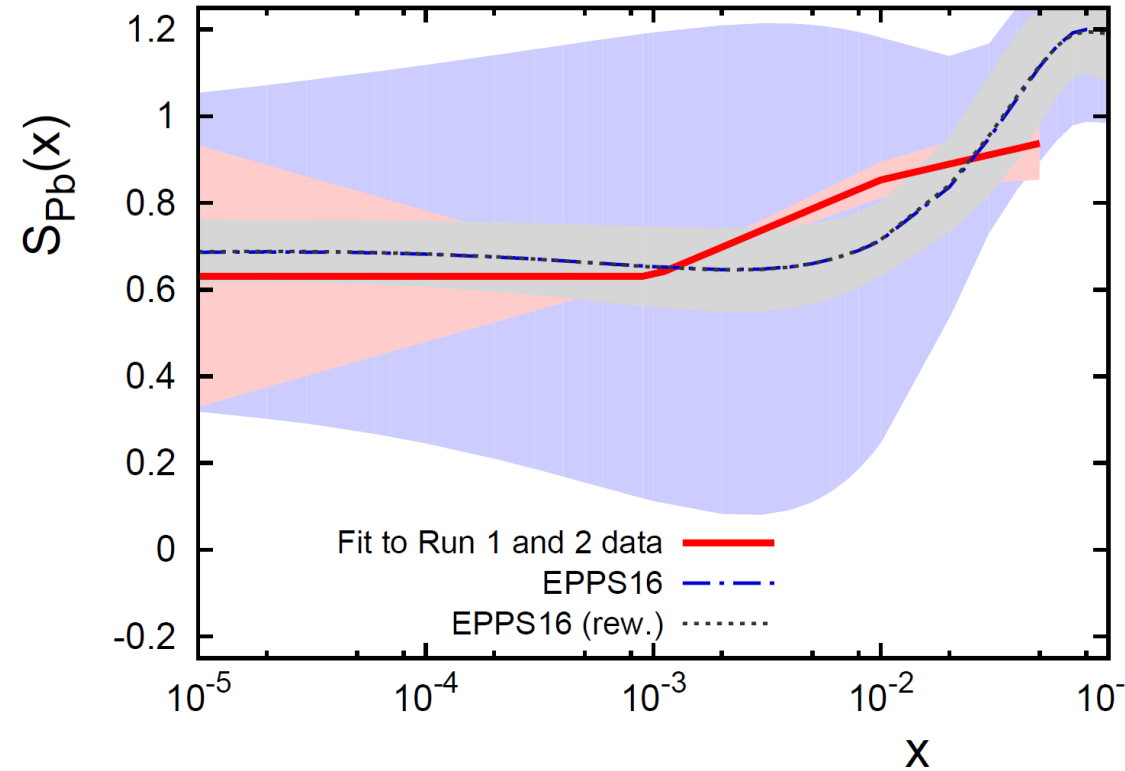
# Перевзвешивание глобальных параметризаций с использованием УПС

Строго говоря, включение данных по когерентному фоторождению  $J/\psi$  в глобальные параметризации требует учета многих эффектов (связь обобщенных и обычных партонных плотностей, релятивистские поправки и т. п.).

Вместо полноценного совместного анализа всех данных, можно оценить влияние фактора ядерного подавления, который мы извлекли из данных, на текущие неопределенности глюонной плотности, используя метод статистического взвешивания

В работе 2021 года вклады при малых и больших  $x$  были разделены на основании предполагаемого поведения  $S_{Pb}(x)$ :

$$S_{Pb}(x) = \begin{cases} a + b_1 \ln(x_1/x_0) + b_2 \ln(x/x_1), & \text{for } x \geq x_1 \\ a + b_1 \ln(x/x_0), & \text{for } x_1 > x > x_0 \\ a + c \ln(x/x_0), & \text{for } x \leq x_0, \end{cases}$$



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

$$S(W_{\gamma p}) \equiv \sqrt{\frac{\sigma_{\gamma A \rightarrow V A}^{\text{exp}}(W_{\gamma p})}{\sigma_{\gamma A \rightarrow V A}^{\text{IA}}(W_{\gamma p})}}$$

# Перевзвешивание глобальных параметризаций с использованием УПС

Создаем много клонов глюонных распределений с учетом погрешностей EPPS16:

$$g_A^k(x, \mu^2) = g_A^0(x, \mu^2) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (g_A^{i+}(x, \mu^2) - g_A^{i-}(x, \mu^2)) R_{ki}$$

