

Фоторождение векторных мезонов в ультрапериферических столкновениях на Большом Адронном Коллайдере

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

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

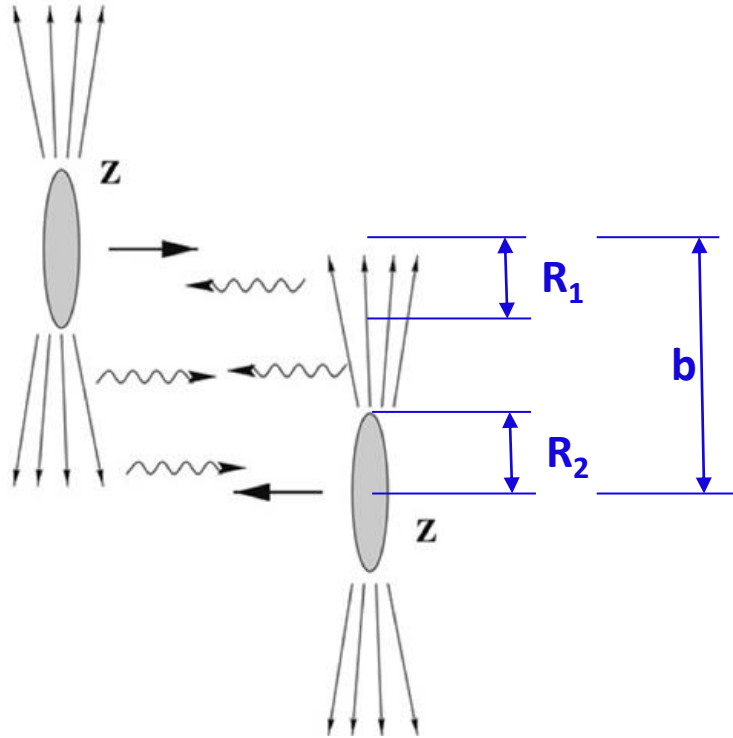
Евгений Крышень

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

Содержание

Введение	4	4.1. Результаты измерений при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ	87
Глава 1. Расчет сечений фоторождения векторных мезонов в ультрапериферических столкновениях	14	4.2. Анализ Pb–Pb столкновений при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ	94
1.1. Ультрапериферические столкновения	14	4.3. Определение систематических погрешностей	99
1.2. Расчет потока фотонов	15	4.4. Сечения когерентного рождения J/ψ и $\psi(2S)$ мезонов	106
1.3. Фоторождение векторных мезонов в импульсном приближении	20	4.5. Измерение t -зависимости сечения фоторождения J/ψ	111
1.4. Фоторождение тяжелых векторных мезонов в пертурбативной КХД	22	4.6. Измерение сечений когерентного рождения J/ψ , сопровождающихся электромагнитной диссоциацией ядер	116
1.5. Фоторождение легких векторных мезонов в модели Грибова-Глаубера	31	4.7. Извлечение фотоядерных сечений когерентного рождения J/ψ	123
1.6. Фоторождение векторных мезонов в дипольной модели	46	4.8. Извлечение фактора ядерного подавления	127
1.7. Основные выводы	47	4.9. Поляризация	128
Глава 2. Измерения ультрапериферических столкновений в эксперименте ALICE		4.10. Основные выводы	131
2.1. Описание экспериментальной установки	50	Глава 5. Измерения сечений фоторождения ρ^0 мезонов в ультрапериферических Pb–Pb и Xe–Xe столкновениях	132
2.2. Триггерная система эксперимента	55	5.1. Результаты измерений в Pb–Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ	132
2.3. Отбор ультрапериферических событий	59	5.2. Анализ Pb–Pb столкновений при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ	133
2.4. Определение интегральной светимости	62	5.3. Анализ Xe–Xe столкновений при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ ТэВ	145
2.5. Определение эффективности вето	65	5.4. Энергетическая зависимость сечения фоторождения ρ^0	150
2.6. Монте-Карло моделирование ультрапериферических событий	67	5.5. Основные выводы	152
2.7. Основные выводы	68	Глава 6. Перспективы изучения фотон-ядерных и фотон-фотонных столкновений на Большом Адронном Коллайдере	153
Глава 3. Измерения сечений фоторождения J/ψ в ультрапериферических p–Pb столкновениях	69	6.1. Перспективы изучения фотон-ядерных взаимодействий	153
3.1. Анализ p–Pb столкновений при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ	69	6.2. Перспективы поиска новой физики в фотон-фотонных столкновениях	157
3.2. Оценка систематических погрешностей	74	6.3. Основные выводы	161
3.3. Анализ p–Pb столкновений при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 8.16$ ТэВ	77	Заключение	162
3.4. Определение сечений фоторождения J/ψ на протоне	80	Публикации	163
3.5. Энергетическая зависимость эксклюзивного фоторождения J/ψ	81	Доклады на конференциях и семинарах	164
3.6. Сечение дифракционного рождения J/ψ	84	Список литературы	167
3.7. Основные выводы	85		
Глава 4. Измерения сечений фоторождения J/ψ и $\psi(2S)$ мезонов в ультрапериферических Pb–Pb столкновениях	87		

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 $\gamma\gamma$, γp и γPb взаимодействий при высоких энергиях

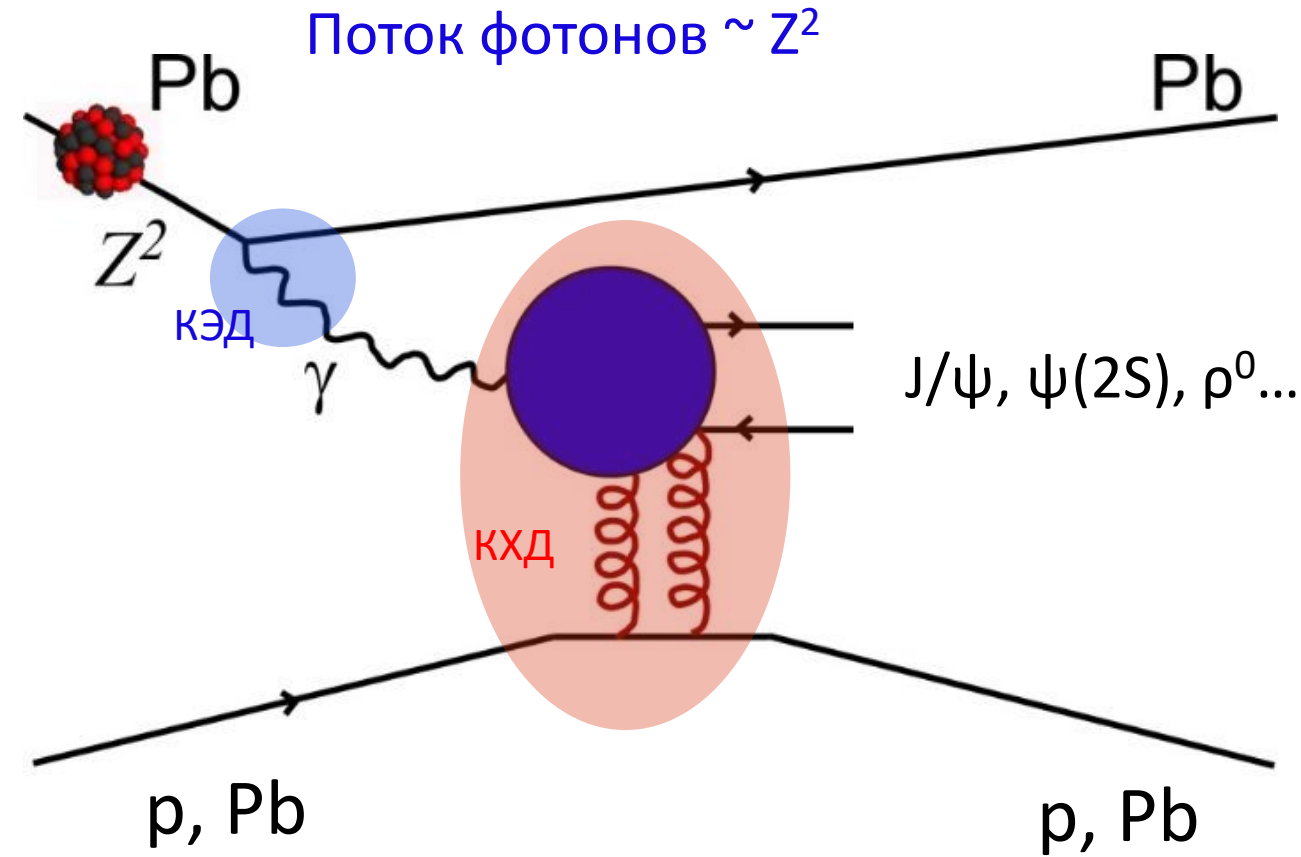
Обзоры по физике УПС:

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

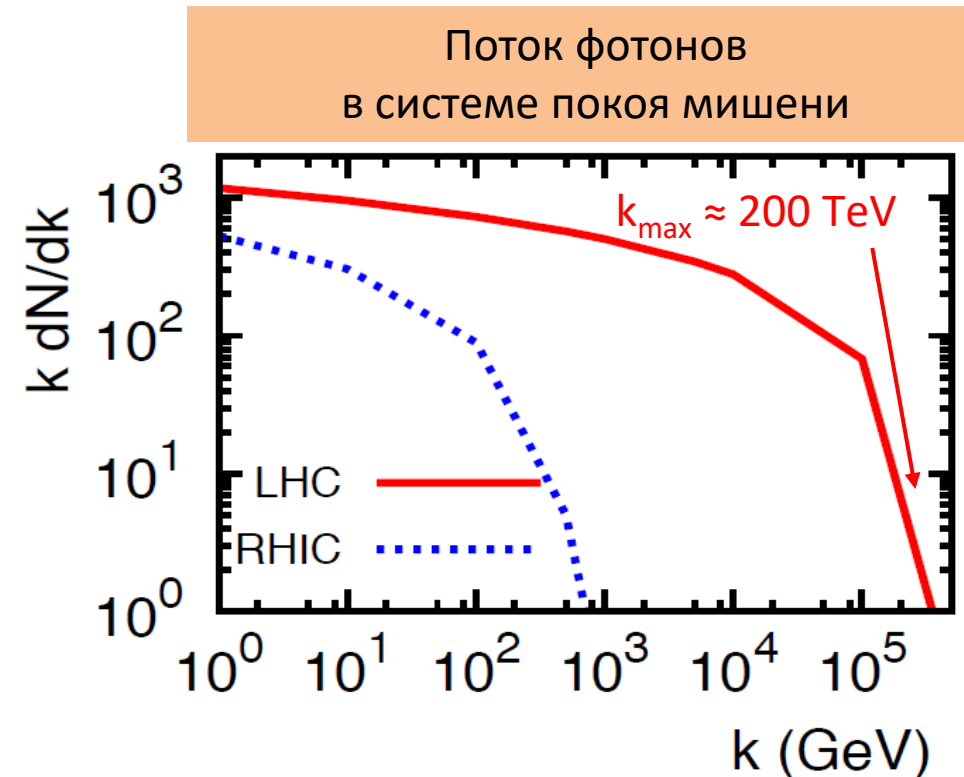
Рождение векторных мезонов в УПС



Сечение в УПС можно факторизовать:

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

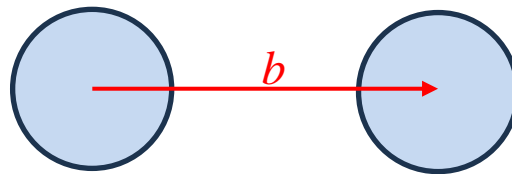
$$\frac{d\sigma_{PbPb}(y)}{dy} = n_{\gamma}(y)\sigma_{\gamma Pb}(y) + n_{\gamma}(-y)\sigma_{\gamma Pb}(-y)$$



Расчет потока фотонов

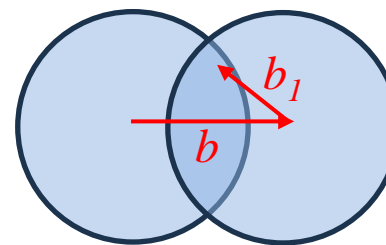
- Поток фотонов в зависимости от энергии ω :

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



- Вероятность подавления адронных взаимодействий:

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



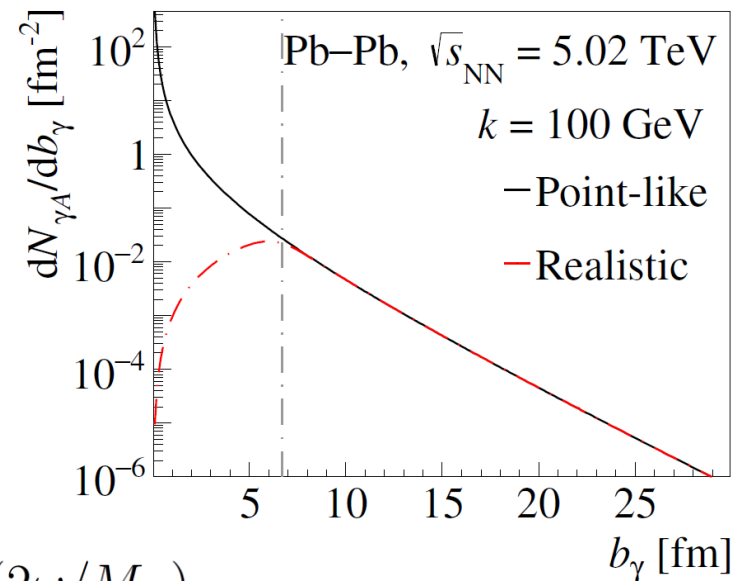
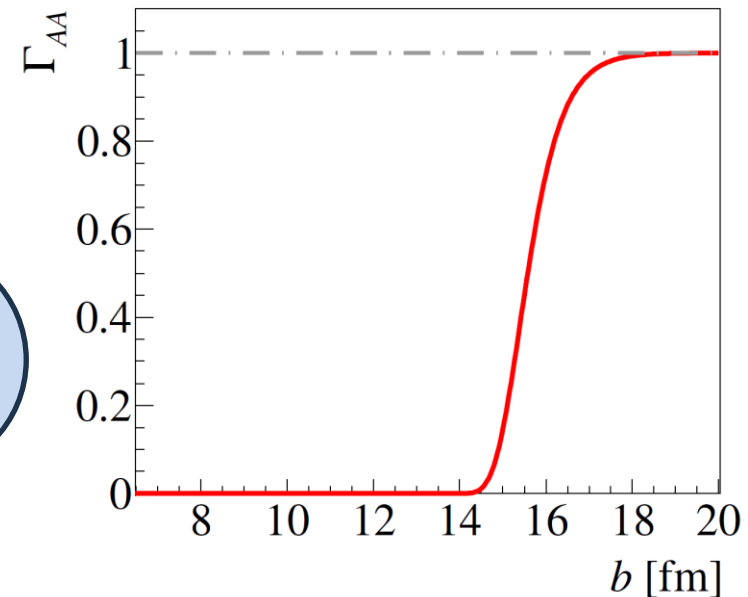
- Зависимость потока фотонов от прицельного параметра:

- Точное выражение с учетом зарядового форм-фактора ядра:

$$n_\gamma(\omega, b) = \frac{Z^2 \alpha}{\pi^2} \left| \int_0^\infty dk_\perp \frac{k_\perp^2 F_A(k_\perp^2 + \omega^2/\gamma_L^2)}{k_\perp^2 + \omega^2/\gamma_L^2} J_1(bk_\perp) \right|^2$$

- В приближении точечной частицы с зарядом Z:

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



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

Обмен дополнительными фотонами и диссоциация ядер

- Фоторождение векторных мезонов может сопровождаться дополнительным обменом фотонами
- Обмен фотоном приводит к электромагнитной диссоциации (ЭМД) ядер с испусканием нейтронов
- Эксперимент:
 - 0n0n – отсутствие нейтронов с обеих сторон
 - 0nXn – регистрация нейтронов с одной из сторон
 - XnXn – регистрация нейтронов с обеих сторон
- Вероятность ЭМД можно рассчитать, зная энергетическую зависимость фотоядерного сечения $\sigma_{\gamma\text{Pb}}$

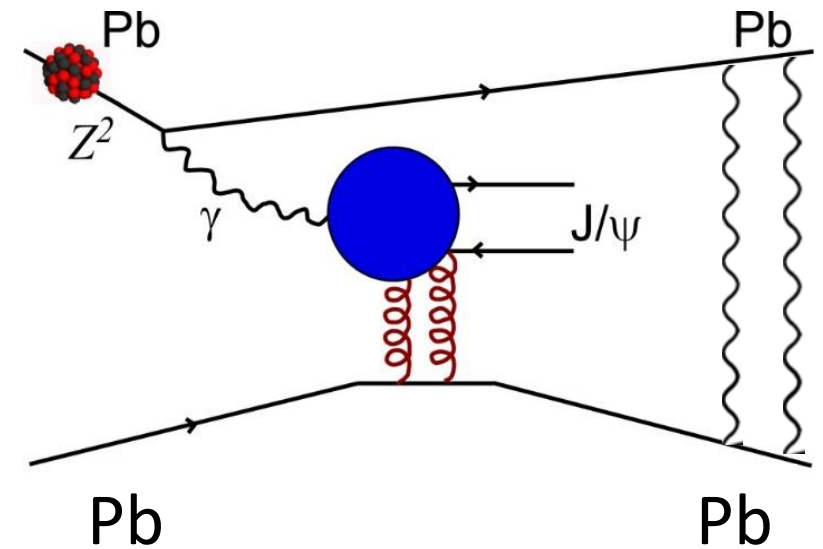
$$P_1(b) = \int d\omega n_\gamma(\omega, b) \sigma_{\gamma\text{Pb}}(\omega)$$

- При малых прицельных параметрах вероятность превышает 1. Для сохранения унитарности используется анзац:

$$P(b) = 1 - \exp(-P_1(b))$$

- Вероятность ЭМД можно использовать для расчета потока фотонов для различных классов ($i = 0n0n, 0nXn, XnXn$):

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



Обмен дополнительными фотонами и диссоциация ядер

- Фоторождение векторных мезонов может сопровождаться дополнительным обменом фотонами
- Обмен фотоном приводит к электромагнитной диссоциации (ЭМД) ядер с испусканием нейтронов
- Эксперимент:
 - 0n0n – отсутствие нейтронов с обеих сторон
 - 0nXn – регистрация нейтронов с одной из сторон
 - XnXn – регистрация нейтронов с обеих сторон
- Вероятность ЭМД можно рассчитать, зная энергетическую зависимость фотоядерного сечения $\sigma_{\gamma\text{Pb}}$

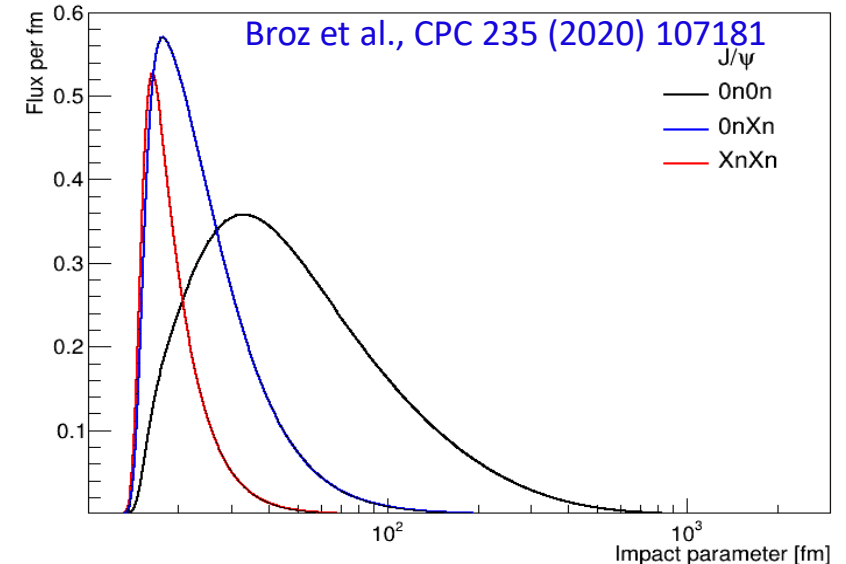
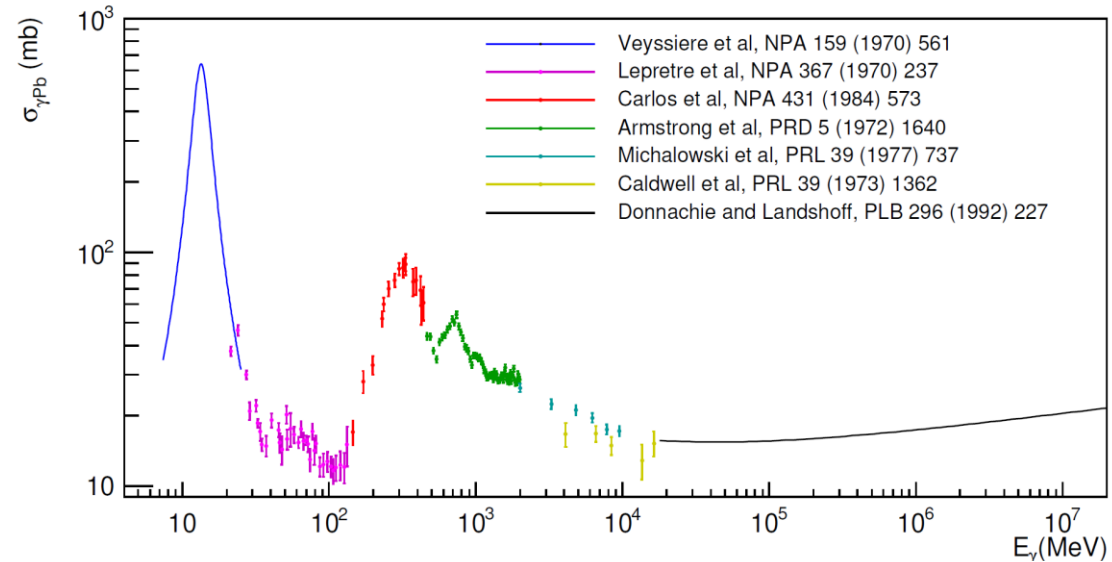
$$P_1(b) = \int d\omega n_\gamma(\omega, b) \sigma_{\gamma\text{Pb}}(\omega)$$