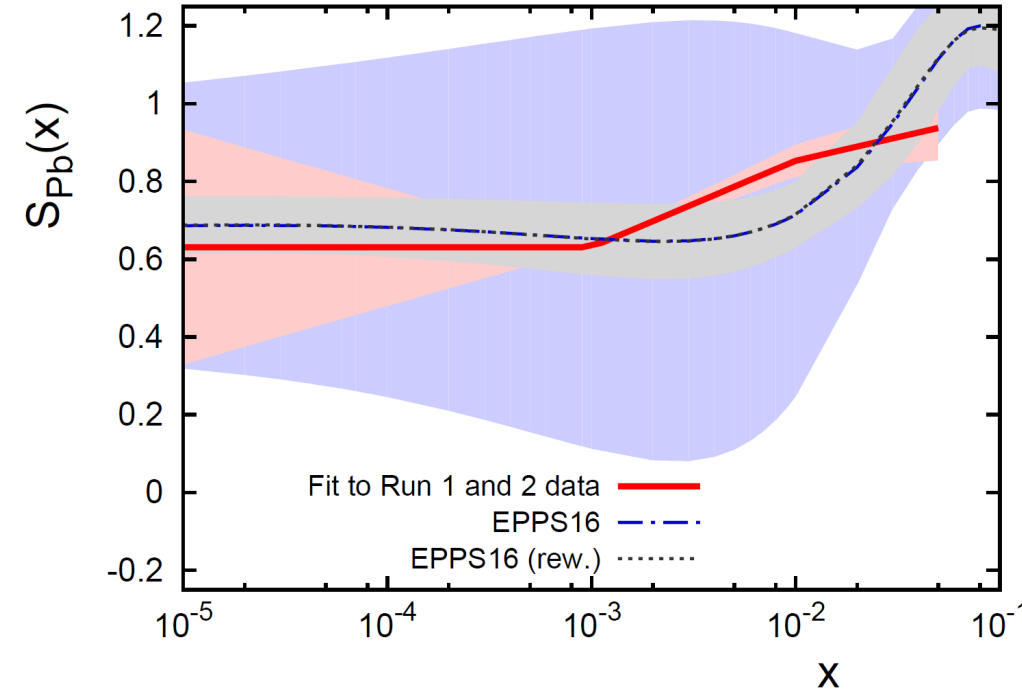
Для каждого клона считаем статистический вес:

$$\chi_k^2 = \sum_{j=1}^{N_{\text{data}}} \frac{\left( \sqrt{(d\sigma/dy)/(d\sigma^{\text{IA}}/dy)}^{(j)} - R_{Pb,k}^{(j)} \right)^2}{\left( \delta \sqrt{(d\sigma/dy)/(d\sigma^{\text{IA}}/dy)}^{(j)} \right)^2} \quad w_k = N_{\text{norm}} e^{-\frac{1}{2} \chi_k^2 / T}$$

Новое центральное значение глюонной плотности и ошибок:

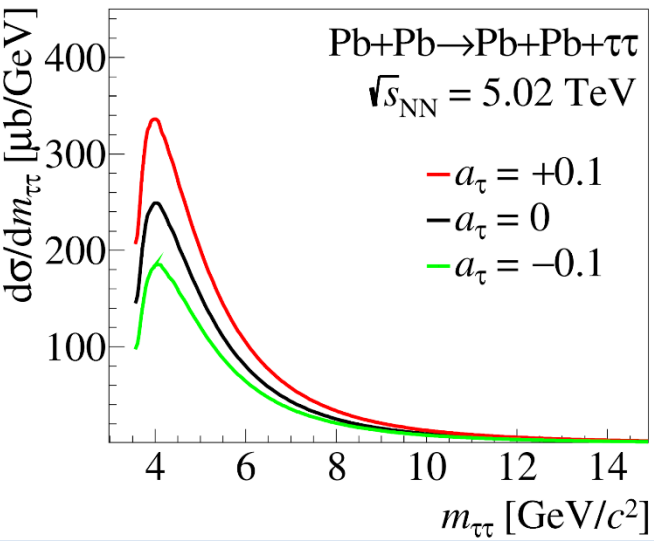
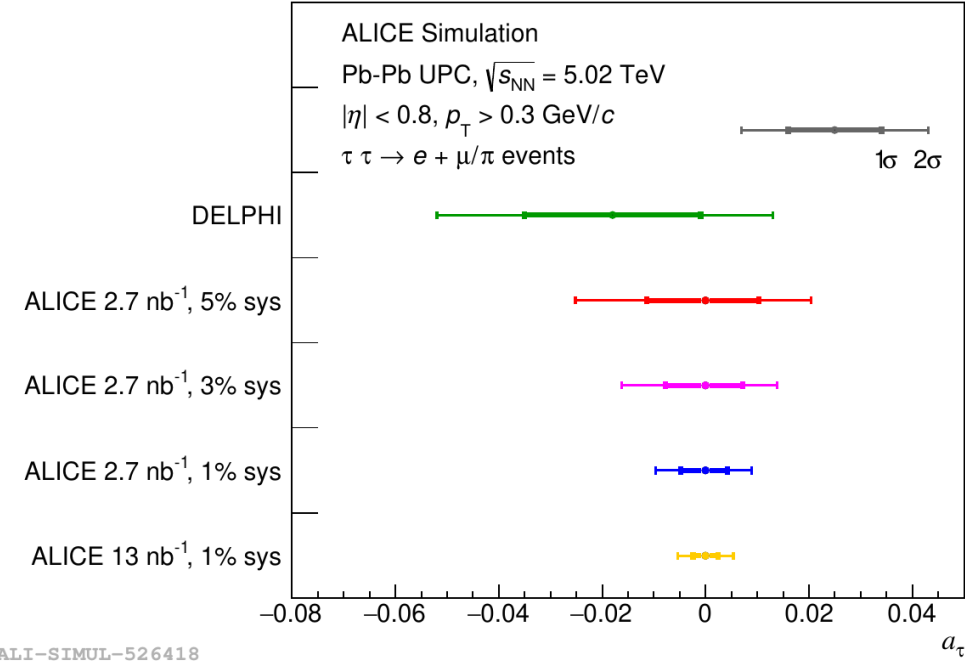
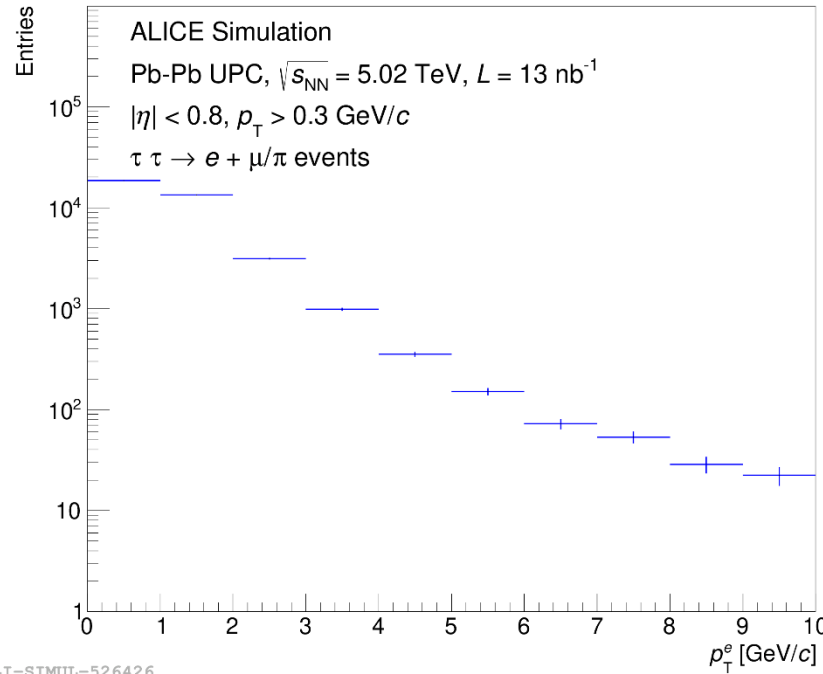
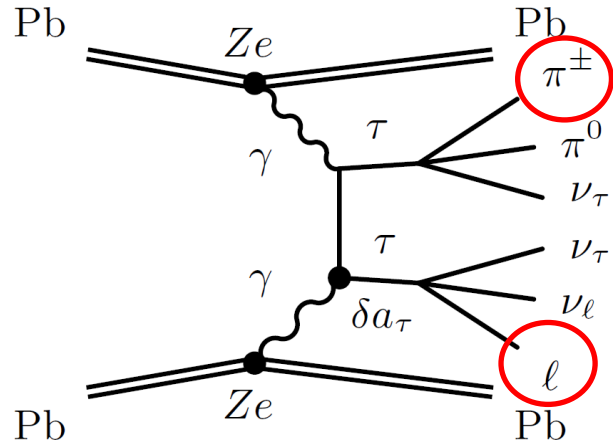
$$\langle g_A(x, \mu^2) \rangle = \frac{1}{N_{\text{rep}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{rep}}} w_k g_A^k(x, \mu^2),$$