- При малых прицельных параметрах вероятность превышает 1. Для сохранения унитарности используется анзац:

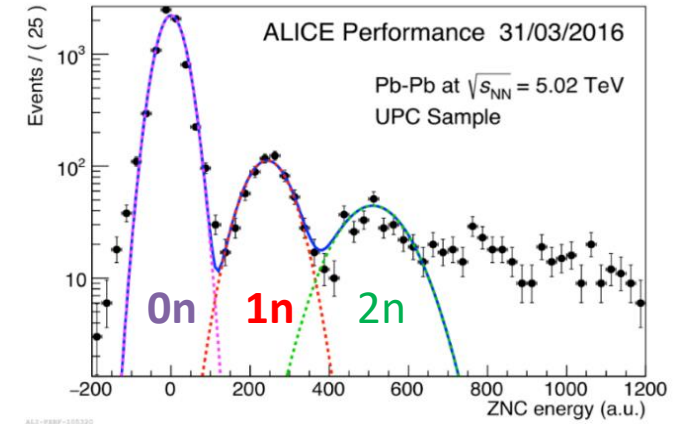
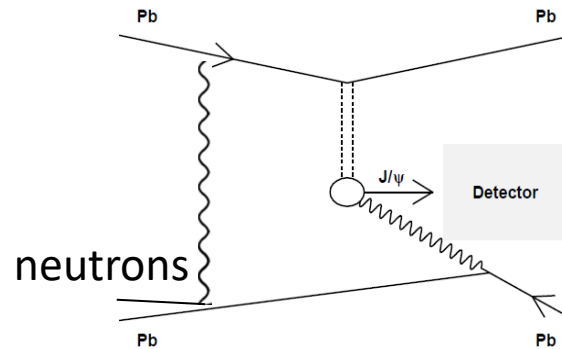
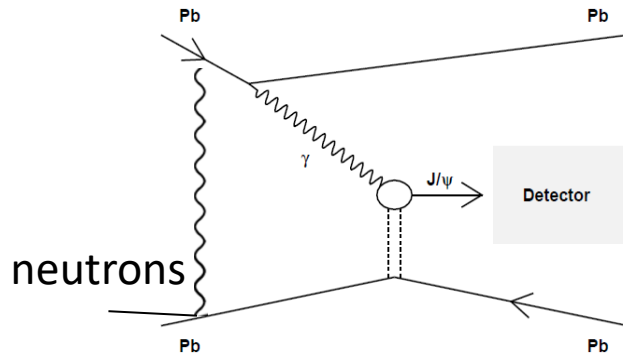
$$P(b) = 1 - \exp(-P_1(b))$$

- Вероятность ЭМД можно использовать для расчета потока фотонов для различных классов ($i = 0n0n, 0nXn, XnXn$):

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



Цель: извлечение вклада сечения при малых x



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

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:

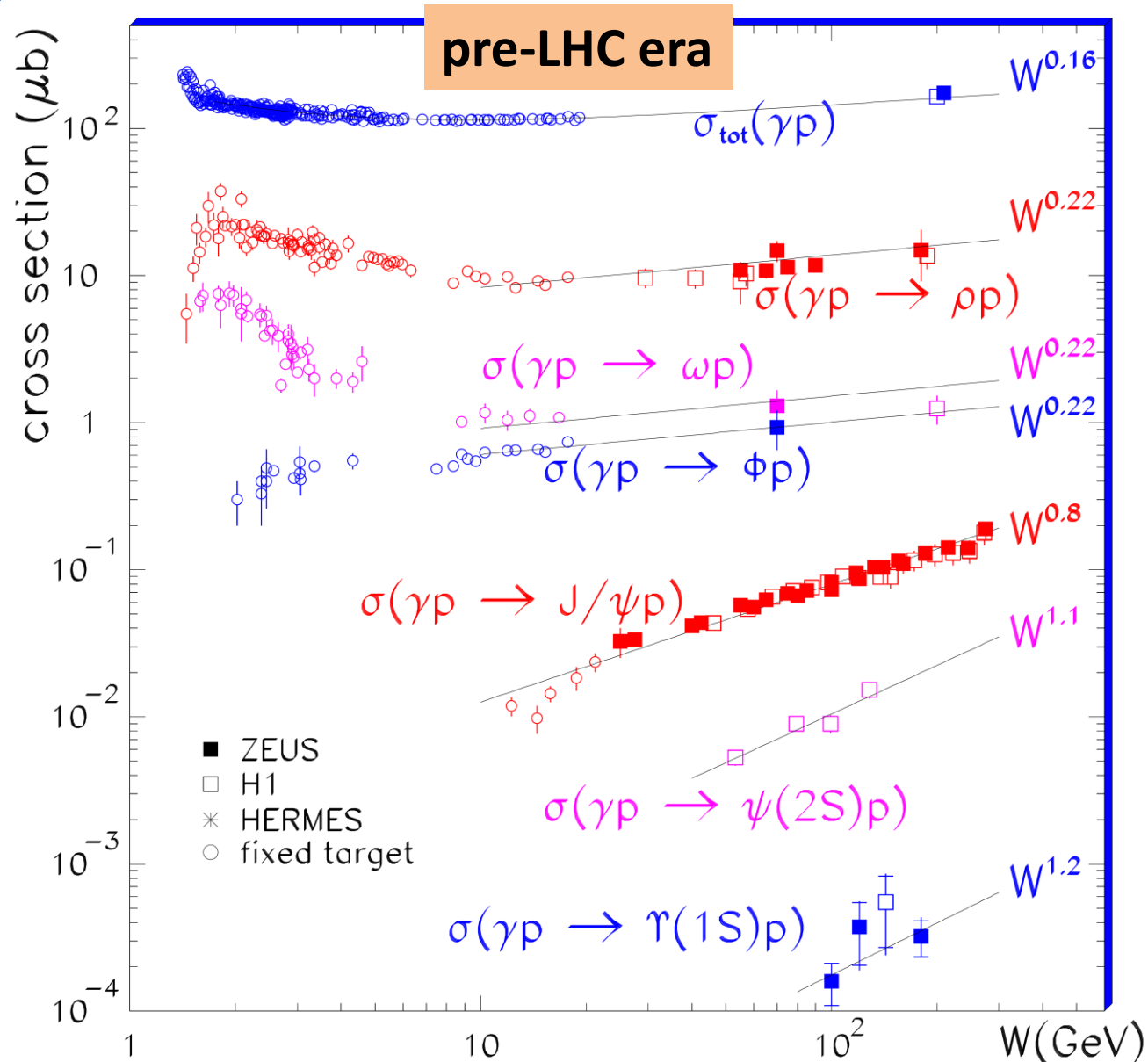
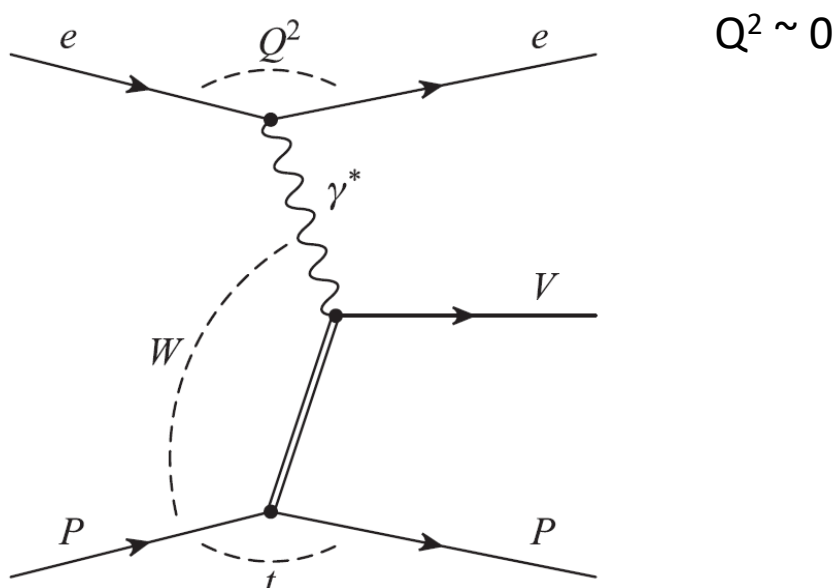
измерения потоки (можно рассчитать с хорошей точностью)

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

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

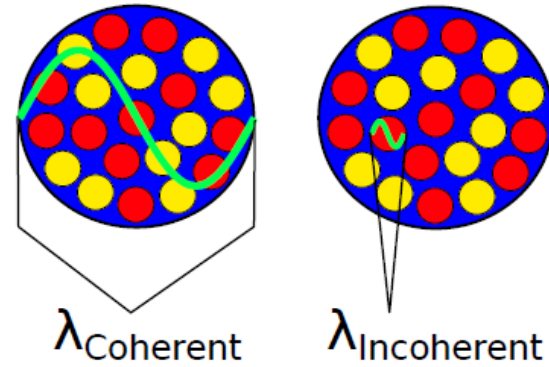
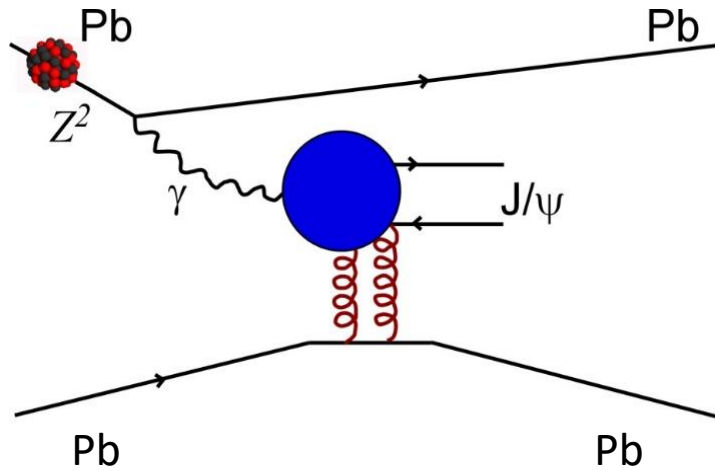
Неизвестные фотоядерные сечения

Фоторождение векторных мезонов на протоне



- Сечения **легких векторных мезонов** хорошо описываются в теории полюсов Редже:
 - Вклад реджеонов при малых энергиях
 - Вклад померона - степенной рост $\sim W^{0.2}$
- Степенной рост сечений **тяжелых векторных мезонов** описываются в рамках **пКХД** (сечение \sim квадрату глюонной плотности)

Когерентное и некогерентное фоторождение на ядрах

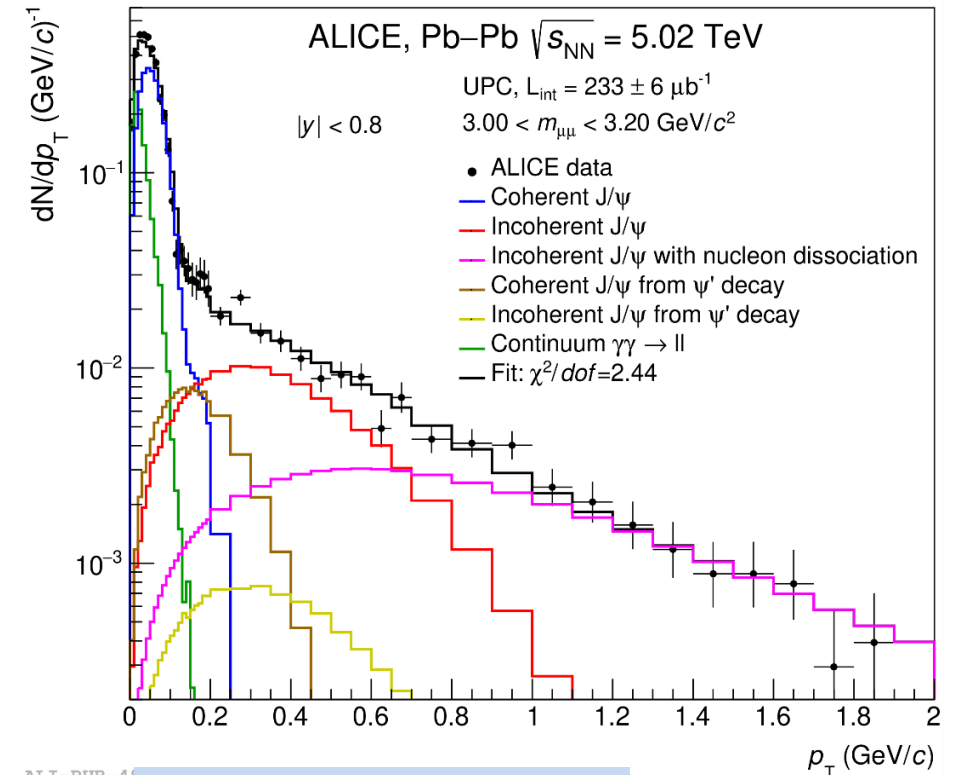


- Когерентное:**

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

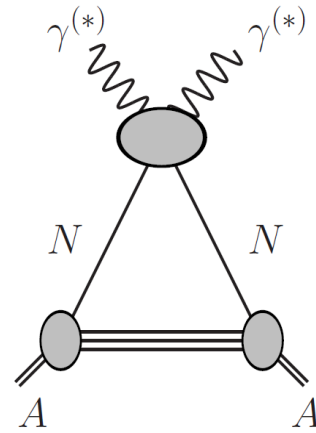
- Некогерентное:**

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

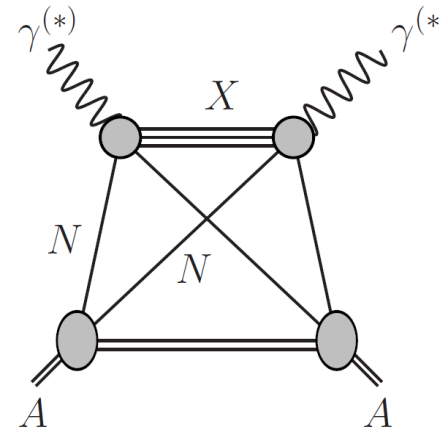


Ядерные экранировки

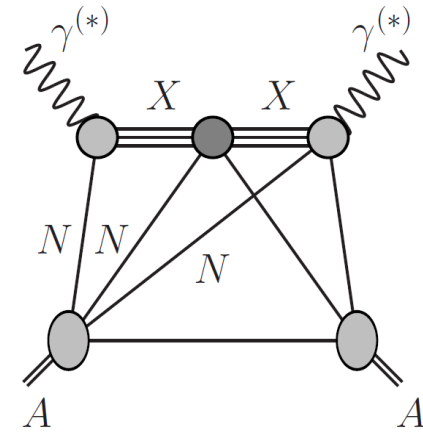
- **Ядерная экранировка** – подавление сечения на ядрах по сравнению с суммой сечений на нуклонах: $\sigma_A < A \sigma_N$
- Объясняется **деструктивной интерференцией** амплитуд взаимодействия с одним, двумя ... нуклонами ядра: нуклоны на задней поверхности ядра испытывают поток, экранированный передними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



импульсное приближение

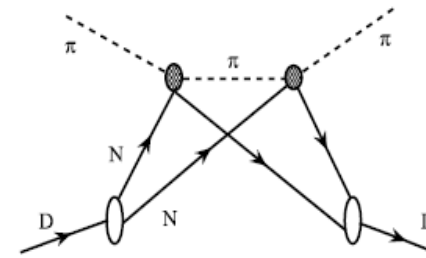
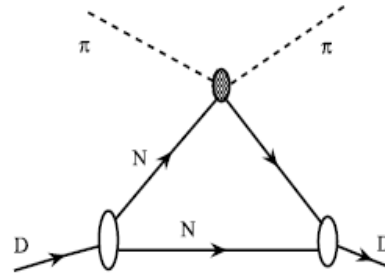


рассеяние на двух нуклонах

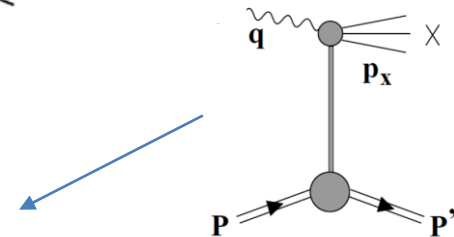
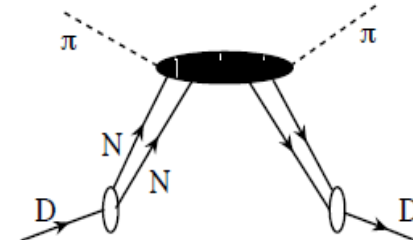
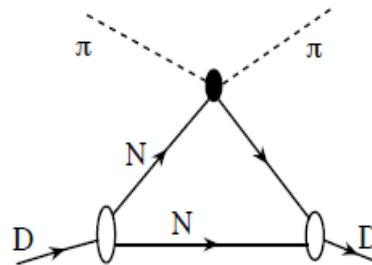


рассеяние на трех нуклонах

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



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

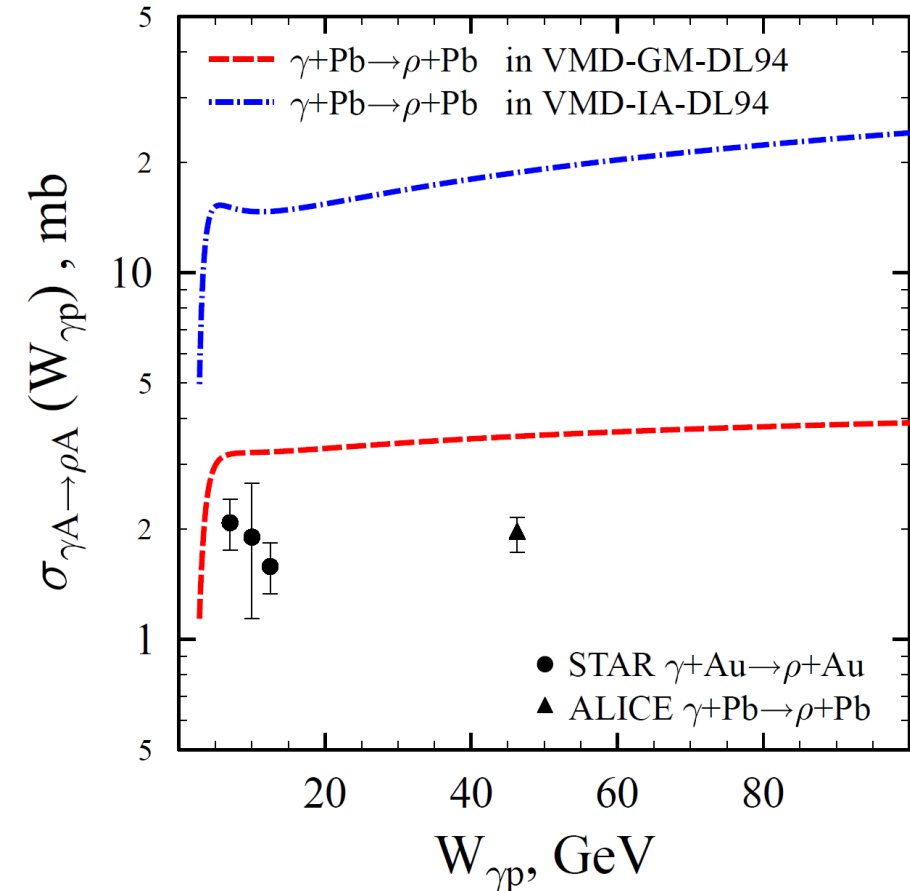


Когерентное фоторождение легких векторных мезонов

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

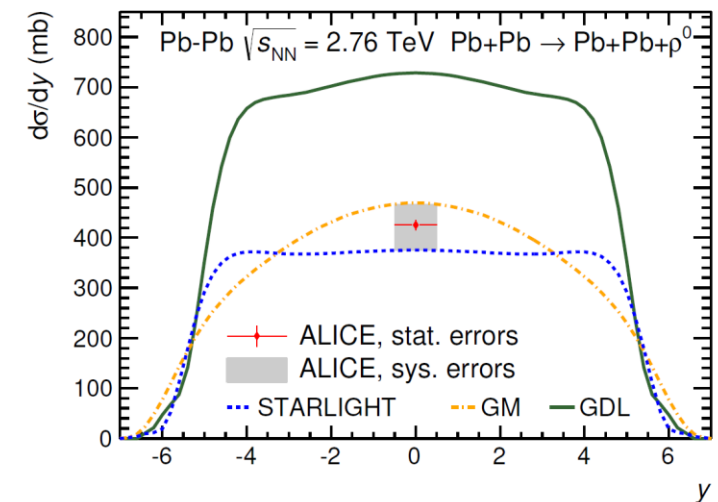
$$\sigma_{\gamma A \rightarrow V A}^{\text{VMD}} = \left(\frac{e}{f_V} \right)^2 \int d^2 \vec{b} \left| 1 - e^{-\frac{1}{2} \sigma_{VN} T_A(b)} \right|^2$$

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



Модель Грибова-Глаубера

- Неупругих экранировок в двухкомпонентной VDM (Frankfurt, Strikman, Zhalov, PLB 537 (2002) 51), учитывающей неупругие перерассеяния с переходами $\rho \rightarrow \rho'$ в промежуточном состоянии, также оказывается **недостаточно** для описания измеренных сечений **при высоких энергиях**

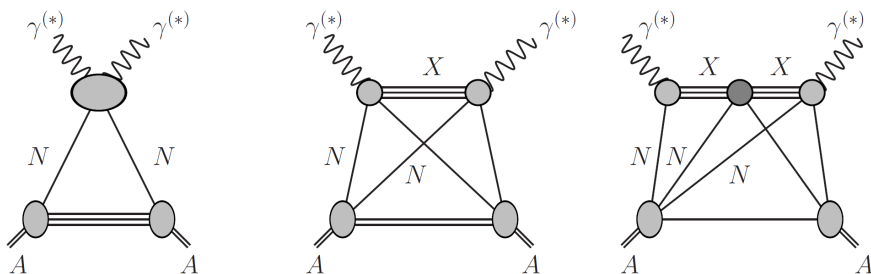


Модель Грибова-Глаубера

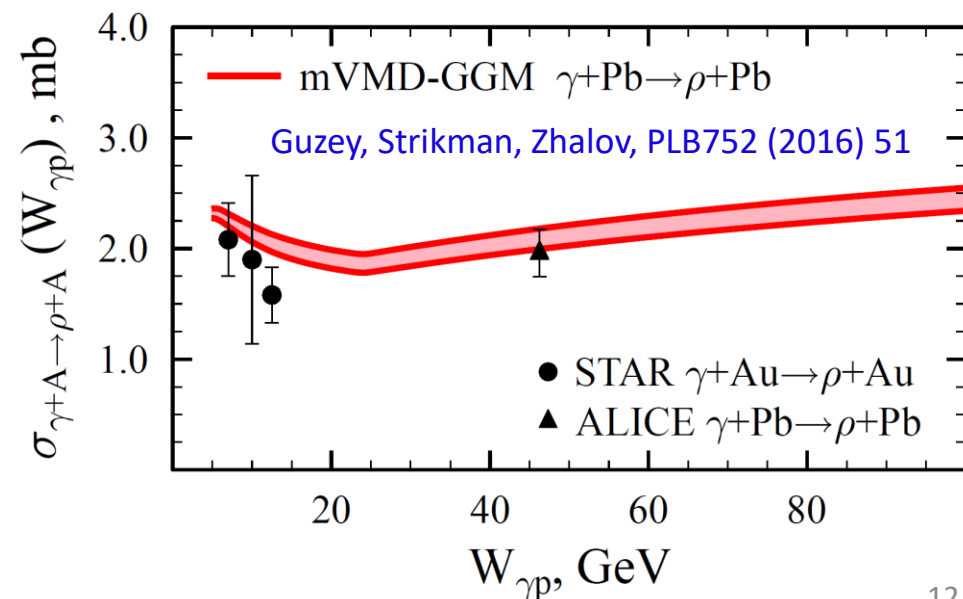
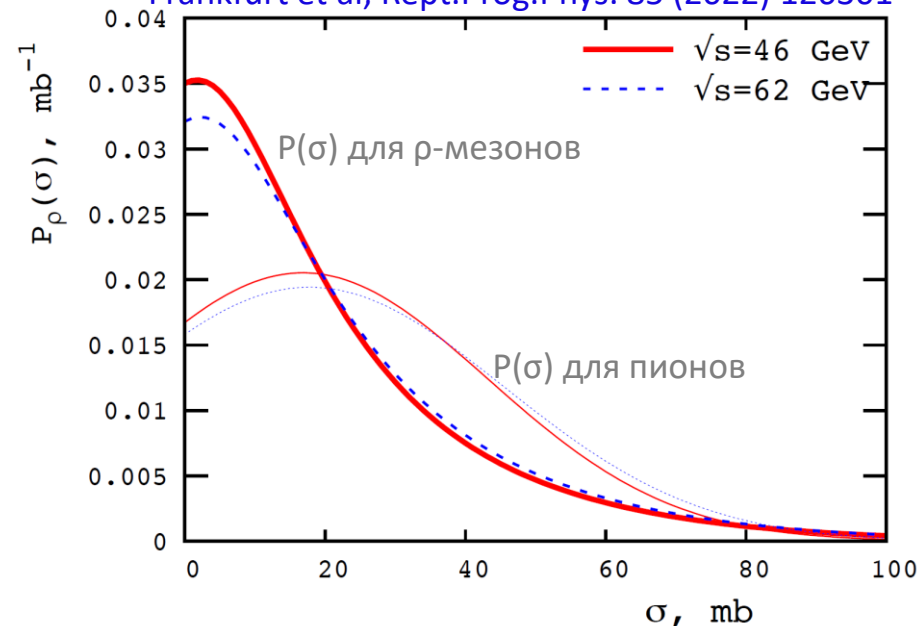
- Неупругих экранировок в двухкомпонентной VDM (Frankfurt, Strikman, Zhalov, PLB 537 (2002) 51), учитывающей неупругие перерасеяния с переходами $\rho \rightarrow \rho'$ в промежуточном состоянии, также оказывается **недостаточно** для описания измеренных сечений **при высоких энергиях**
- Эффект ядерной экранировки можно усилить учетом неупругих промежуточных состояний за счет **дифракционной диссоциации фотона в большие массы (Грибовские экранировки)**:

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

- Здесь вводится **плотность вероятности $P_V(\sigma)$** флуктуации фотона в адронное состояние, взаимодействующее с нуклонами с эффективным сечением σ .
- **Согласие с данными STAR** в Au-Au и **ALICE** в Pb-Pb @ 2.76 ТэВ

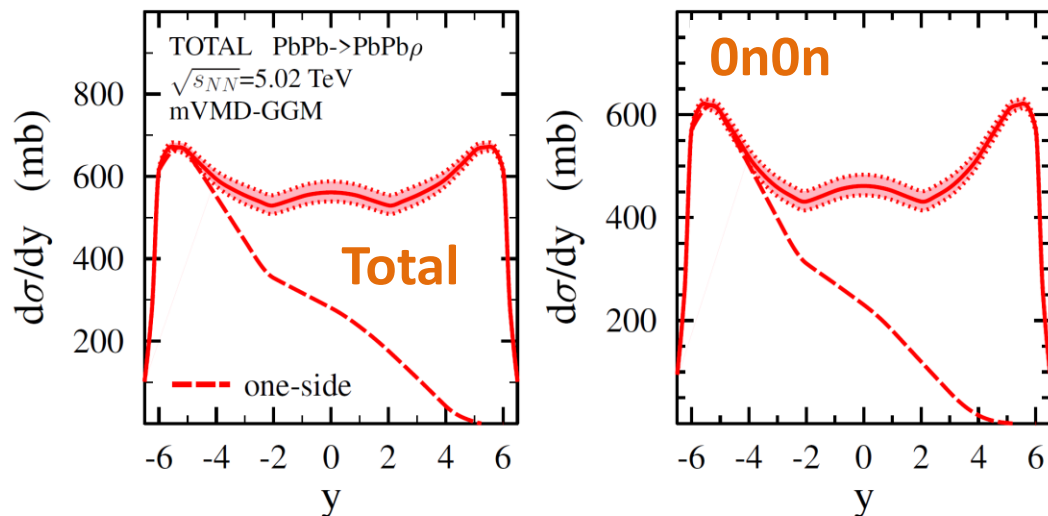


Frankfurt et al, Rept.Prog.Phys. 85 (2022) 126301

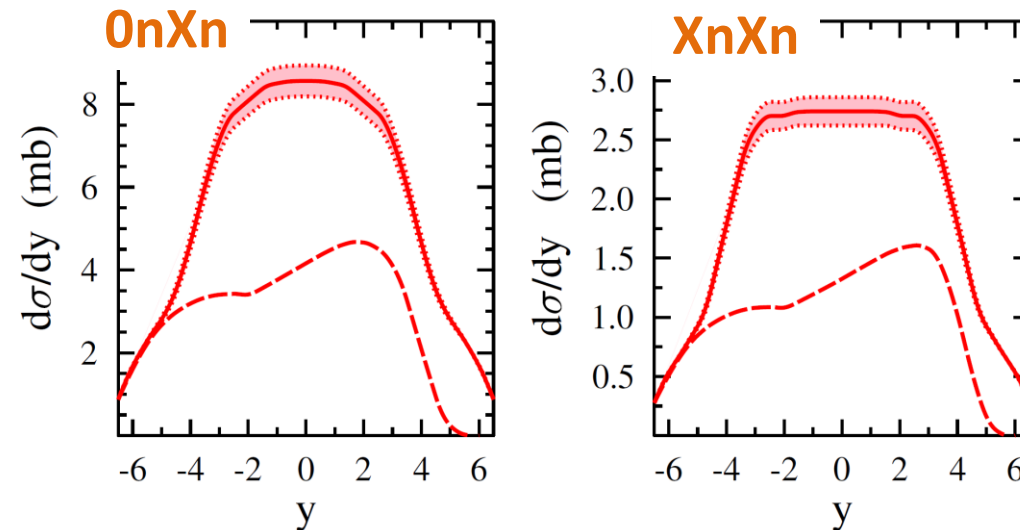
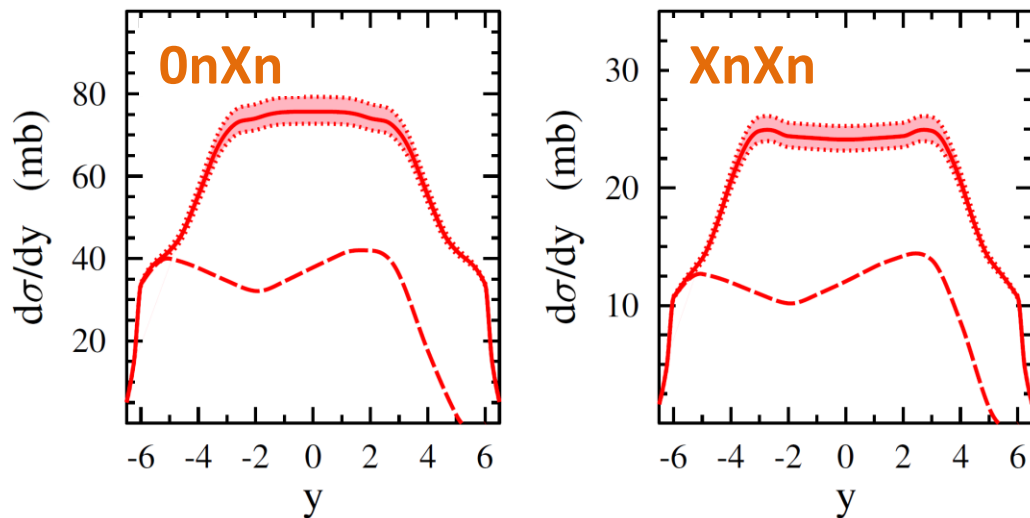
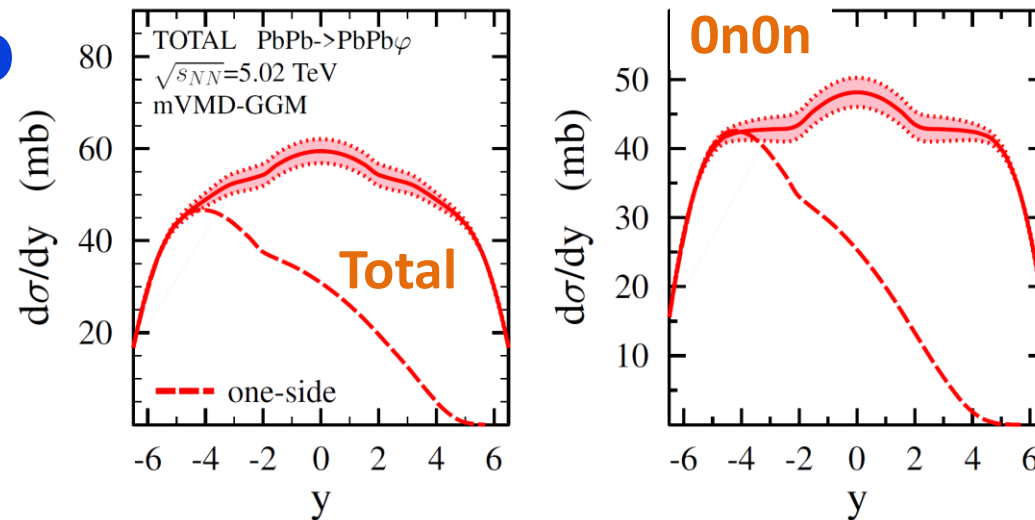


Предсказания для Pb-Pb UPC @ 5.02 TeV

ρ



ϕ



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

Фоторождение тяжелых векторных мезонов в
пертурбативной КХД

Фоторождение J/ψ на протоне

- LLO pQCD: Сечение эксклюзивного фоторождения J/ψ пропорционально квадрату глюонной плотности:

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

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

- Масса с-кварка определяет жесткий масштаб:

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

- Бьеркеновские x , доступные на LHC:

$$x = \frac{M_{J/\psi}^2}{W_{\gamma p}^2} = \frac{M_{J/\psi}}{2E_p} \exp(\pm y) \sim 10^{-2} - 10^{-5}$$

Фоторождение векторных мезонов в p-Pb УПС можно использовать для получения ограничений на глюонные PDF при малых x и поиска эффектов насыщения

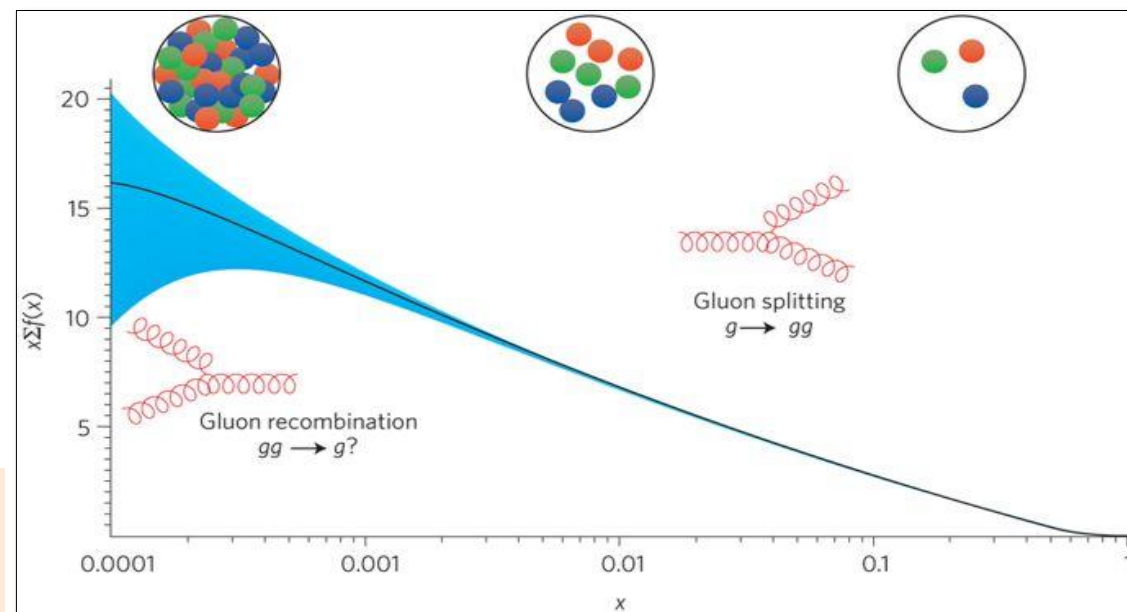
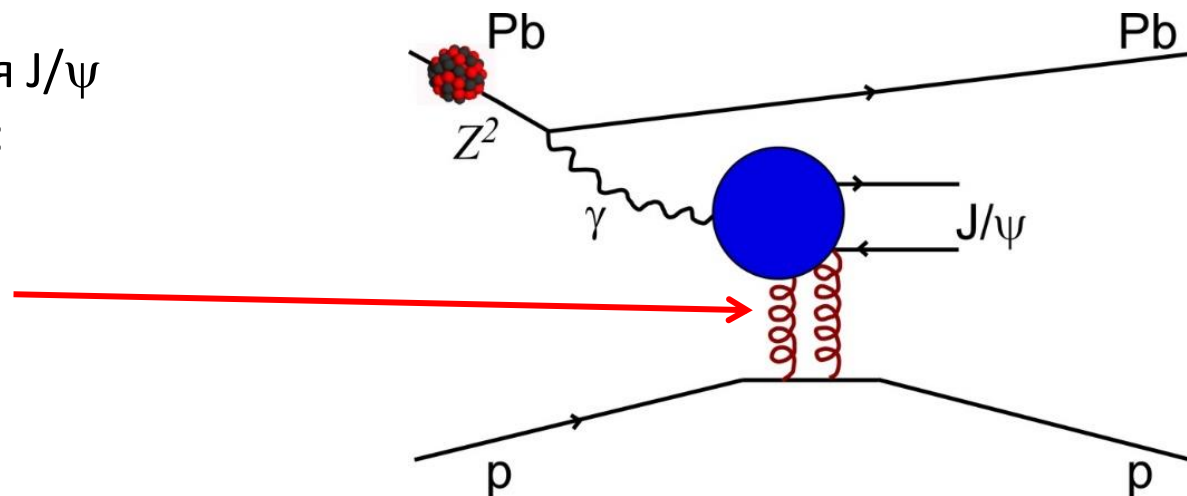


Figure courtesy of Voica Radescu, DESY

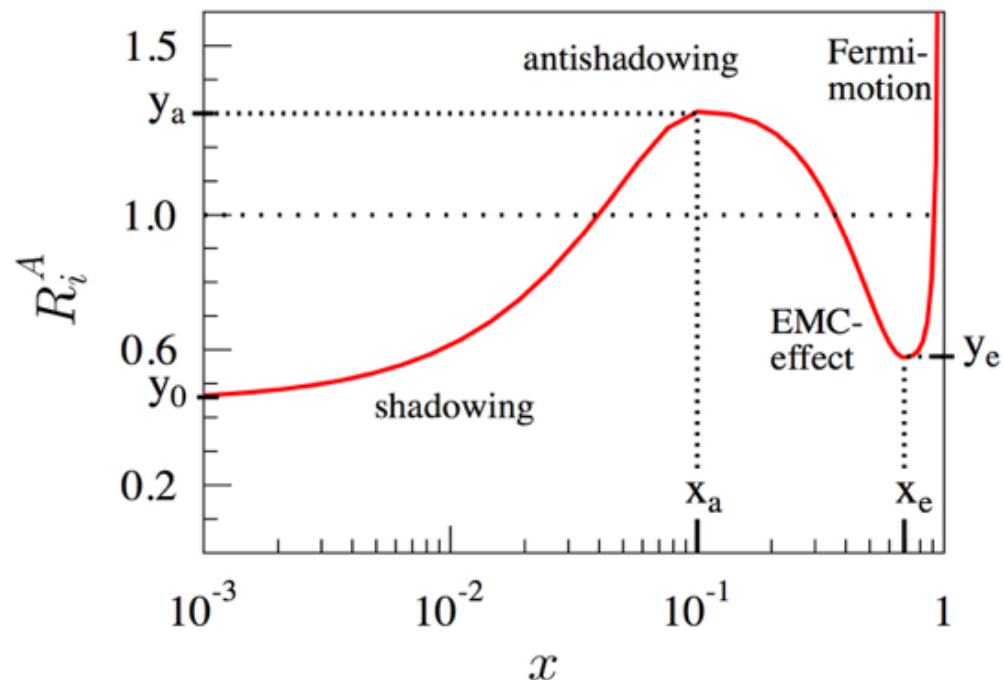
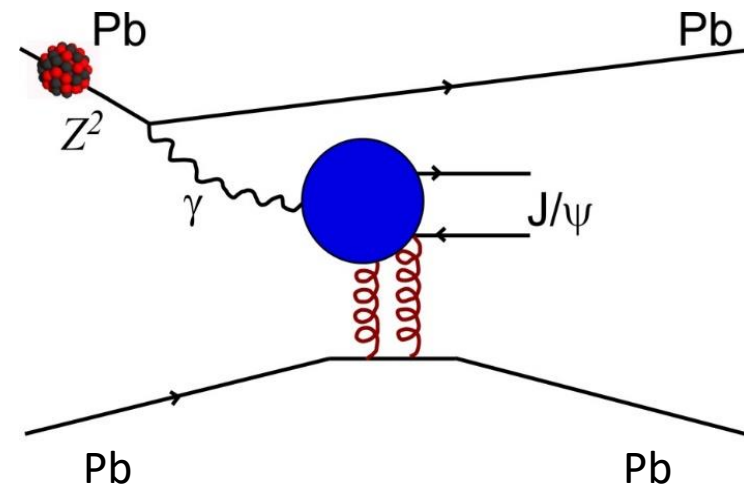
Фоторождение J/ψ на ядрах

По аналогии с фоторождением на протонах сечение когерентного фоторождения J/ψ пропорционально квадрату глюонной плотности в ядрах:

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

Измерения сечений фоторождения тяжелых векторных мезонов в Pb-Pb УПС позволяют изучать поведение партонных плотностей и глюонных экранировок в ядрах при малых x:

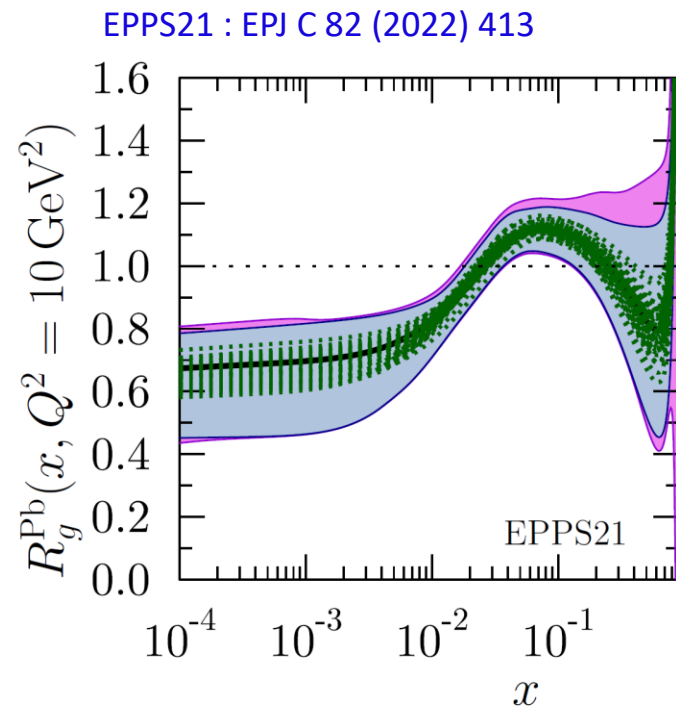
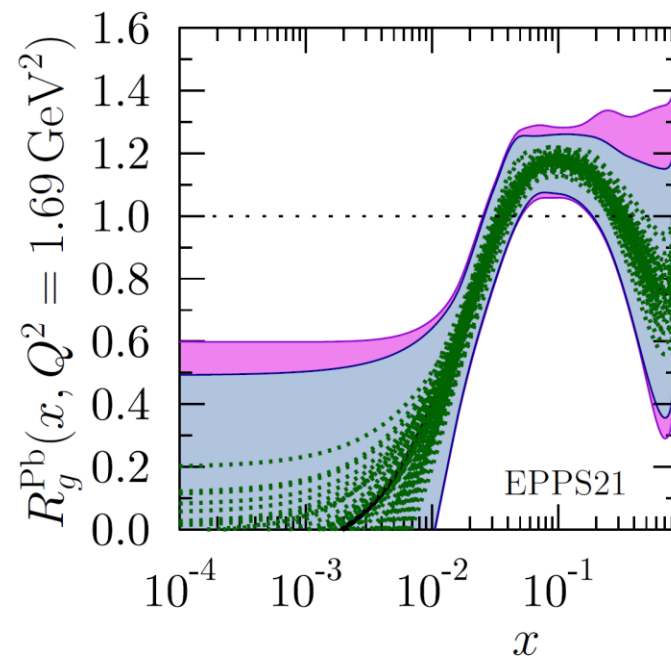
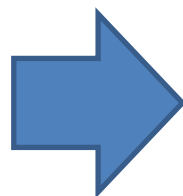
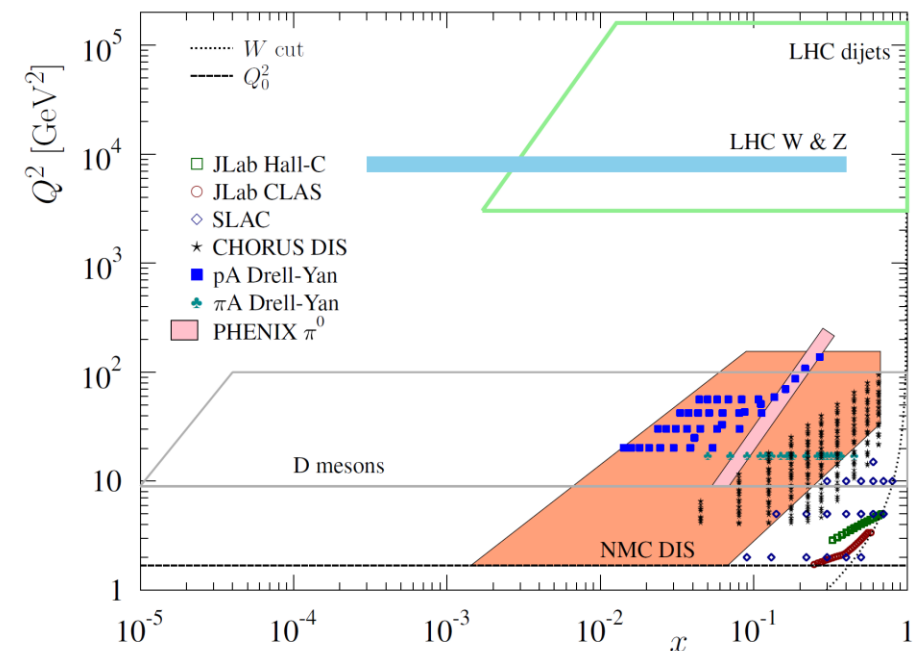
$$R_g^A(x, Q^2) = \frac{g_A(x, Q^2)}{Ag_p(x, Q^2)}$$



Партонные плотности в ядрах (nPDFs)

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

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

Расчет сечений фоторождения J/ψ на ядрах

Guzey, EK, Strikman, Zhalov, PLB726 (2013) 290

- Сечение фоторождения вперед на протоне:

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

$$C_p(\mu^2) = \frac{\pi^3 \Gamma_{ee} M_{J/\psi}^3}{48 \alpha_{e.m.} \mu^8}$$

- Сечение когерентного фоторождения на ядрах:

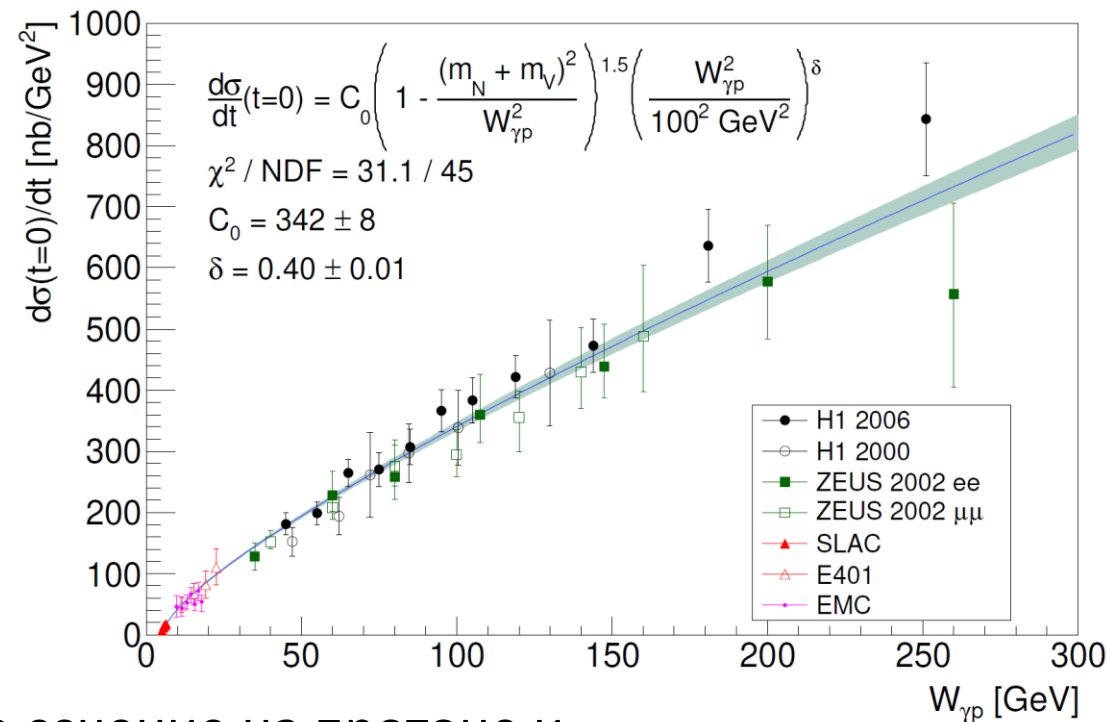
$$\sigma_{\gamma A \rightarrow VA}(W_{\gamma p}) = C_A(\mu^2) [\alpha_s(\mu^2) x g_A(x, \mu^2)]^2 \Phi_A(t_{\min})$$

можно выразить через экспериментально измеренное сечение на протоне и квадрат фактора глюонных экранировок:

$$\sigma_{\gamma A \rightarrow VA}(W_{\gamma p}) = \frac{C_A(\mu^2)}{C_p(\mu^2)} \frac{d\sigma_{\gamma p \rightarrow Vp}(W_{\gamma p}, t=0)}{dt} \left[\frac{x g_A(x, \mu^2)}{A x g_p(x, \mu^2)} \right]^2 \Phi_A(t_{\min}) \quad \Phi_A(t_{\min}) = \int_{-\infty}^{t_{\min}} dt |F_A(t)|^2$$

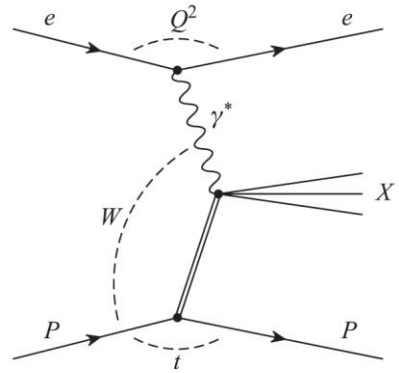
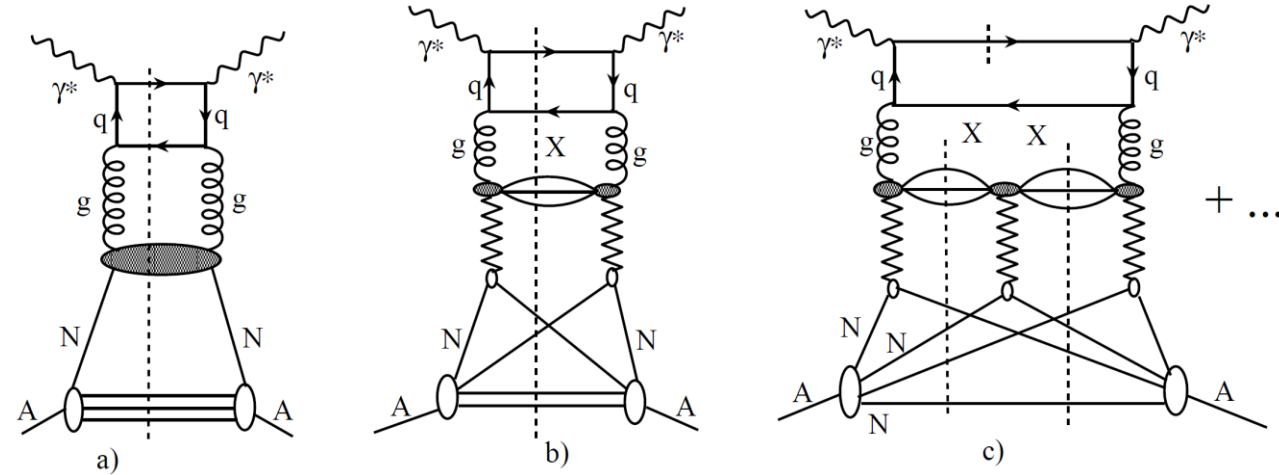
$$S_{\text{coh}}(x, \mu^2) = R^2(x, \mu^2) = \left[\frac{x g_A(x, \mu^2)}{A x g_p(x, \mu^2)} \right]^2$$

- из nPDF-параметризации
- из приближения лидирующих твистов (см. следующий слайд)

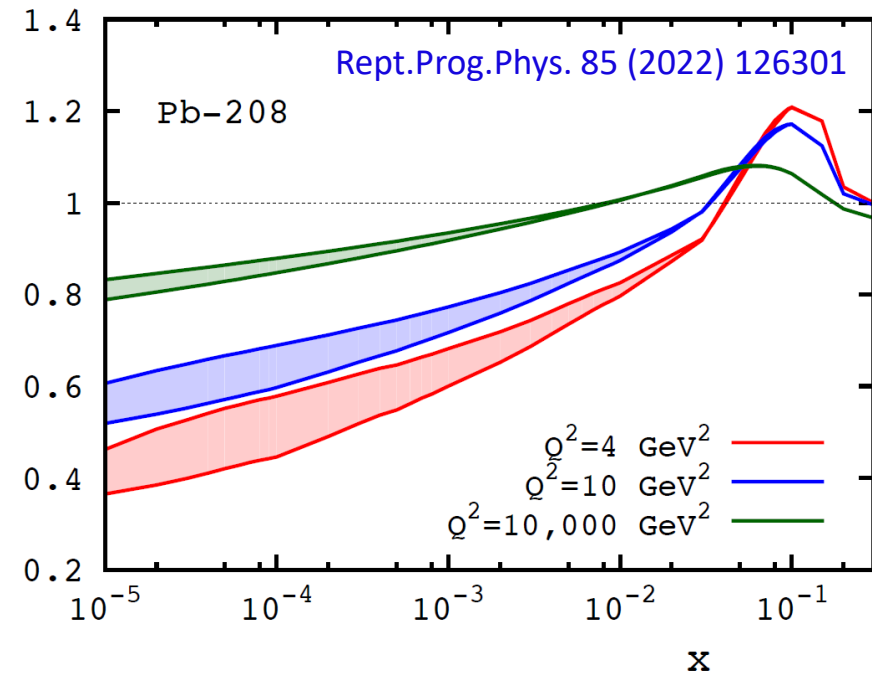


Расчет nPDF в приближении лидирующих твистов

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



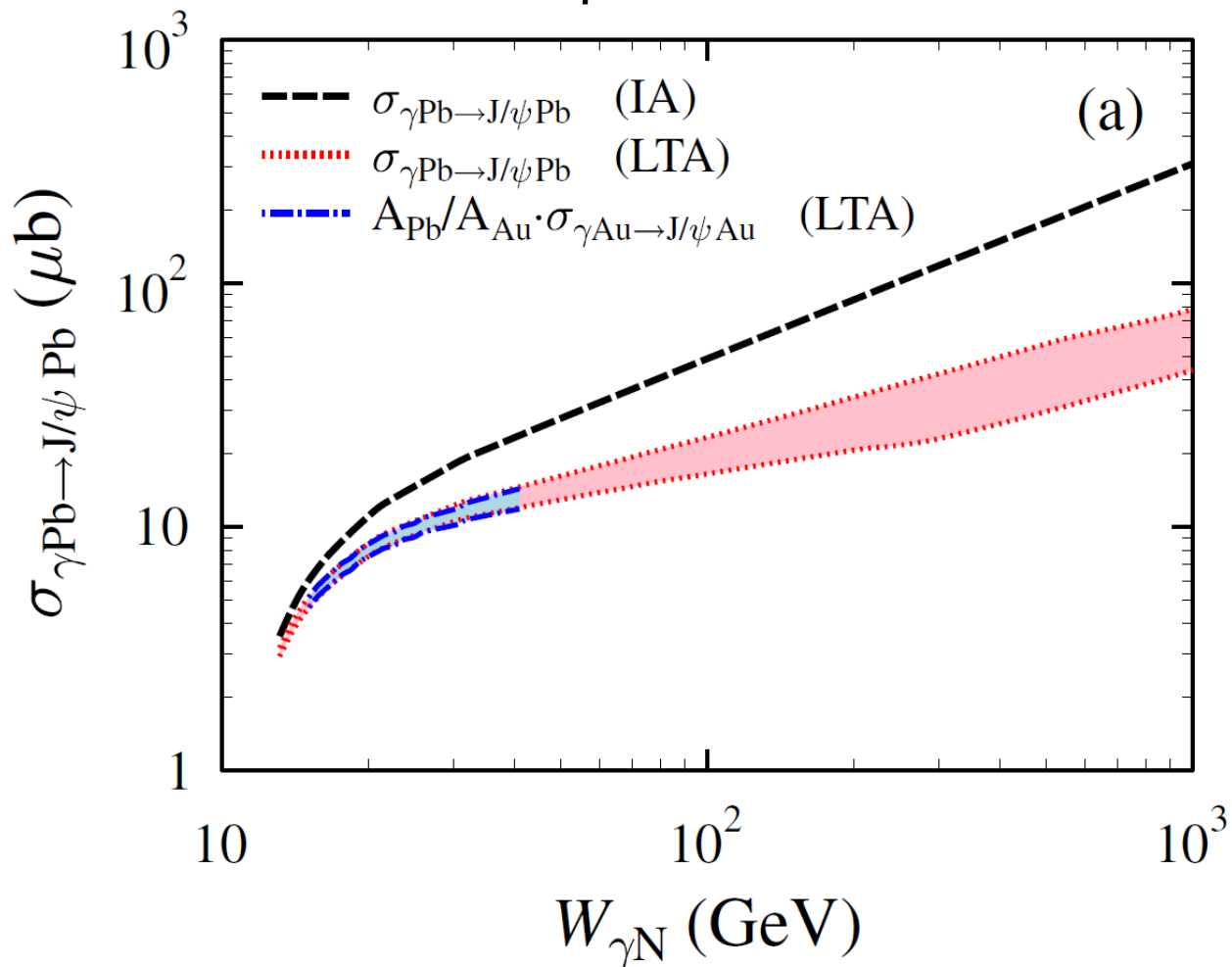
- основано на идее Грибова о связи ядерных экранировок и дифракции и теореме о факторизации инклюзивных и дифракционных партонных распределений.
- В расчетах используются дифракционные партонные распределения, измеренные на HERA
- Работают уравнения эволюции DGLAP



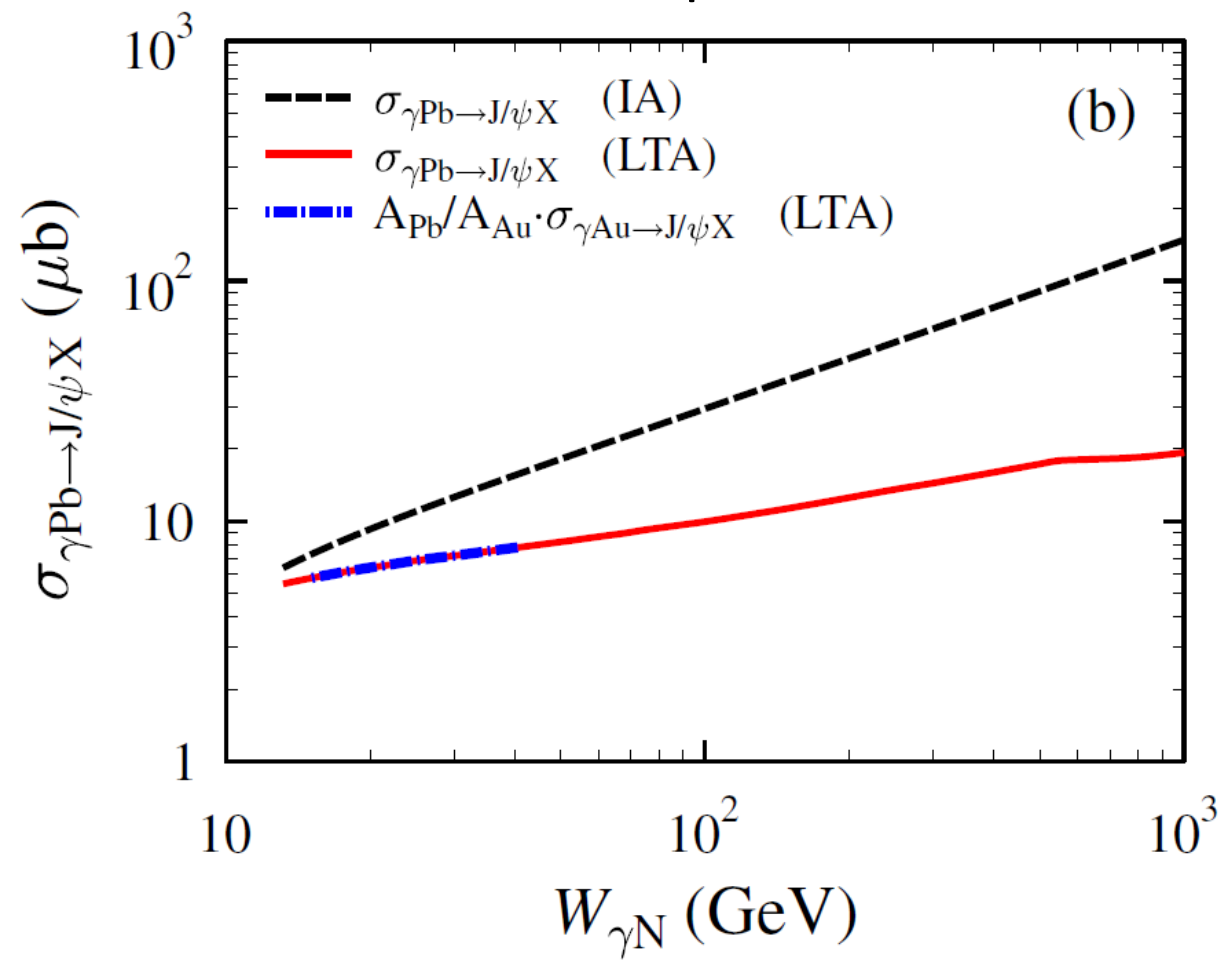
Сечение фоторождения J/ψ в LTA

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

когерентное

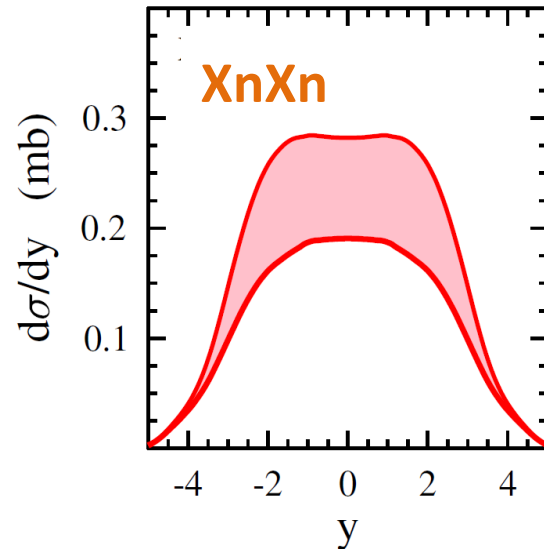
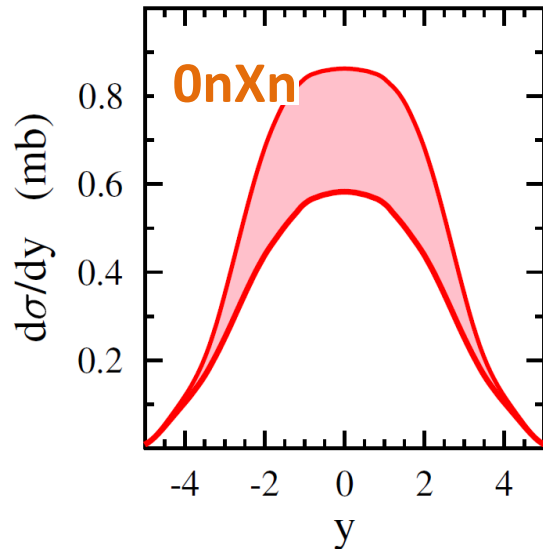
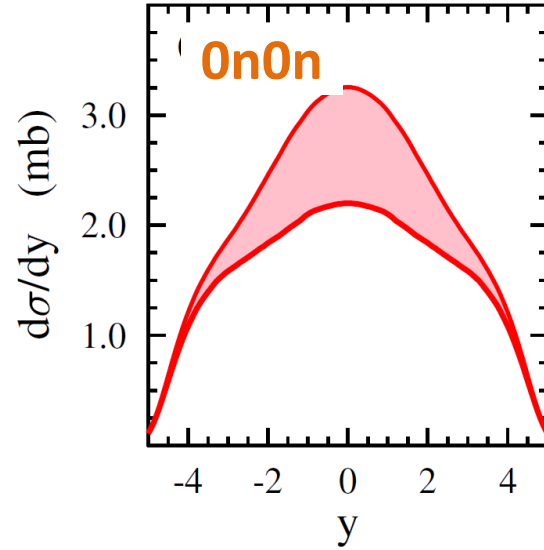
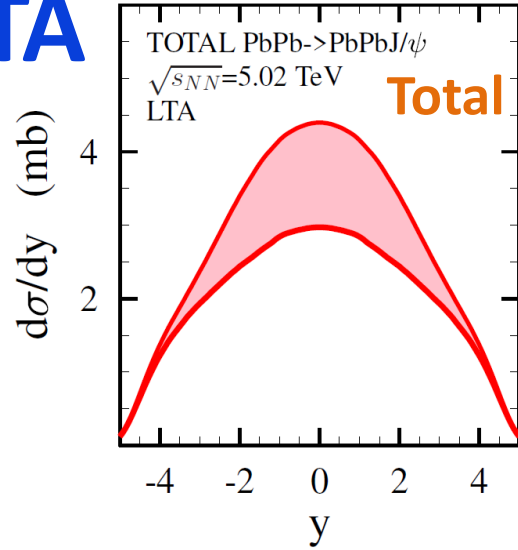