$$\delta \langle g_A(x, \mu^2) \rangle = \left[ \frac{1}{N_{\text{rep}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{rep}}} w_k \left( g_A^k(x, \mu^2) - \langle g_A(x, \mu^2) \rangle \right)^2 \right]^{1/2}$$



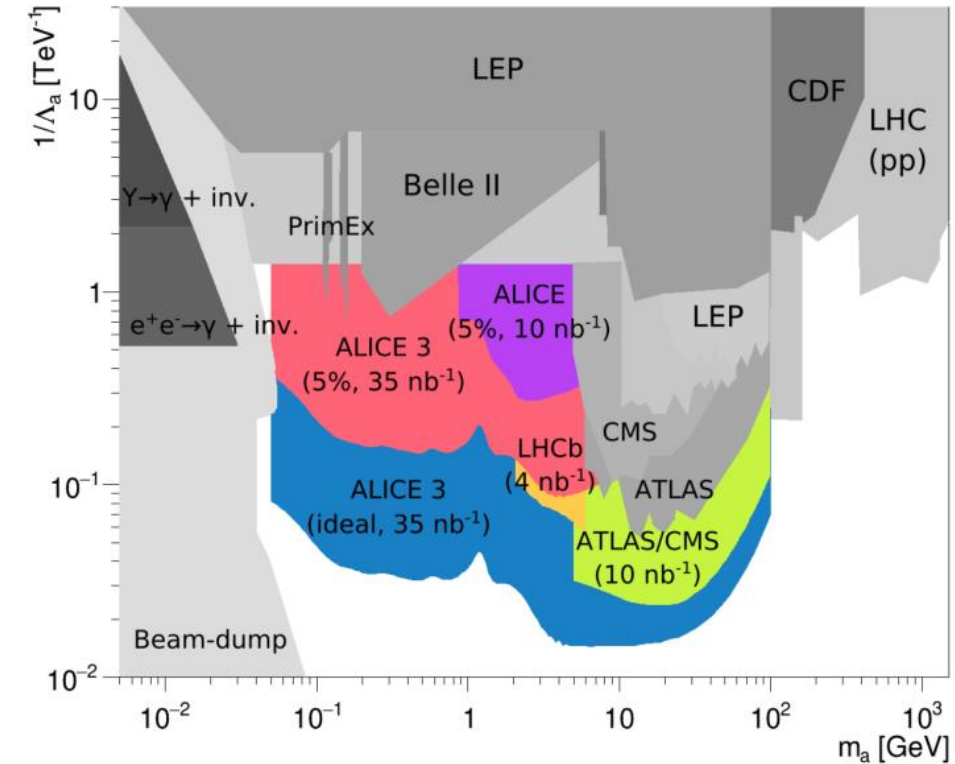
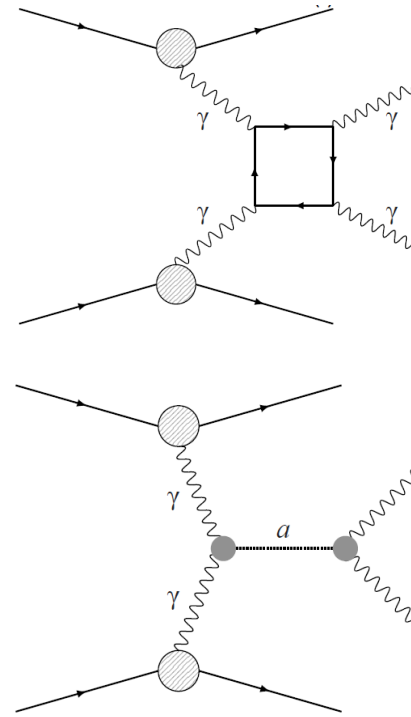
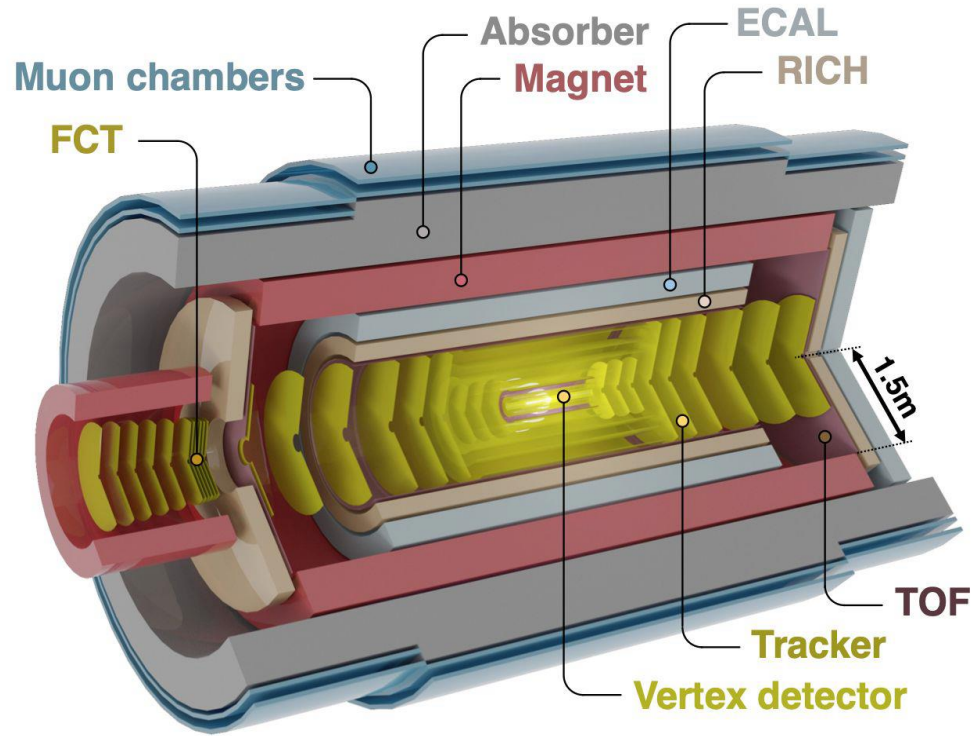
# Перспективы измерений $a_\tau$ в УПС