некогерентное

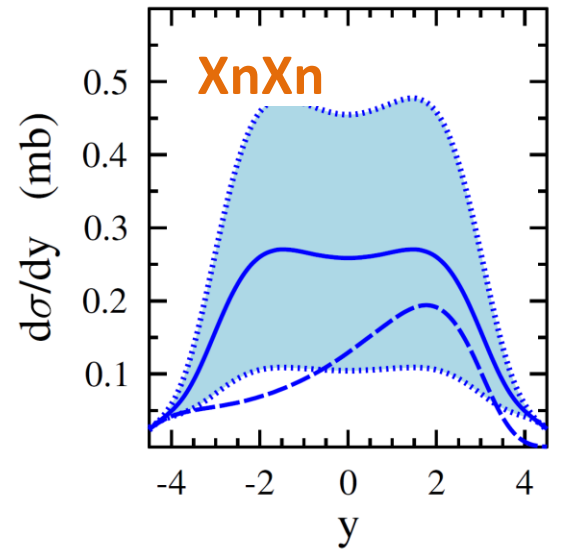
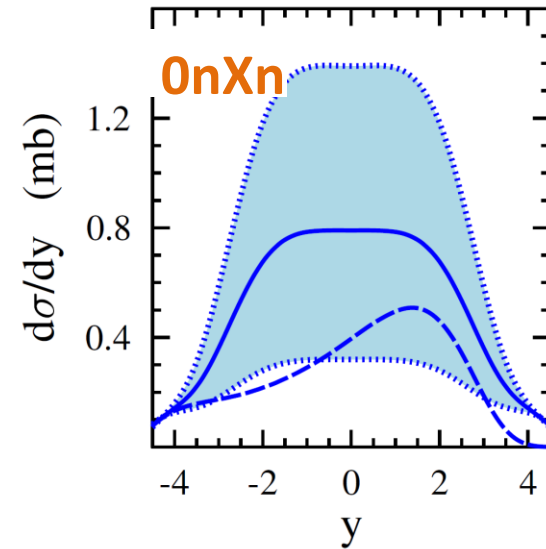
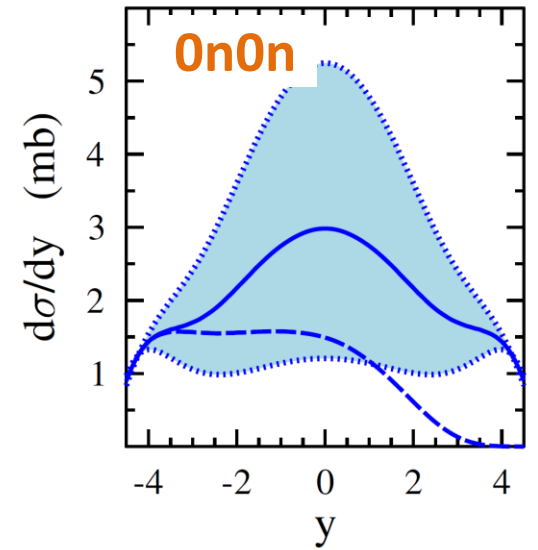
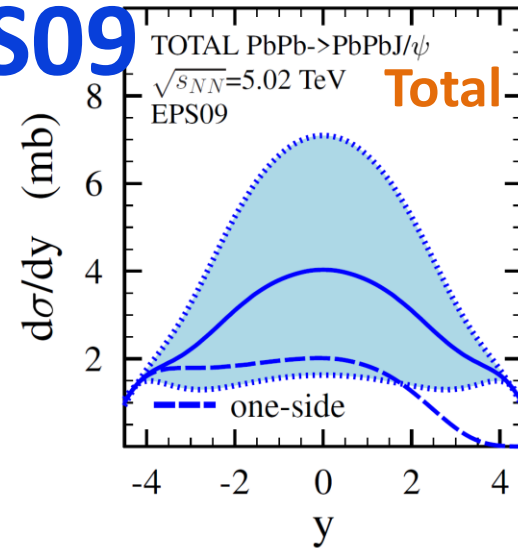


Зависимость когерентных сечений J/ψ от быстроты

LTA



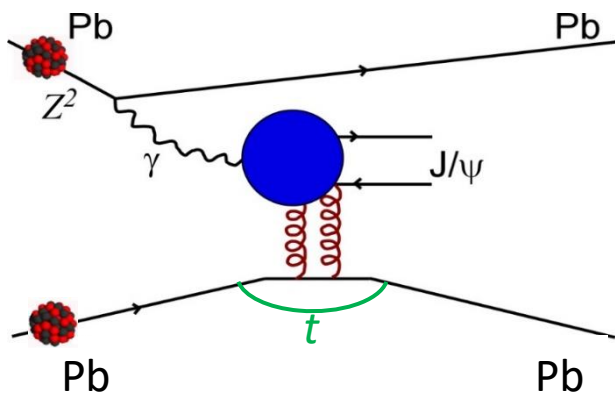
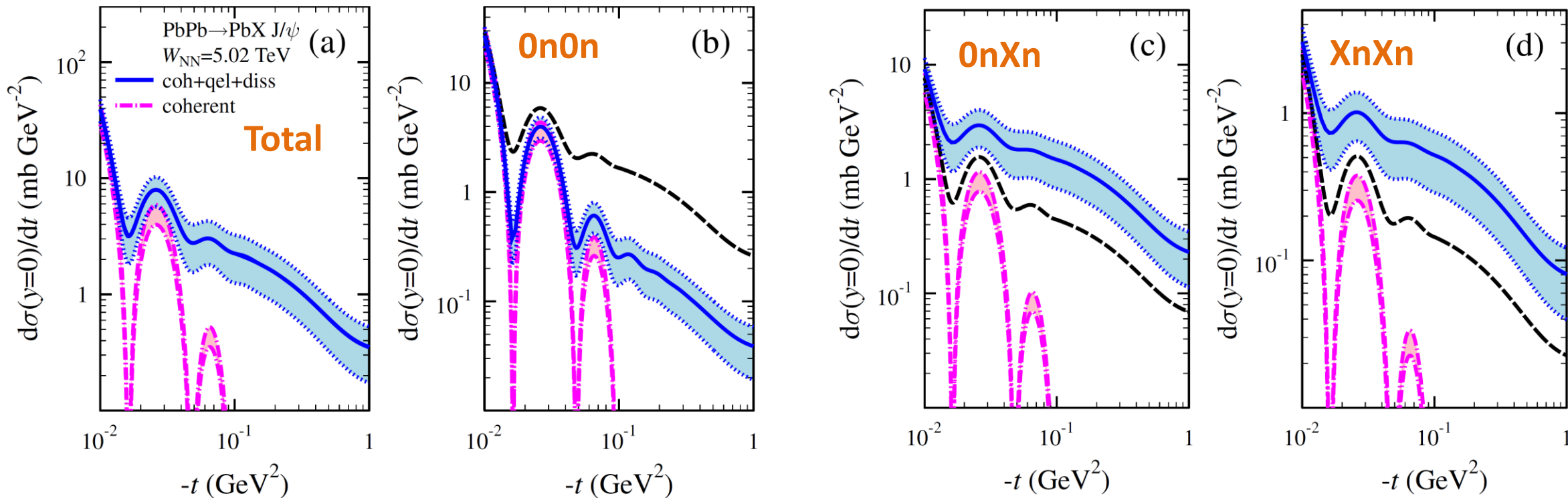
EPS09



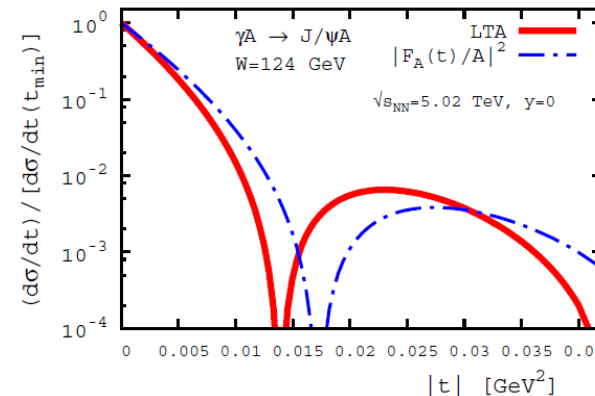
- Доля 0n0n ~ 80%
- Предсказания для ψ(2S) и Υ(1S) в приложении

t-зависимость сечений фоторождения J/ψ

Kryshen, Strikman, Zhilov, PRC108 (2023) 024904



В модели LTA также можно получить экранировки в зависимости от прицельного параметра, которые приводят к модификации распределений по t для векторных мезонов



Guzey, Strikman, Zhilov, PRC 95 (2017) 025204

A futuristic control room with a woman in a maid outfit standing before a large glowing circular portal. The room is filled with various monitors and control panels, all illuminated with a blue and orange glow. The woman is seen from behind, looking towards the bright circular opening at the end of the corridor.

Глава 2

Эксперимент ALICE*

Эксперимент ALICE

Покрытие по быстроте:

$$-3.7 < \eta < 5.1$$

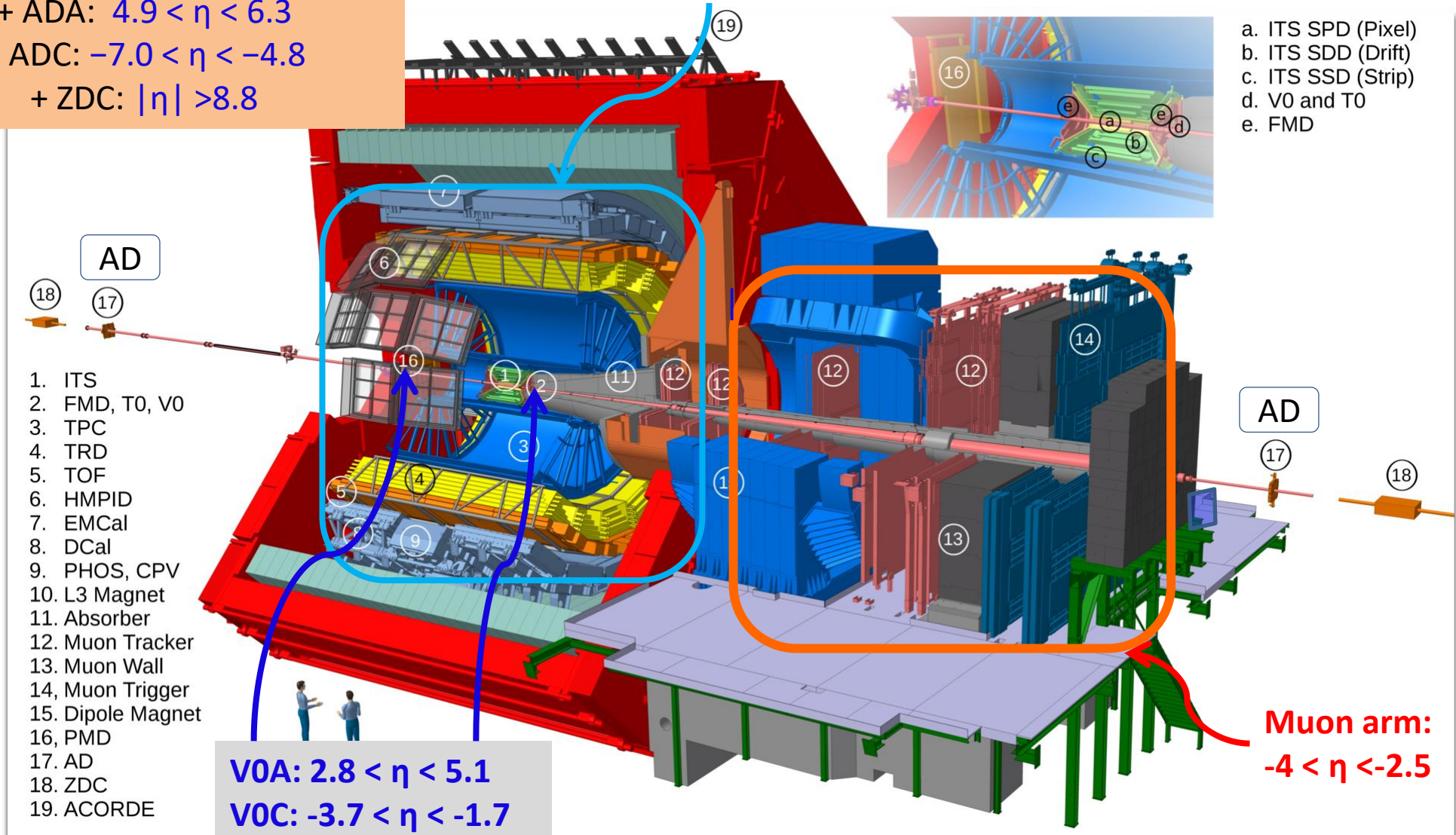
$$+ \text{ADA: } 4.9 < \eta < 6.3$$

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

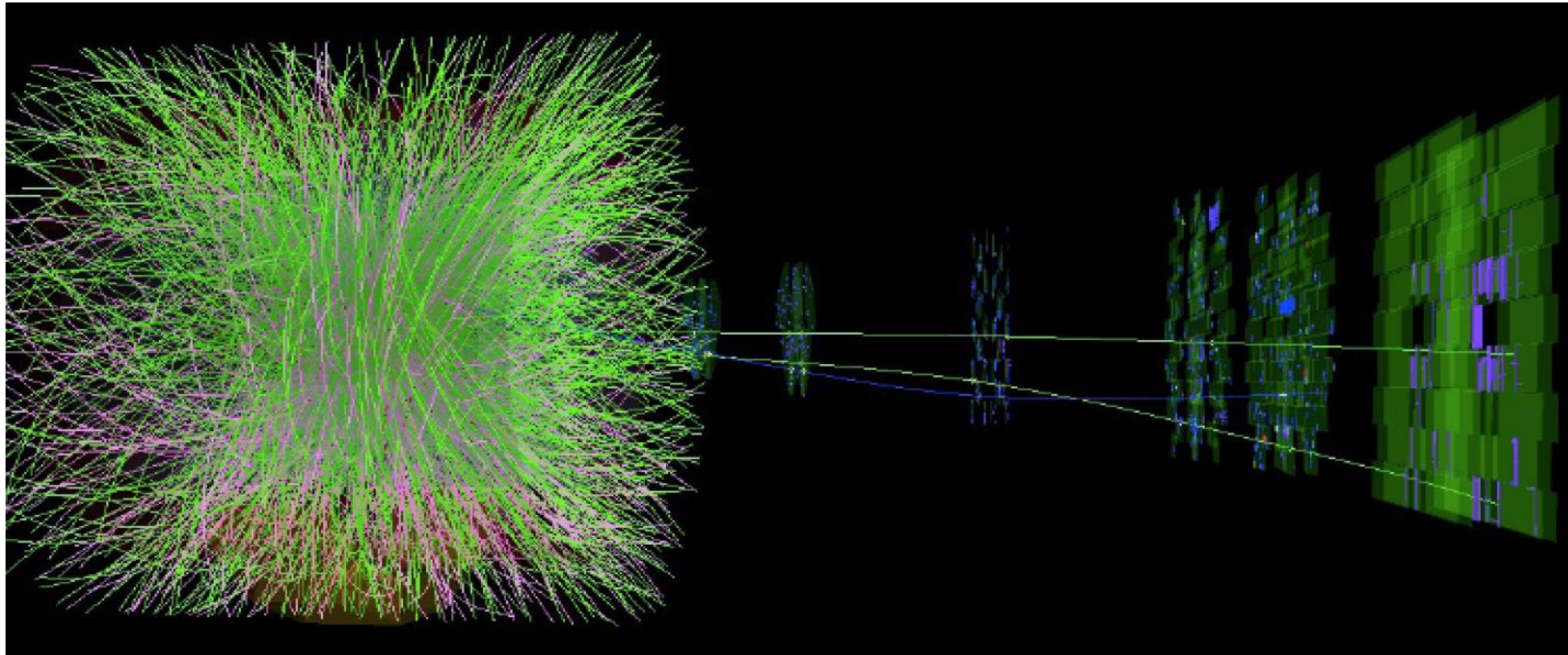
$$+ \text{ZDC: } |\eta| > 8.8$$

Central barrel: $|\eta| < 0.9$

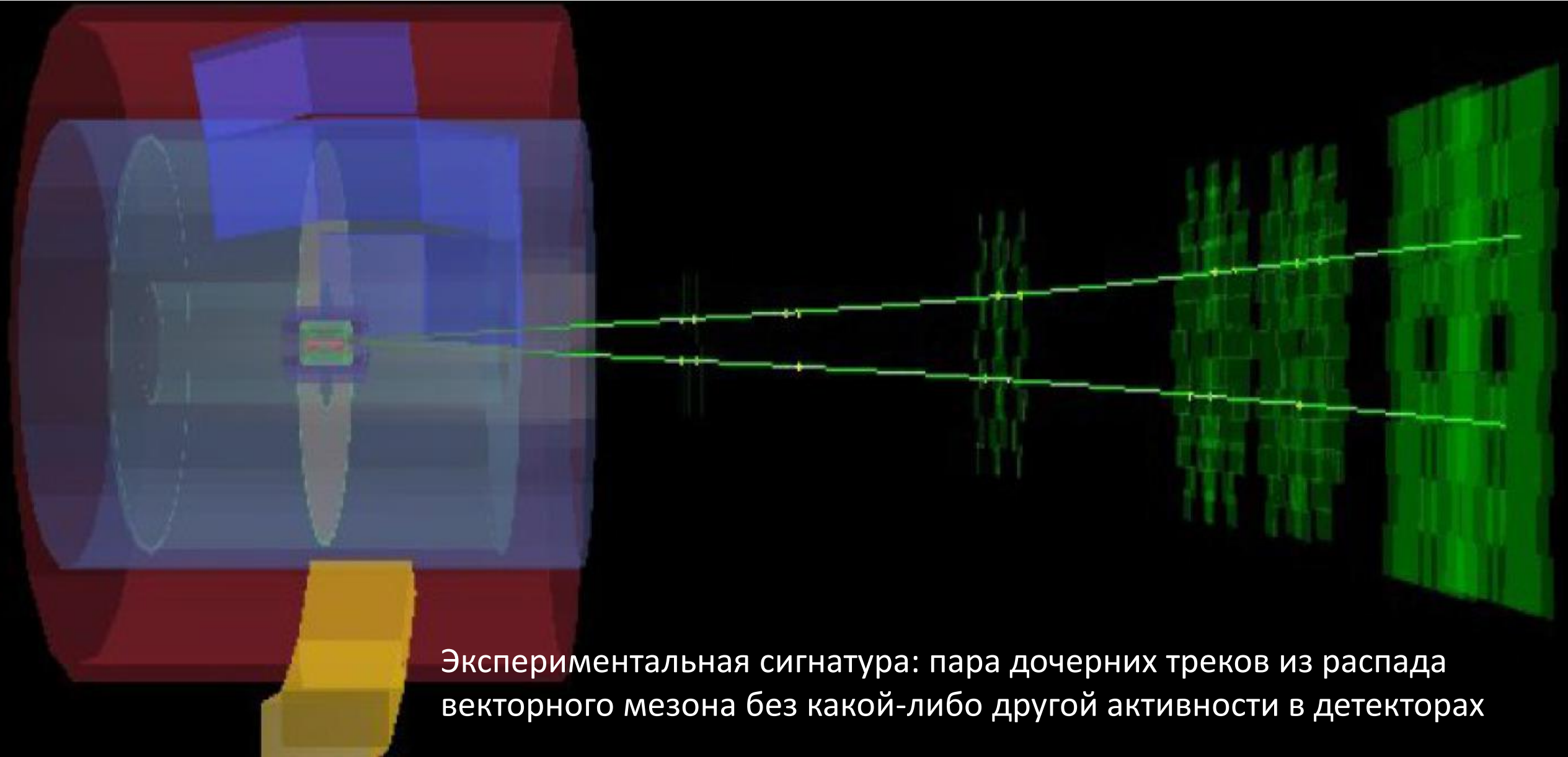
Inner SPD layer: $|\eta| < 2.0$



От обычных столкновений ядер...



к ультрапериферическим столкновениям



Экспериментальная сигнатура: пара дочерних треков из распада векторного мезона без какой-либо другой активности в детекторах

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 ⁻¹	[19]
2011	Pb-Pb	2.76	$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$-4 < y < -2.5$	55 мкб ⁻¹	[20]
			$J/\psi \rightarrow \ell\ell$	$ y < 0.9$	23 мкб ⁻¹	[21; 22]
2013	p-Pb	5.02	$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$2.5 < y < 4.0$	3.9 нб ⁻¹	[23]
			$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$1.2 < y < 2.7$	3.1 нб ⁻¹	[24]
			$J/\psi \rightarrow \ell\ell$	$ y < 0.8$	2.1 нб ⁻¹	[24]
2013	Pb-p	5.02	$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$-3.6 < y < -2.6$	4.5 нб ⁻¹	[23]
			$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$-2.5 < y < -1.2$	3.7 нб ⁻¹	[24]
			$J/\psi \rightarrow \ell\ell$	$ y < 0.8$	4.8 нб ⁻¹	[24]
2015	Pb-Pb	5.02	$\rho \rightarrow \pi\pi$	$ y < 0.8$	485 мб ⁻¹	[25]
			$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$-4 < y < -2.5$	216 мкб ⁻¹	[26]
2016	p-Pb	8.16	$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$-4 < y < -2.5$	7.9 нб ⁻¹	[27]
2017	Xe-Xe	5.44	$\rho \rightarrow \pi\pi$	$ y < 0.8$	280 мб ⁻¹	[28]
2018	Pb-Pb	5.02	$J/\psi \rightarrow \mu\mu$	$-4 < y < -2.5$	538 мкб ⁻¹	[26; 29]
			$J/\psi \rightarrow \ell\ell$	$ y < 0.8$	233 мкб ⁻¹	[29–33]

Триггерная стратегия

Основная проблема ALICE в сеансах 1 и 2:

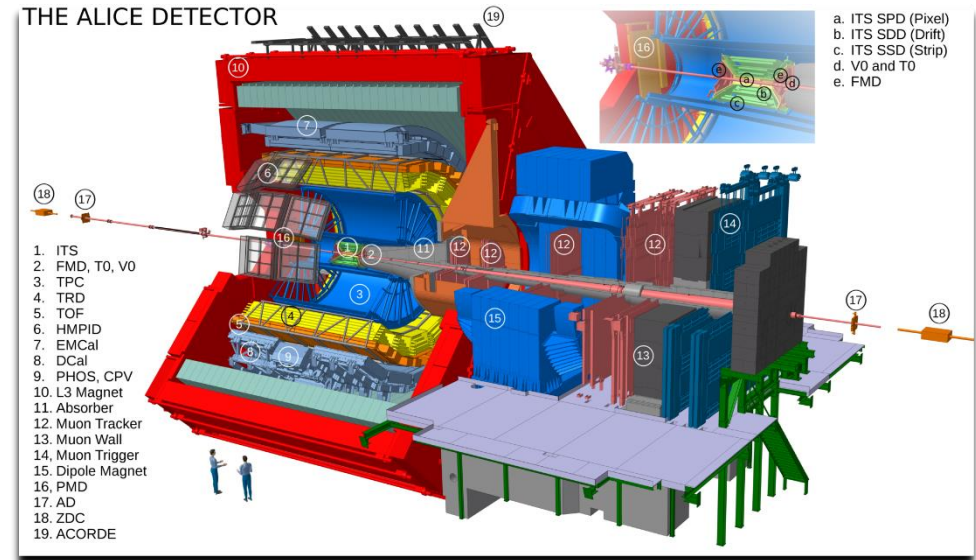
- Частота адронных Pb-Pb столкновений: до 8 кГц
- **Большое мертвое время:** до 2 мс/событие
- Частота записи не превышает 500 Гц
- Необходим жесткий отбор событий на уровне онлайн-триггера

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

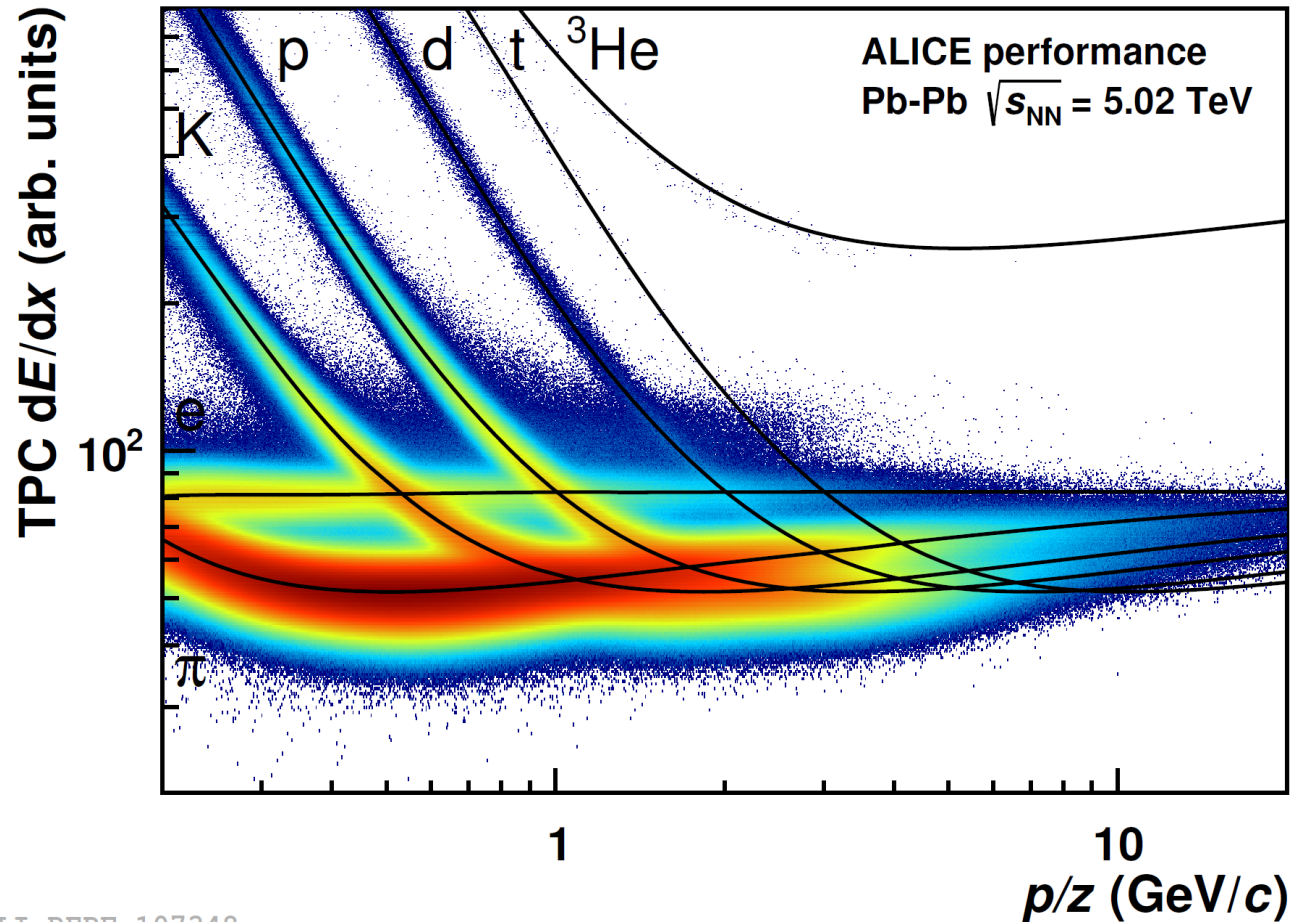
Пример триггера (PbPb2018) на распады $J/\psi \rightarrow \mu\mu$ в области $|y| < 0.8$:

- 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 трекета в SPD с back-to-back топологией ($\Delta\phi > 150^\circ$)

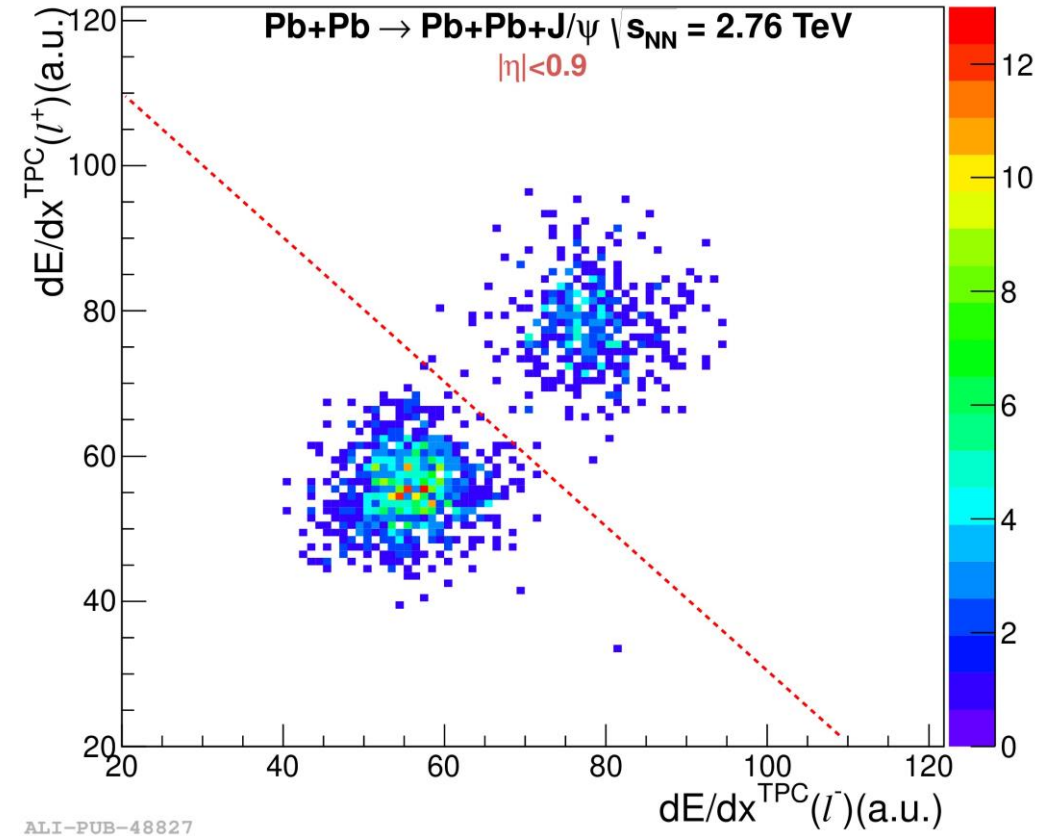


Год	Система	$\sqrt{s_{NN}}$, ТэВ	Канал	Быстрота	Основной триггер
2010	Pb-Pb	2.76	$\rho \rightarrow \pi\pi$	$ y < 0.5$	SH2 OM2 $\overline{V0A}$ $\overline{V0C}$
2011	Pb-Pb	2.76	$J/\psi \rightarrow \mu\mu$ $J/\psi \rightarrow \ell\ell$	$-4 < y < -2.5$ $ y < 0.9$	MSL V0C $\overline{V0A}$ SH2 OMU $\overline{V0A}$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

Идентификация частиц



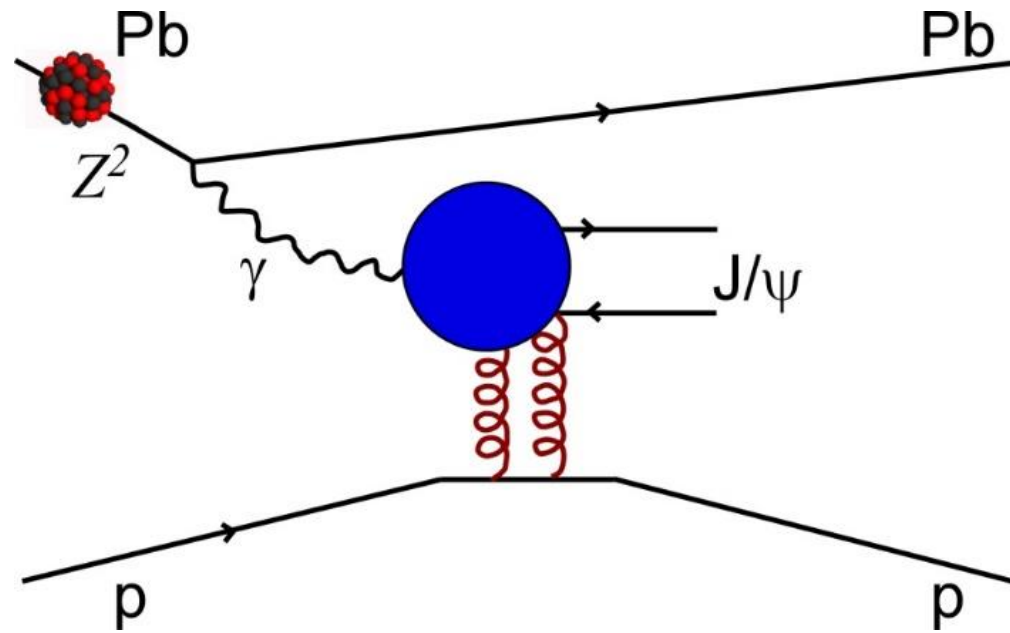
ALI-PERF-107348



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

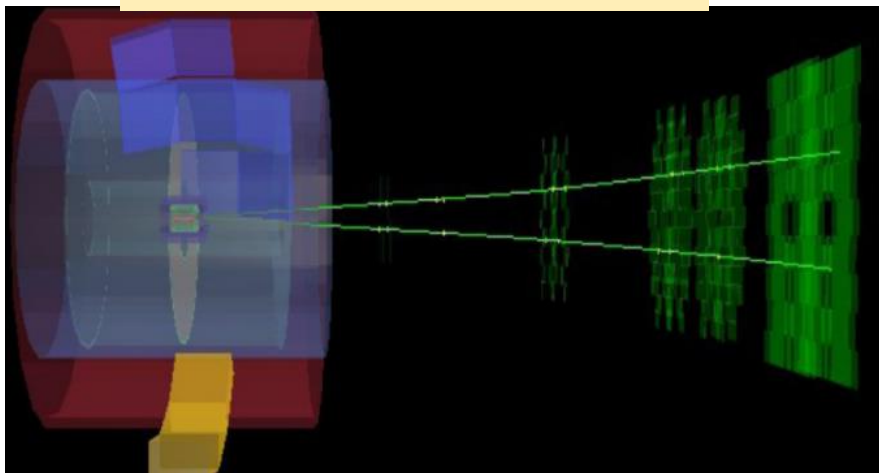
Глава 3

Фоторождение J/ψ на протоне

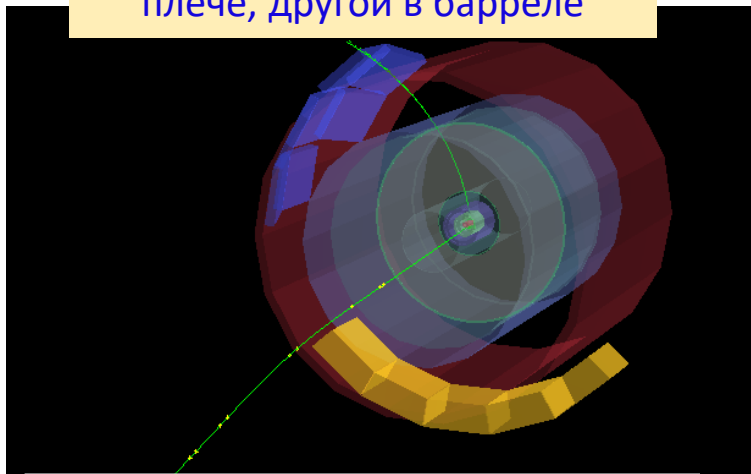


Эксклюзивное рождение J/ψ на протоне (p-Pb УПС)

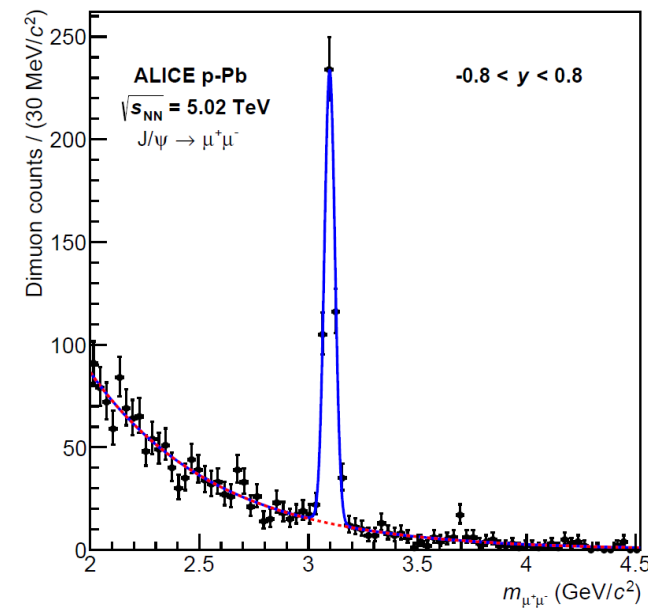
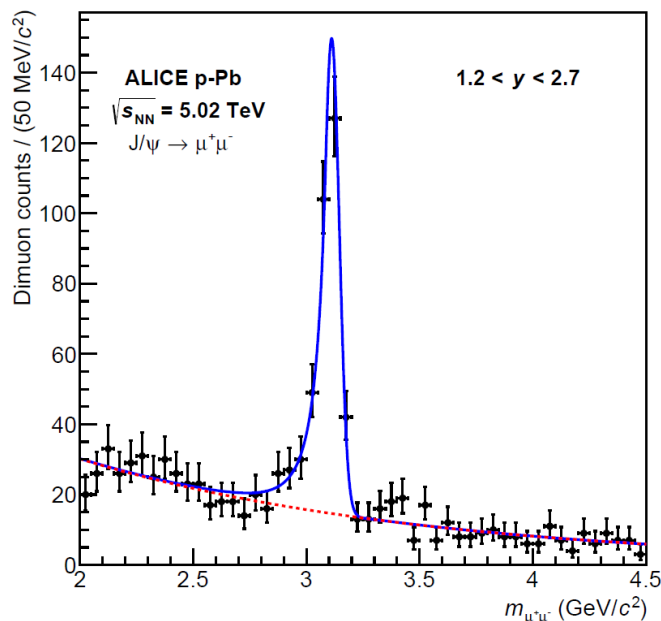
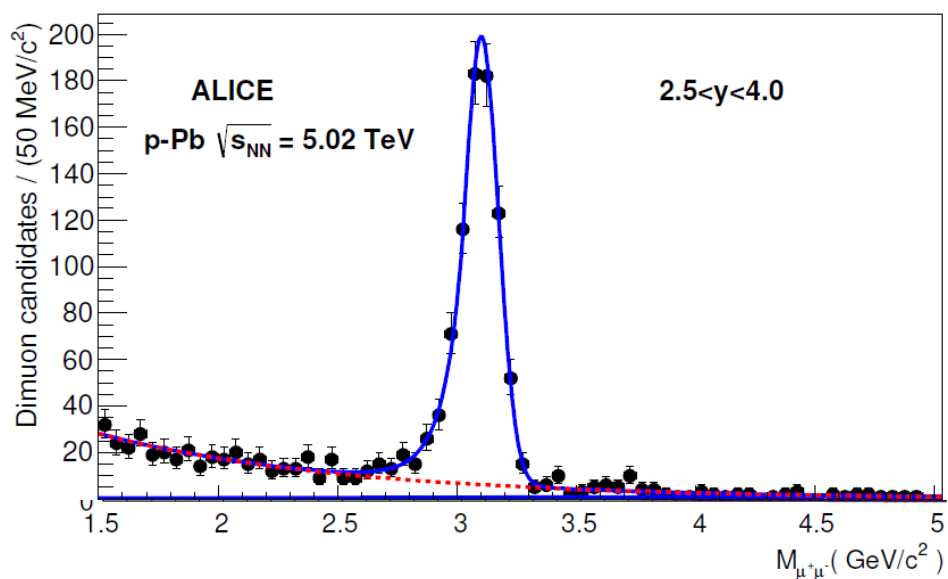
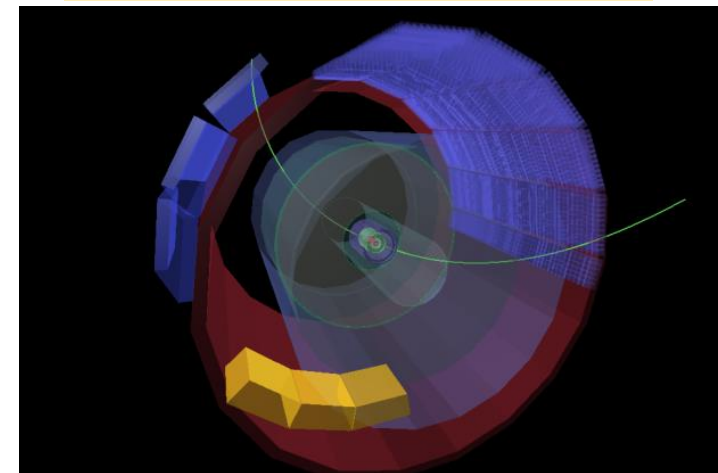
оба мюона с мюонным плече



один мюон в мюонном плече, другой в барреле



оба лептона в барреле



3 области измерения дилептонных распадов J/ψ + 2 конфигурации пучков (p-Pb и Pb-p)

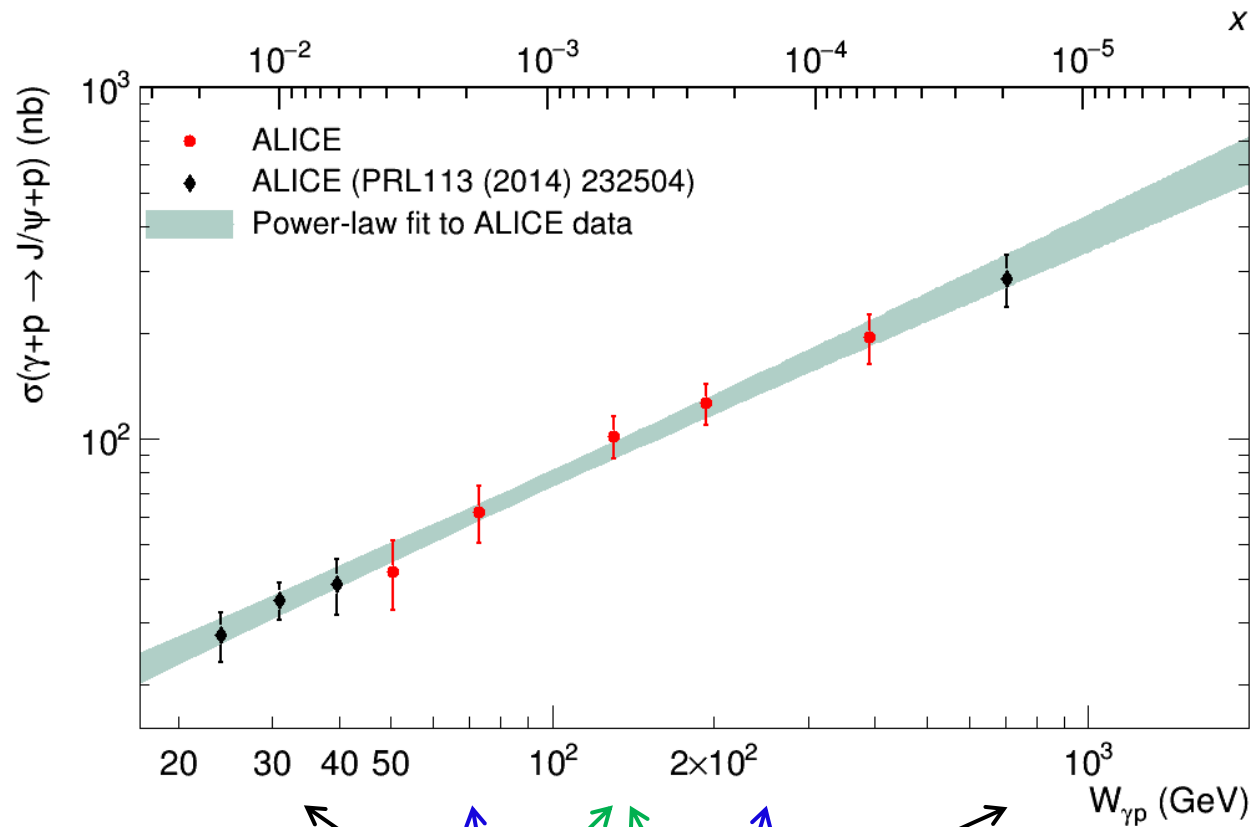
Эксклюзивное рождение J/ψ на протоне (p-Pb УПС)