Burmasov, Kryshen et al. Phys. Part. Nucl. 54 (2023) 590



- Сечение рождения тау-лептонных пар чувствительно к значению аномального магнитного момента  $a_\tau$
- Рассчитаны возможные пределы на  $a_\tau$ , которых можно достичь в эксперименте ALICE в сеансах Run 3-4

# Перспективы поиска аксионоподобных частиц



$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \partial^\mu a \partial_\mu a - \frac{1}{2} m_a^2 a^2 - \frac{1}{4} g_{a\gamma} a F^{\mu\nu} \tilde{F}_{\mu\nu}$$

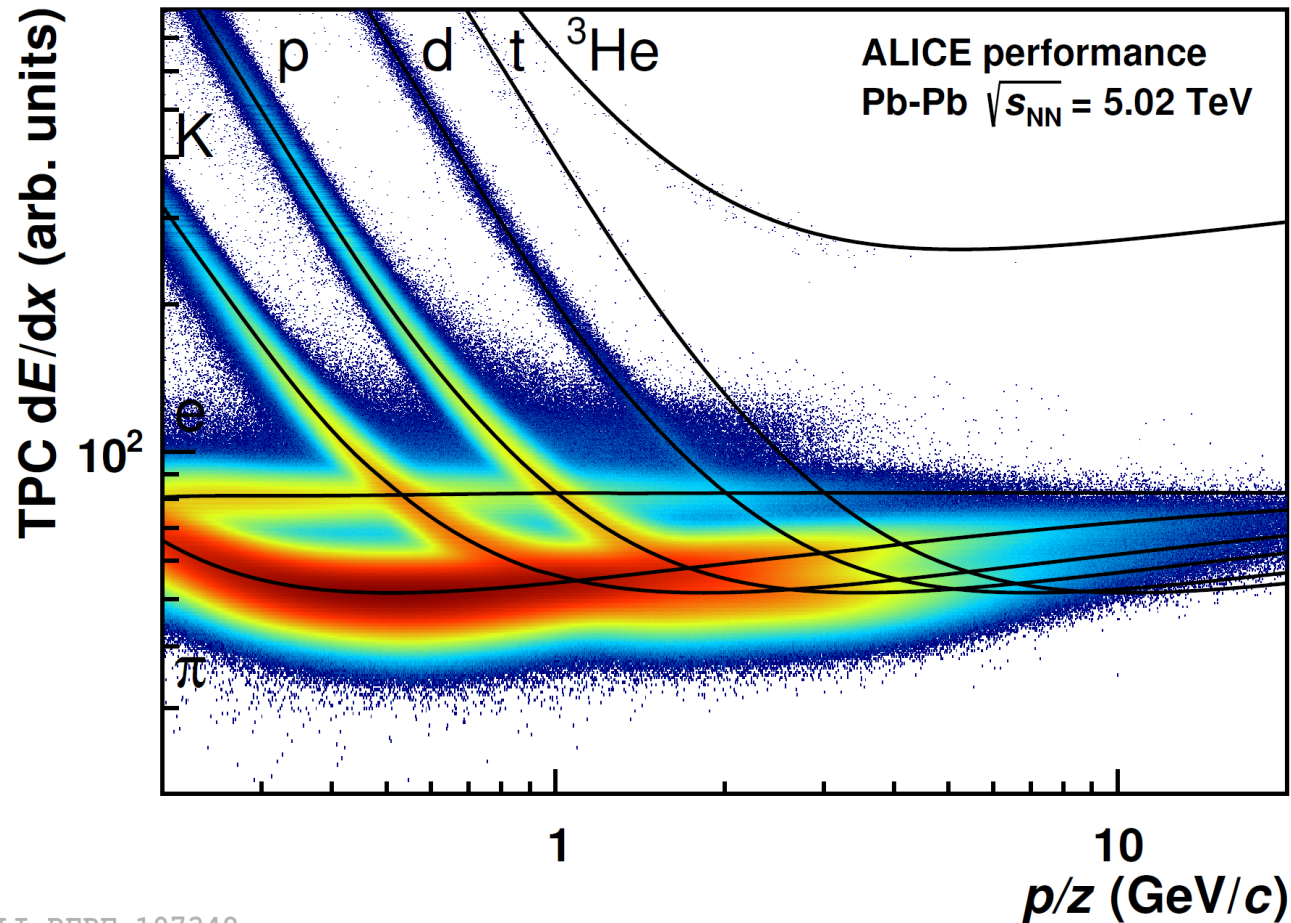
- ALICE 3: проектируемый компактный детектор для Run 5 (2035 ...), основанный на кремниевых детекторах
- Получены оценки выходов для процесса рассеяния света на свете, изучены основные фоновые процессы (рождение  $\pi^0$  пар)
- Получены пределы на параметры аксионоподобных частиц (возможные резонансы в дифотонном спектре)