ALICE: PRL 113 (2014) 232504

ALICE: EPJC 79 (2019) 402

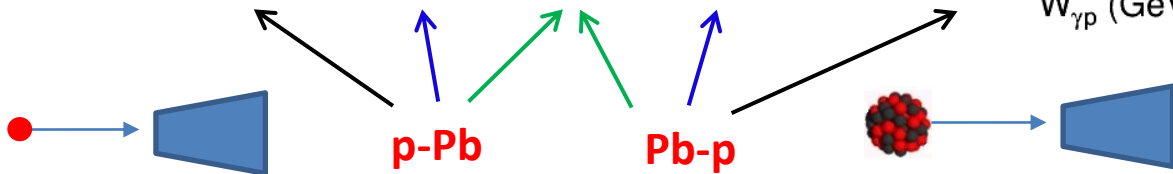
ALICE: arXiv: 2304.12403, accepted by PRD

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



- Измерения хорошо описываются степенной зависимостью:

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



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

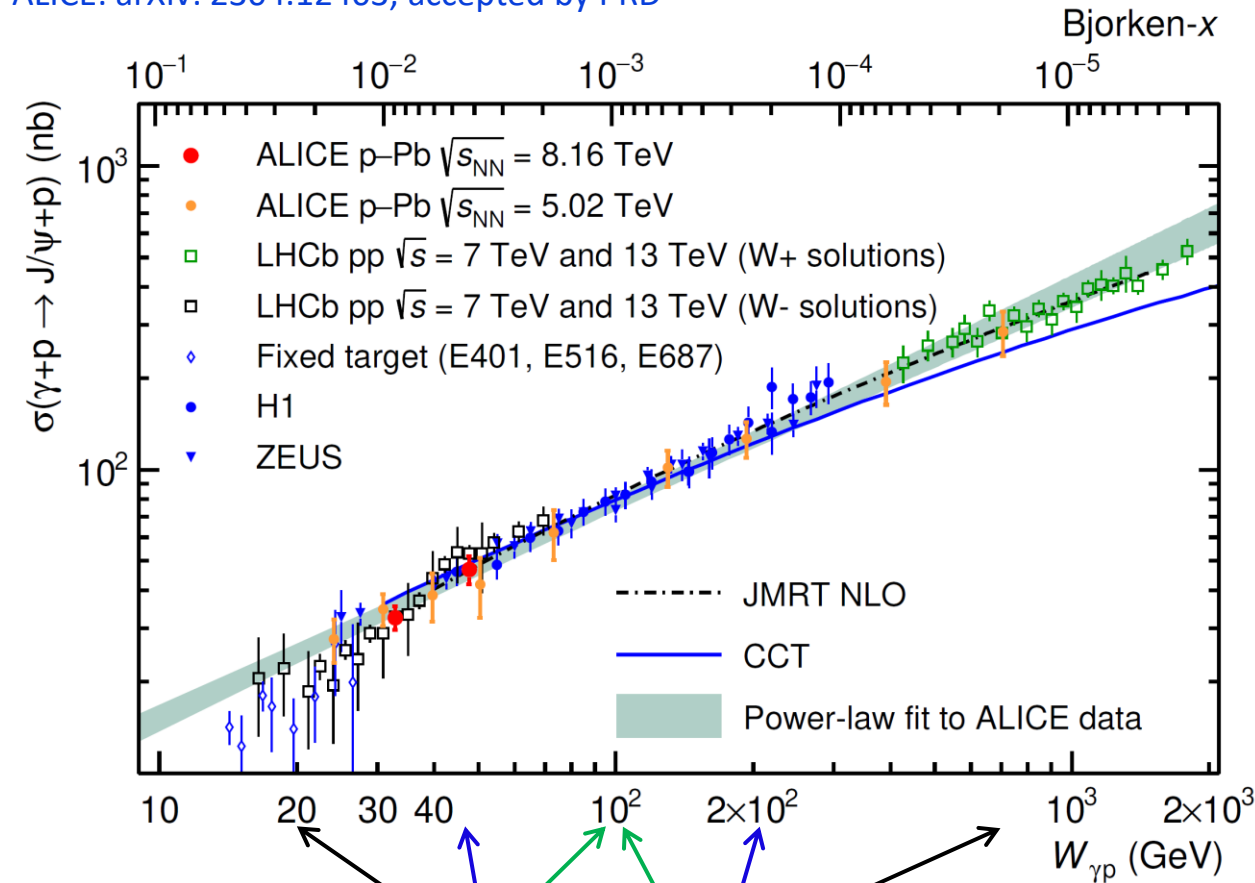
Эксклюзивное рождение J/ψ на протоне (p-Pb УПС)

ALICE: PRL 113 (2014) 232504

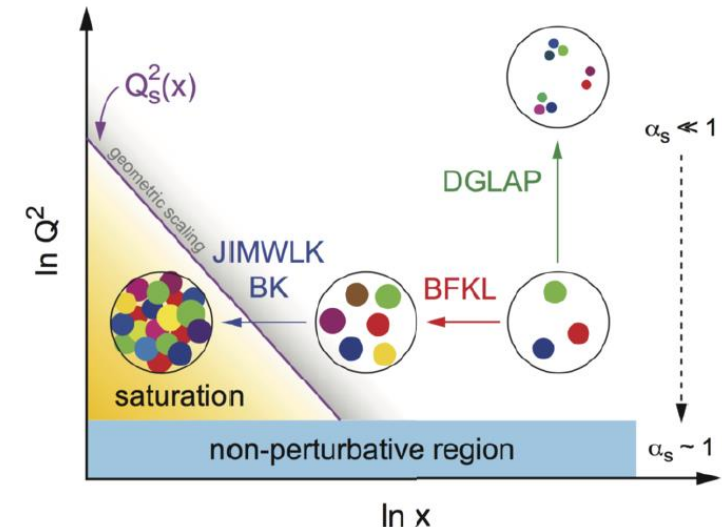
ALICE: EPJC 79 (2019) 402

ALICE: arXiv: 2304.12403, accepted by PRD

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



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



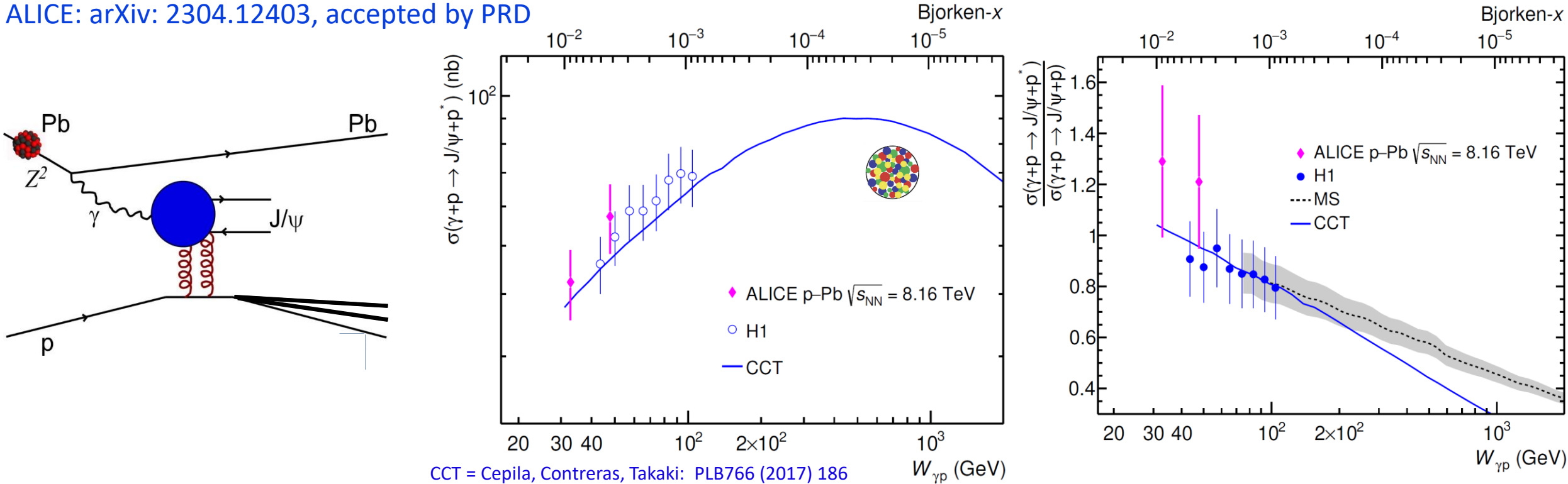
- Измерения хорошо описываются степенной зависимостью:

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

- В согласии с H1 ($\delta = 0.67 \pm 0.03$) и ZEUS ($\delta = 0.69 \pm 0.02 \pm 0.03$)
- В согласии с данными LHCb, полученными в pp
- Явных признаков насыщения не обнаружено
- Модели, основанные на насыщении глюонной плотности, также согласуются с данными

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

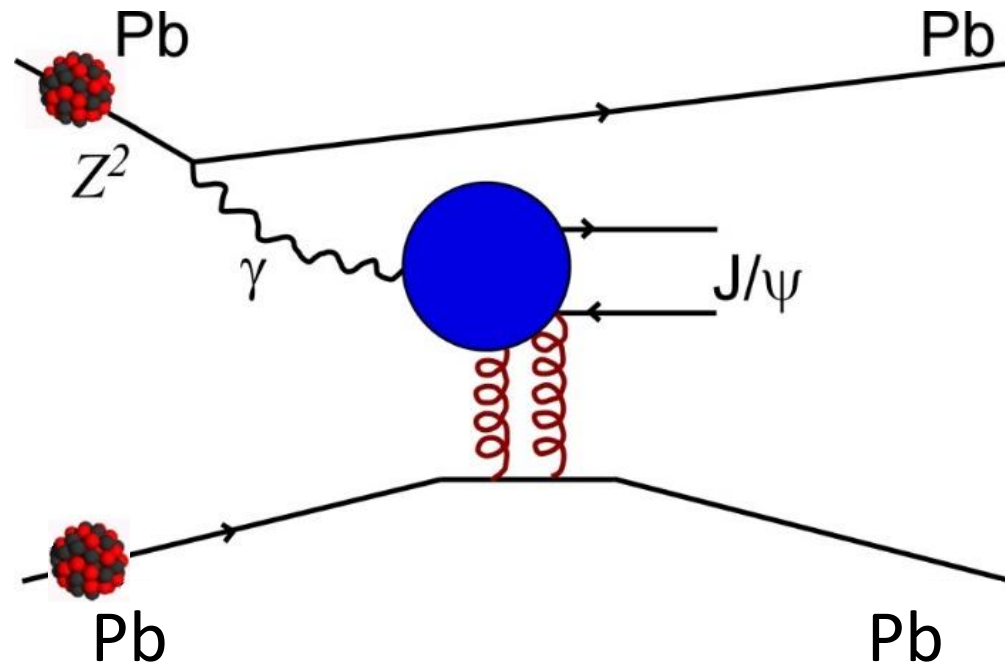
ALICE: arXiv: 2304.12403, accepted by PRD



- Сечение дифракционного рождения J/ψ (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
 - в ожидании p-Pb столкновений в Run 3-4

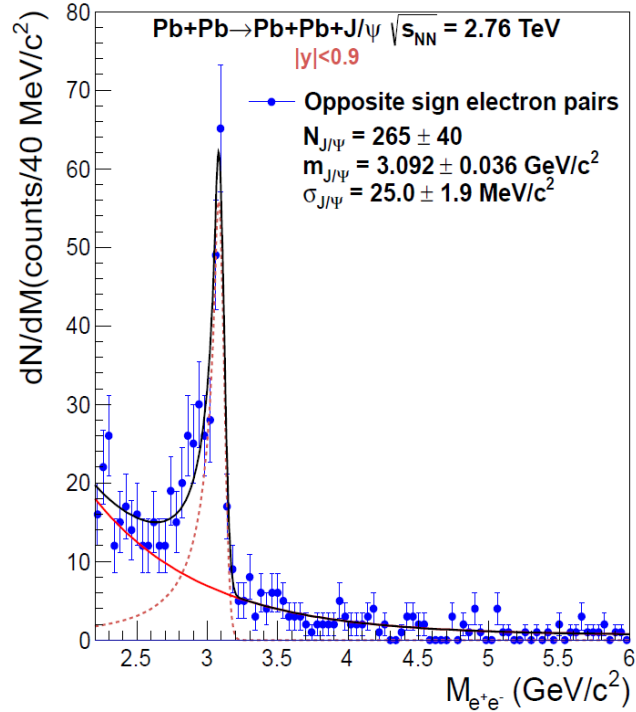
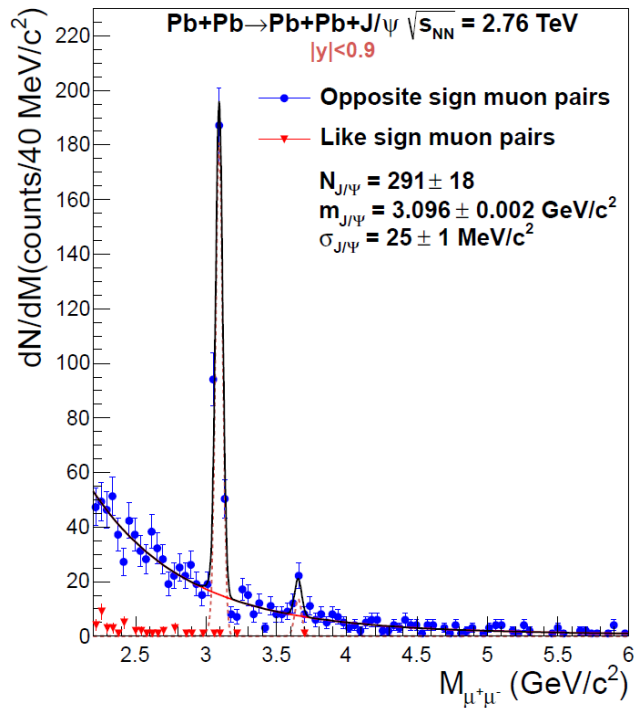
Глава 4

Фоторождение J/ψ и $\psi(2S)$ в Pb-Pb УПС

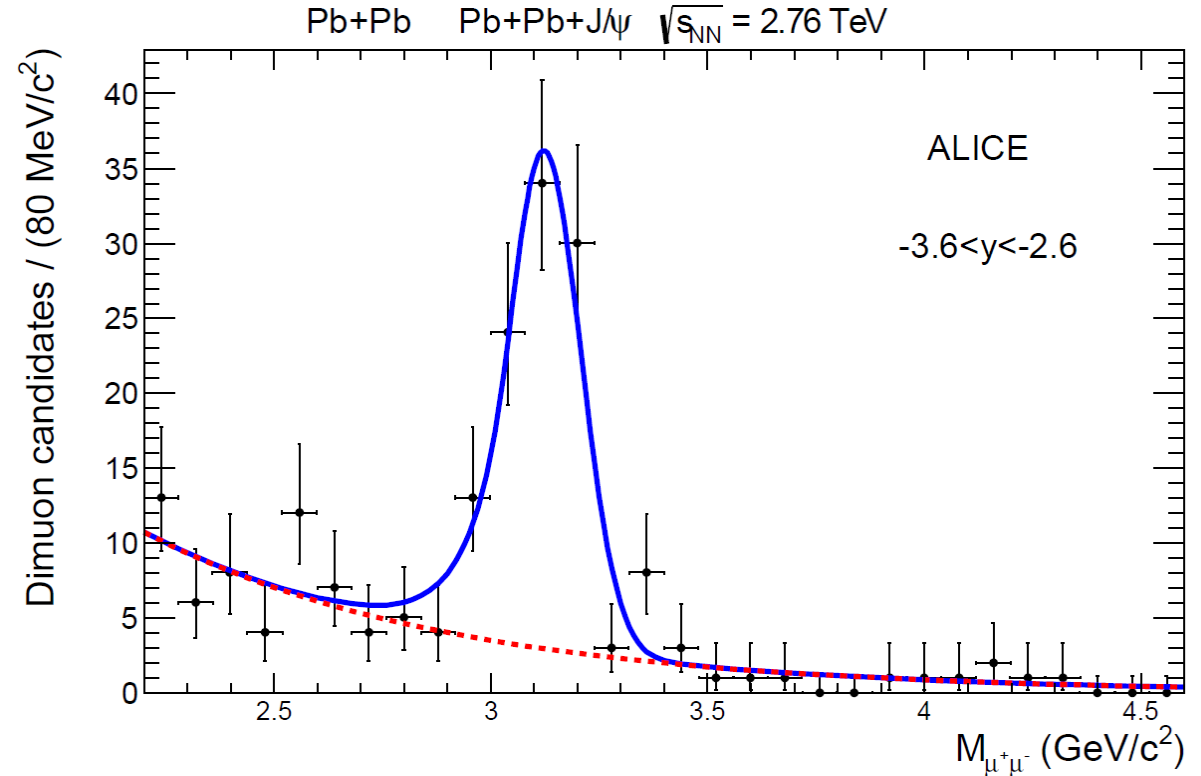


Результаты Run 1

в центральном барреле



в мюонном плече



ALICE, PLB 718 (2013) 1273

ALICE, EPJC73 (2013) 2617

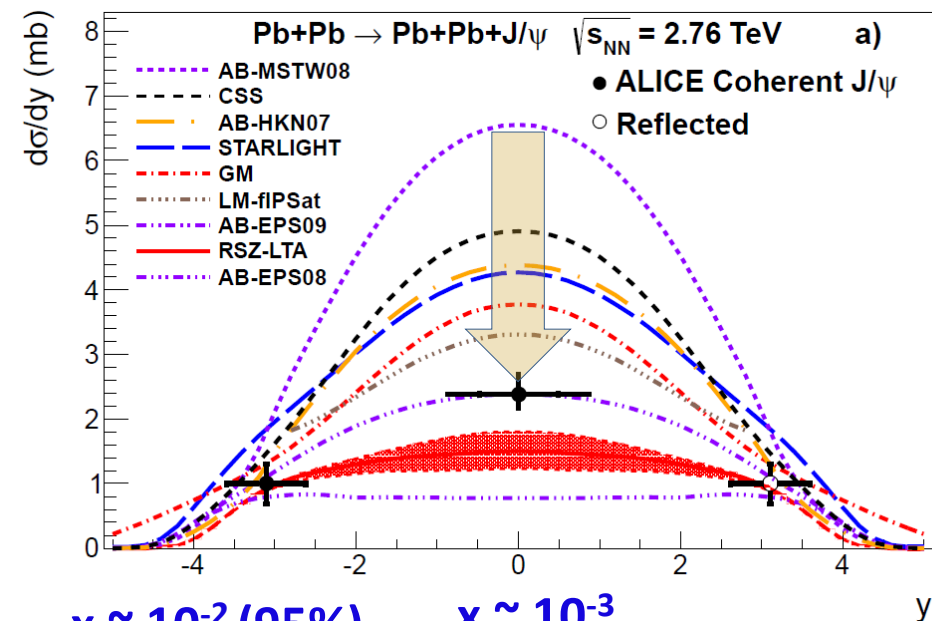
- Измерения 2011 года при энергии 2.76 ТэВ

Результаты Run 1: когерентное рождение J/ψ

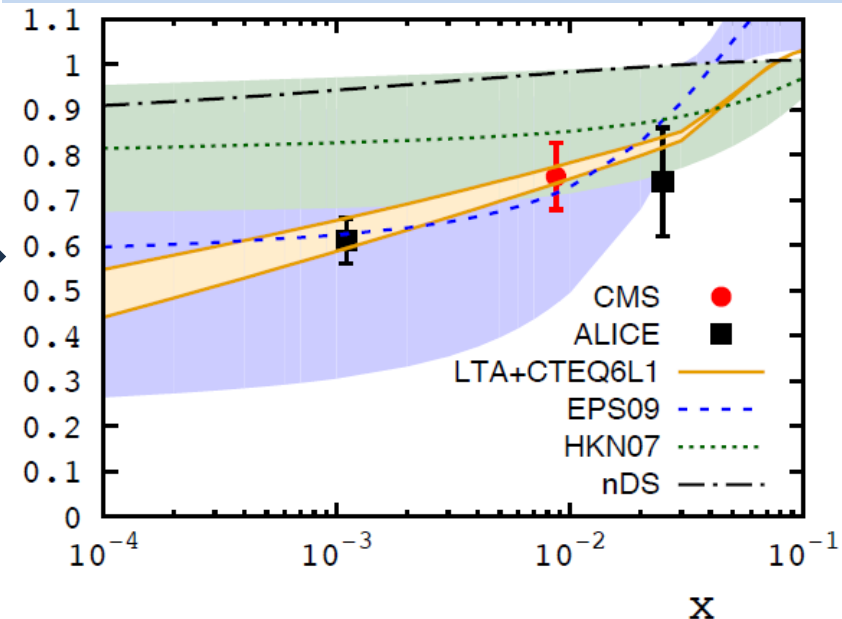
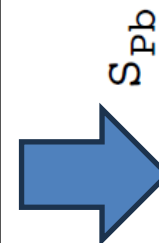
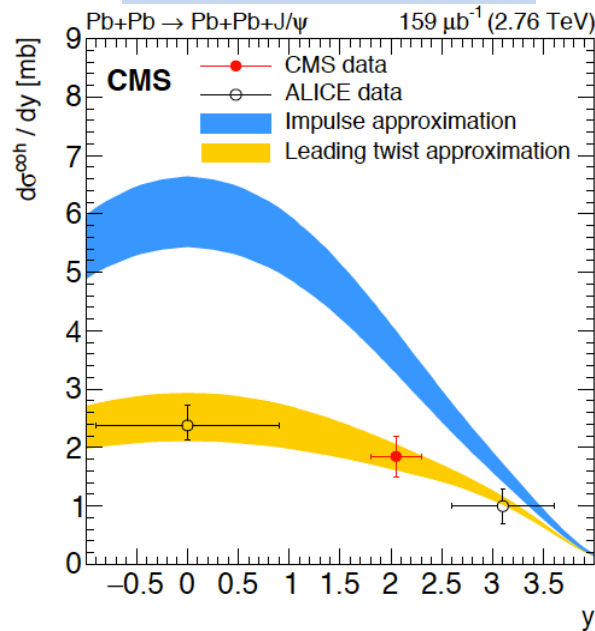
ALICE, PLB718 (2013) 1273, EPJC73 (2013) 2617