ALICE 3 LOI, arXiv: 2211.02491

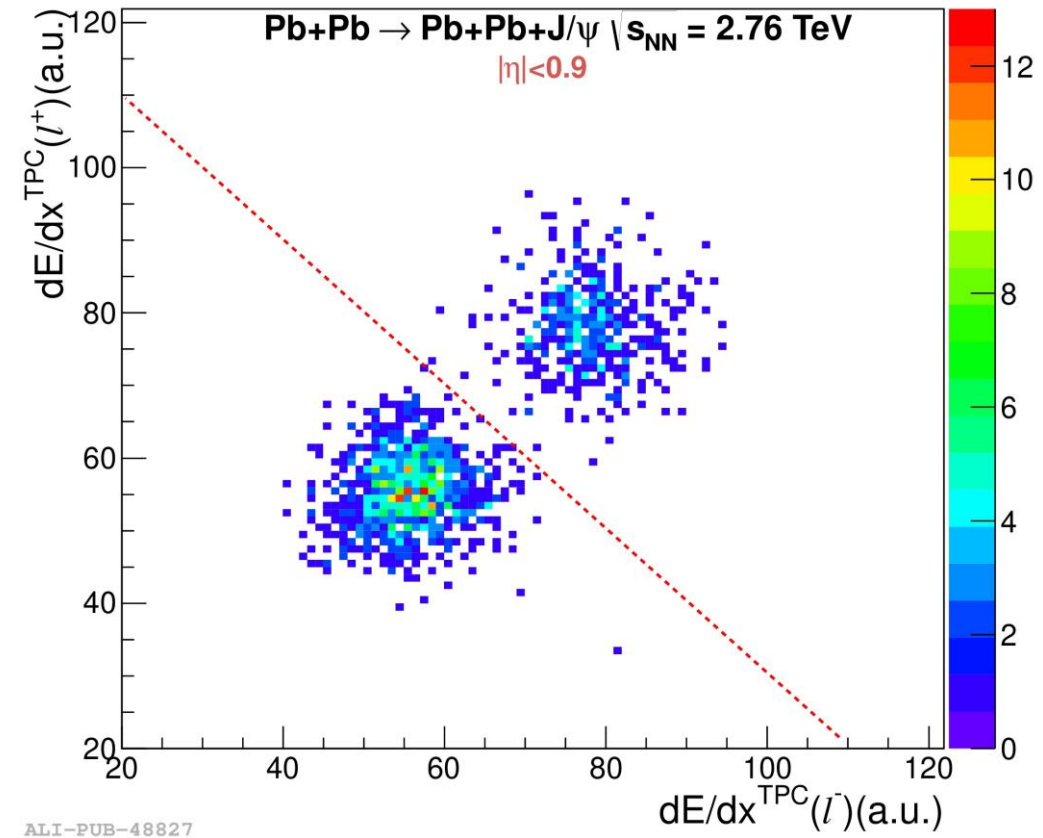
D. d'Enterria, ..., E. Kryshen, ... J. Phys. G50 (2023) 050501



# Идентификация частиц



ALI-PERF-107348



Для идентификации частиц (разделения мюонов и электронов) в области центральных быстрот используются потери энергии в TPC

# Некогерентное фоторождение легких векторных мезонов

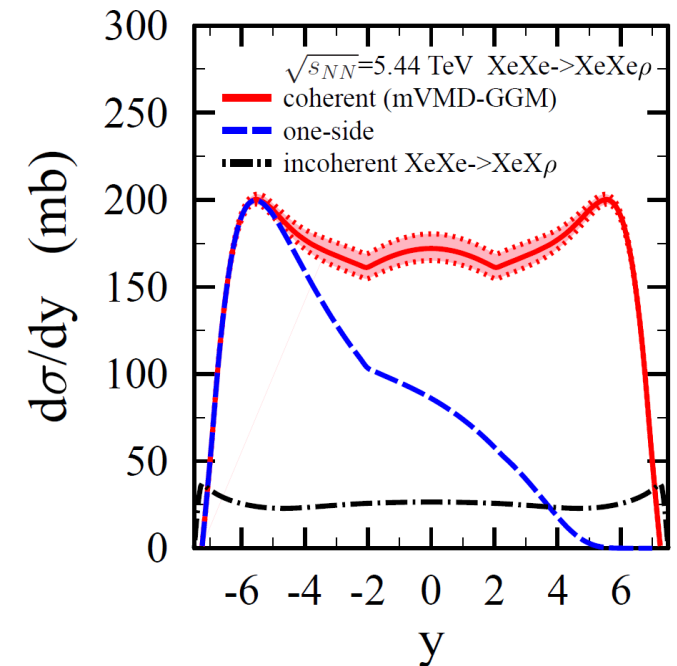
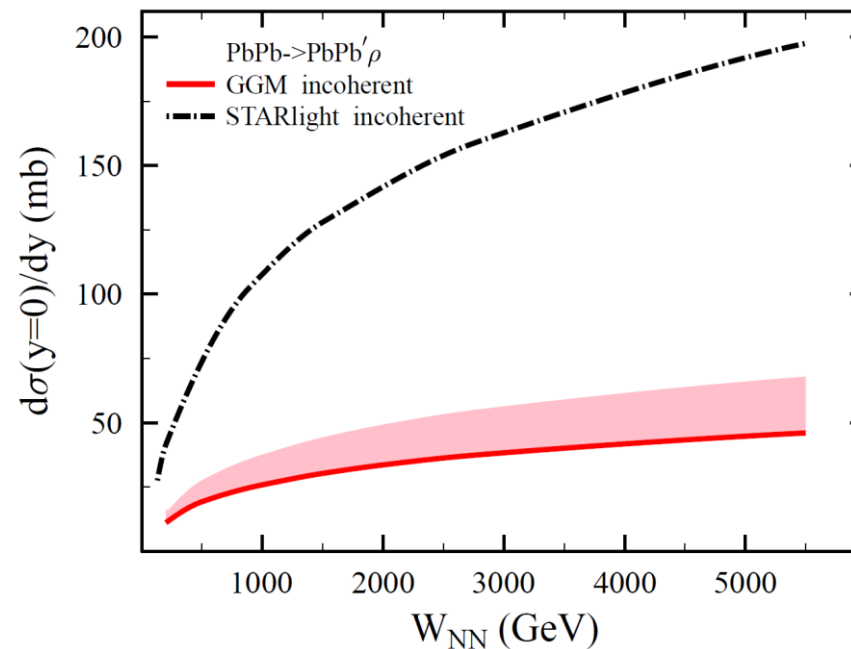
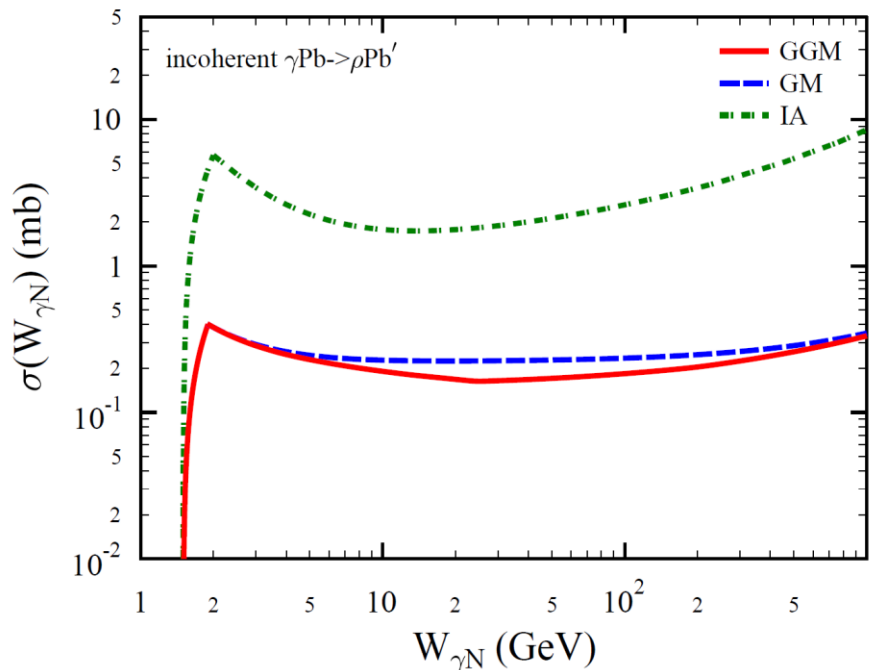
Guzey, Kryshen, Zhalov, PRC102 (2020) 015208

- Квазиупругое некогерентное сечение:

$$\sigma_{\gamma A \rightarrow \rho A'}^{\text{GG}} = \left( \frac{e}{f_\rho} \right)^2 \int d^2 \vec{b} T_A(b) \left( \int d\sigma P(\sigma) \frac{\sigma}{\sqrt{16\pi B}} \exp \left[ -\frac{\sigma^{\text{in}}}{2} T_A(b) \right] \right)^2$$

- Учет некогерентного рождения с диссоциацией нуклона мишени:

$$\sigma_{\gamma A \rightarrow \rho A' + Y}^{\text{GG}} = \left( 1 + \frac{\sigma_{\gamma p \rightarrow \rho Y}}{\sigma_{\gamma p \rightarrow \rho p}} \right) \left( \frac{e}{f_\rho} \right)^2 \int d^2 \vec{b} T_A(b) \left( \int d\sigma P(\sigma) \frac{\sigma}{\sqrt{16\pi B}} \exp \left[ -\frac{\sigma^{\text{in}}}{2} T_A(b) \right] \right)^2$$



# Когерентное сечение рождения $\psi(2S)$ и $\Upsilon(1S)$ в UPC