CMS, PLB772 (2017) 489

Guzey, Kryshen, Strikman, Zhilov, PLB726 (2013) 290
Guzey, Zhilov JHEP 1310 (2013) 207



$x \sim 10^{-2}$ (95%)
 $x \sim 10^{-3}$
 $x \sim 10^{-5}$ (5%)



Фактор ядерного подавления:

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

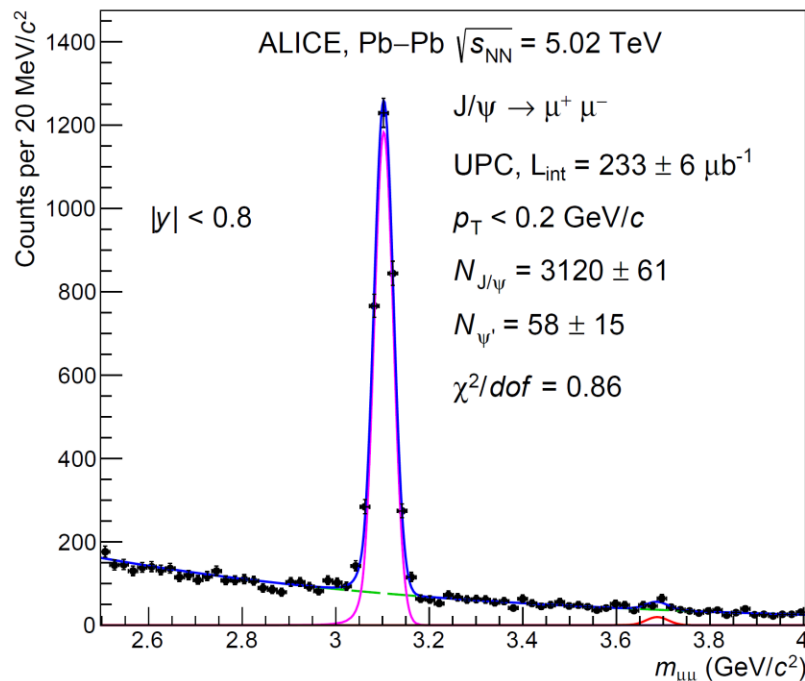
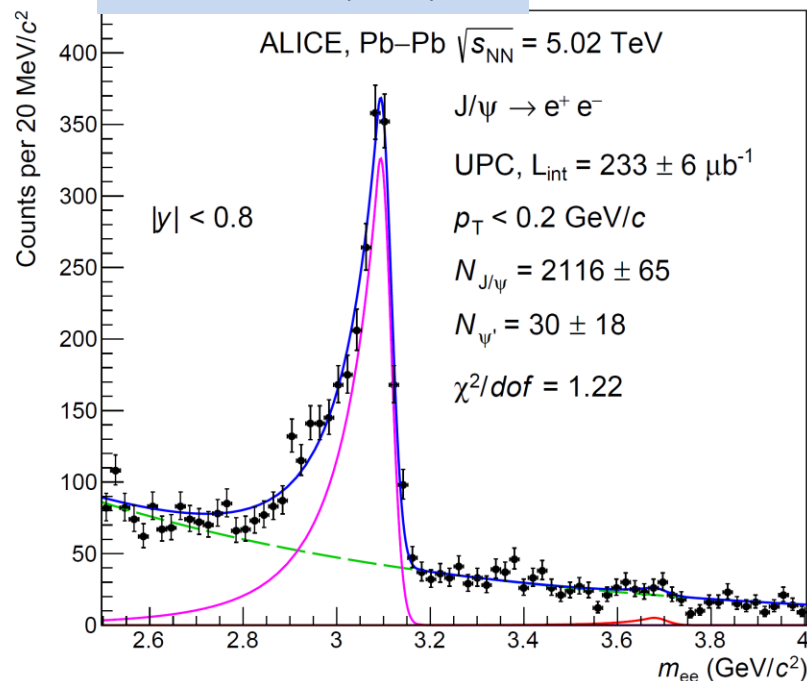
Сечение, измеренное в УПС, деленное на поток

Импульсное приближение: форвардное сечение на протоне × интеграл от квадрат форм-фактора

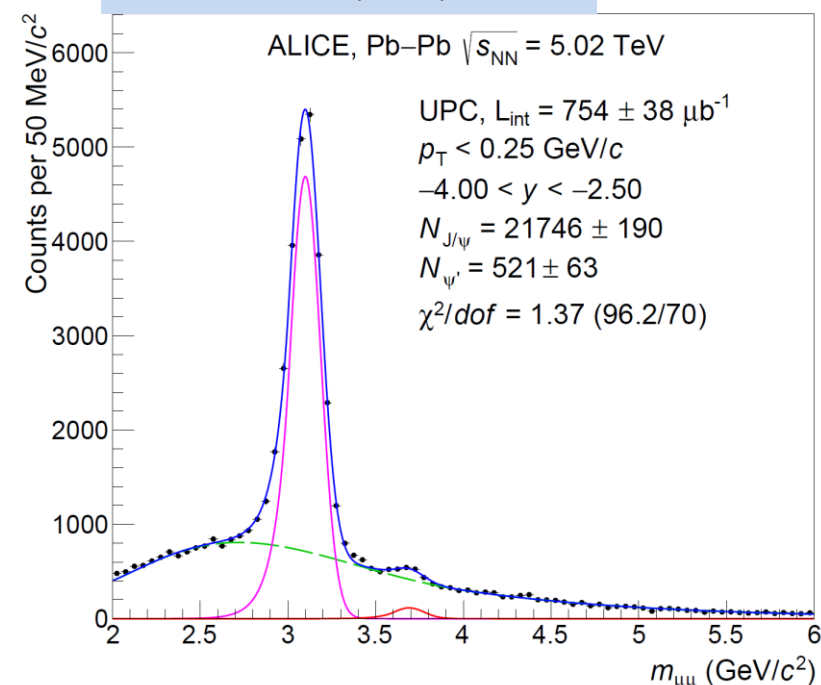
Первое прямое наблюдение значительных глюонных экранировок: $R_g(x \sim 10^{-3}, \mu \sim 2.4 \text{ GeV}) \sim 0.6$

Run 2: распределения по инвариантной массе

ALICE, EPJC 81 (2021) 712



ALICE, PLB 798 (2019) 134926



- В 200 раз больше статистики по сравнению с Run 1 ($-4 < y < -2.5$)
- J/ψ и $\psi(2S)$: Crystal Ball
- фон: экспонента (+ turn-on триггера), согласуется с ожидаемым фоном от $\gamma\gamma \rightarrow ll$
- Отношение сечений J/ψ и $\psi(2S)$ согласуется с отношением в измерениях на протоне на HERA

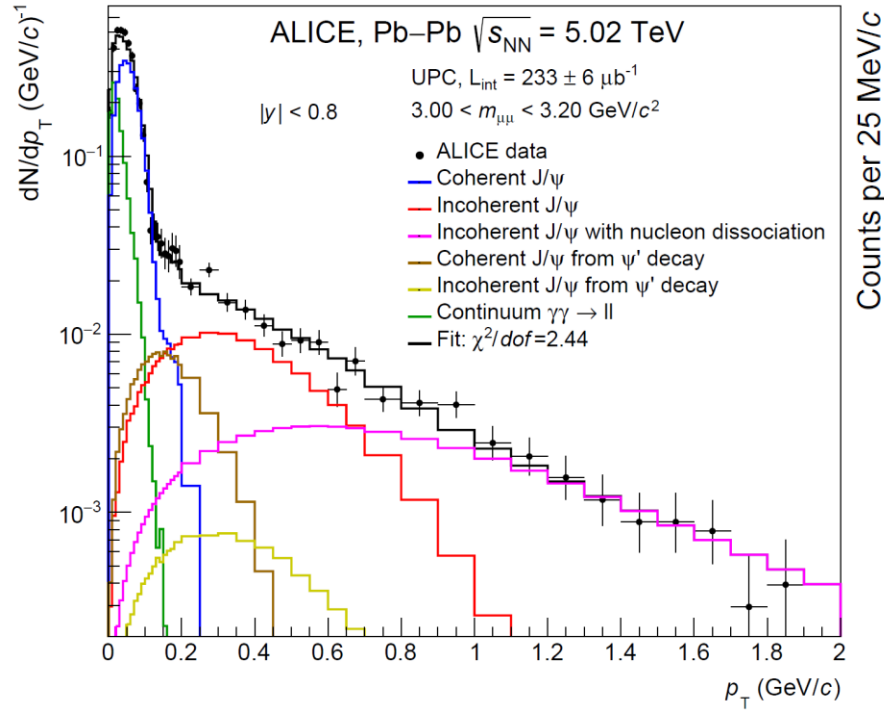
$$R_N = \frac{N(\psi')}{N(J/\psi)} = 0.0250 \pm 0.0030(\text{stat.}) \pm 0.0035(\text{syst.}),$$

$$R = \frac{\sigma(\psi')}{\sigma(J/\psi)} = 0.150 \pm 0.018(\text{stat.}) \pm 0.021(\text{syst.}) \pm 0.007(\text{BR})$$

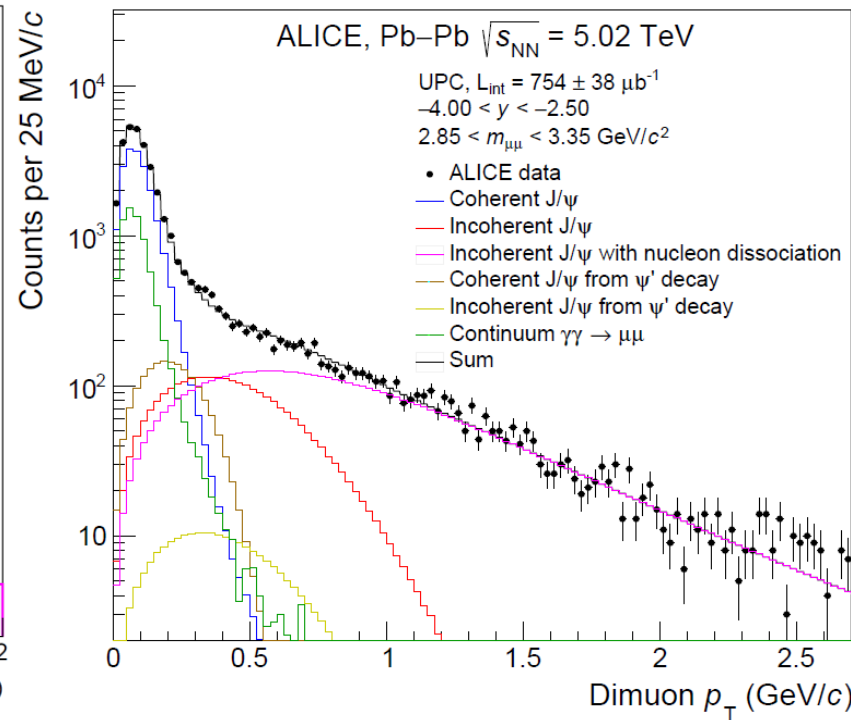
$$\text{H1: } R = 0.166 \pm 0.007(\text{stat.}) \pm 0.008(\text{syst.}) \pm 0.007(\text{BR})$$

Run 2: распределения по поперечному импульсу

ALICE, EPJC 81 (2021) 712



ALICE, PLB 798 (2019) 134926



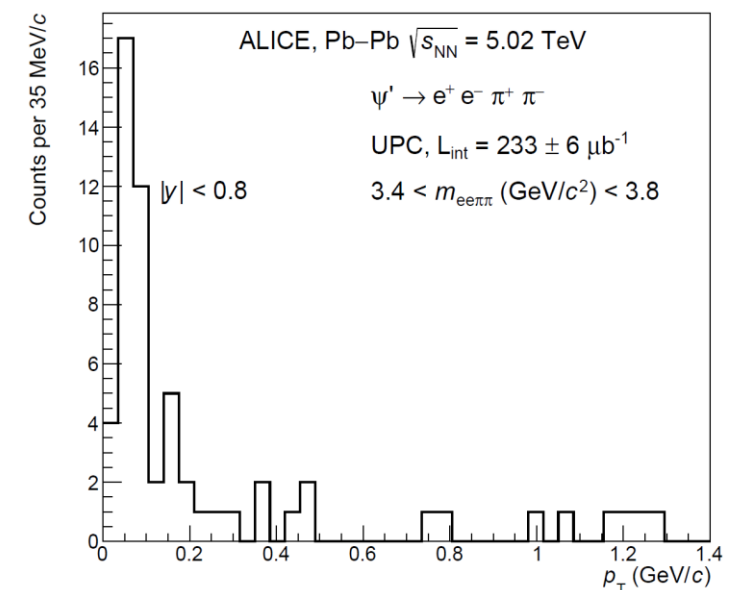
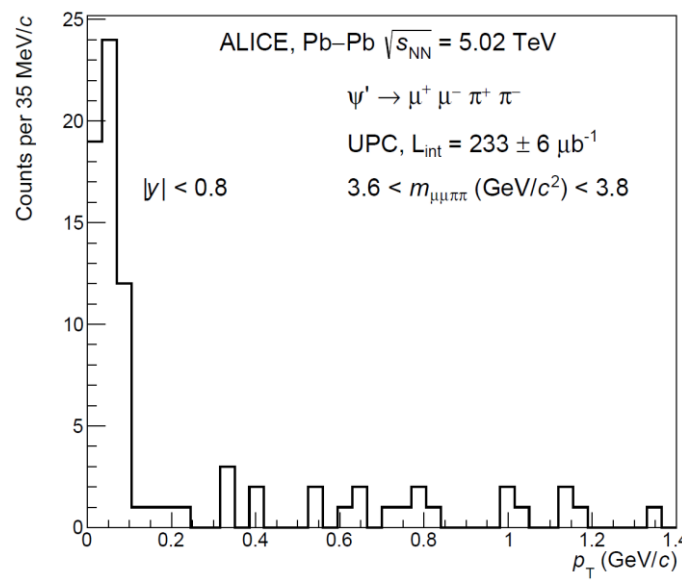
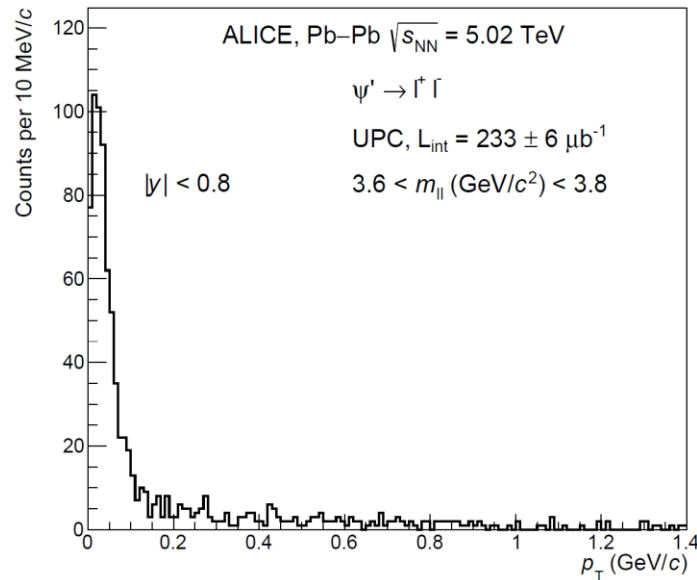
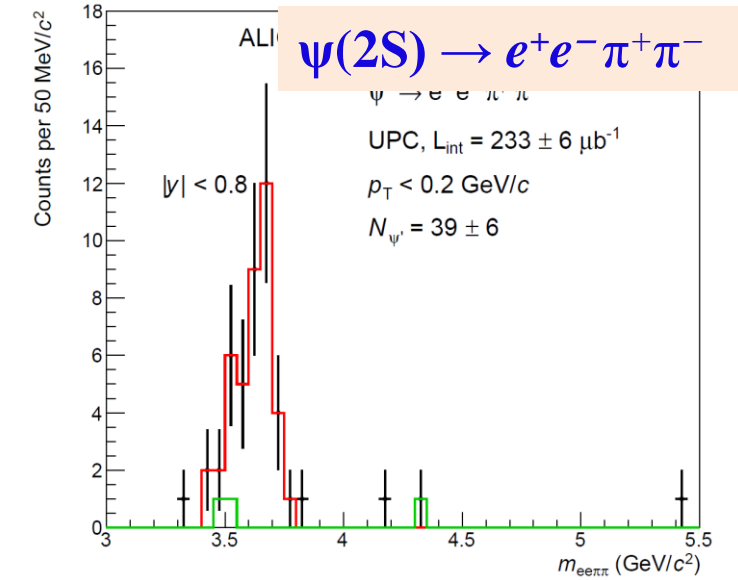
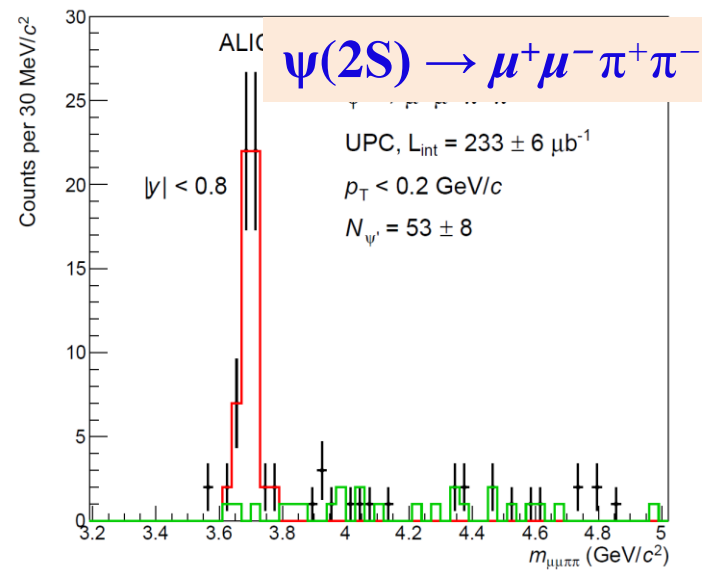
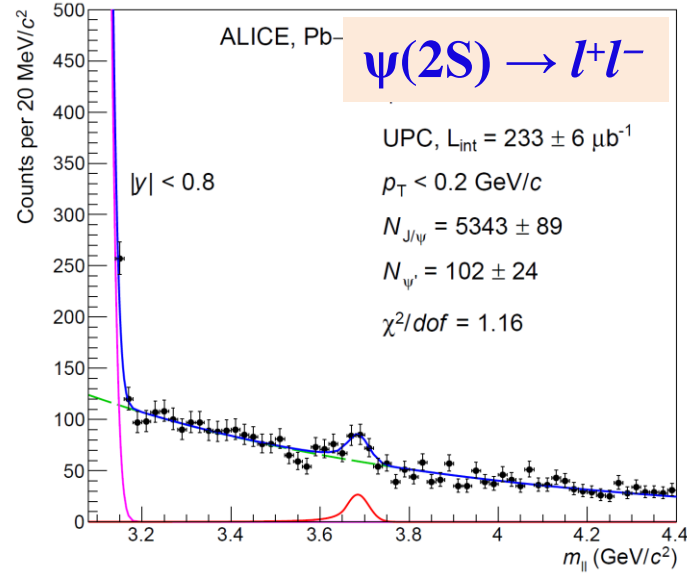
Темплейты:

- **Когерентные J/ψ:**
 $-\langle p_T \rangle \sim 1/R_{Pb} \sim 60$ MeV/c
- **Некогерентные J/ψ:**
 $-\langle p_T \rangle \sim 1/R_p \sim 500$ MeV/c
- $\gamma\gamma \rightarrow \mu\mu$: вклад фиксирован из распределения по инвариантной массе
- J/ψ из распада **когерентных и некогерентных ψ(2S)**: вклад (~5%) фиксирован относительно первичных J/ψ
- **Некогерентные J/ψ с диссоциацией нуклона.** Параметризация из HERA:

$$\frac{dN}{dp_T} \sim p_T \left(1 + \frac{b_{pd}}{n_{pd}} p_T^2 \right)^{-n_{pd}}$$

- Анализ распределений по поперечному импульсу: нужен для определения доли некогерентных J/ψ
- Более широкий когерентный пик в форвардной области – эффект разрешения
- Доля некогерентных J/ψ при малых p_T (< 0.2 ГэВ/c) ~5%

Run 2: измерения $\psi(2S)$ в центральной области быстрот



Измерения как в канале: $\psi(2S) \rightarrow l^+l^-$, так и $\psi(2S) \rightarrow J/\psi\pi\pi \rightarrow l^+l^-\pi^+\pi^-$

Расчет сечений в различных каналах

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

↑ эффективность реконструкции ↑ эффективность veto ↑ branching ↑ светимость ↑ диапазон по быстроте

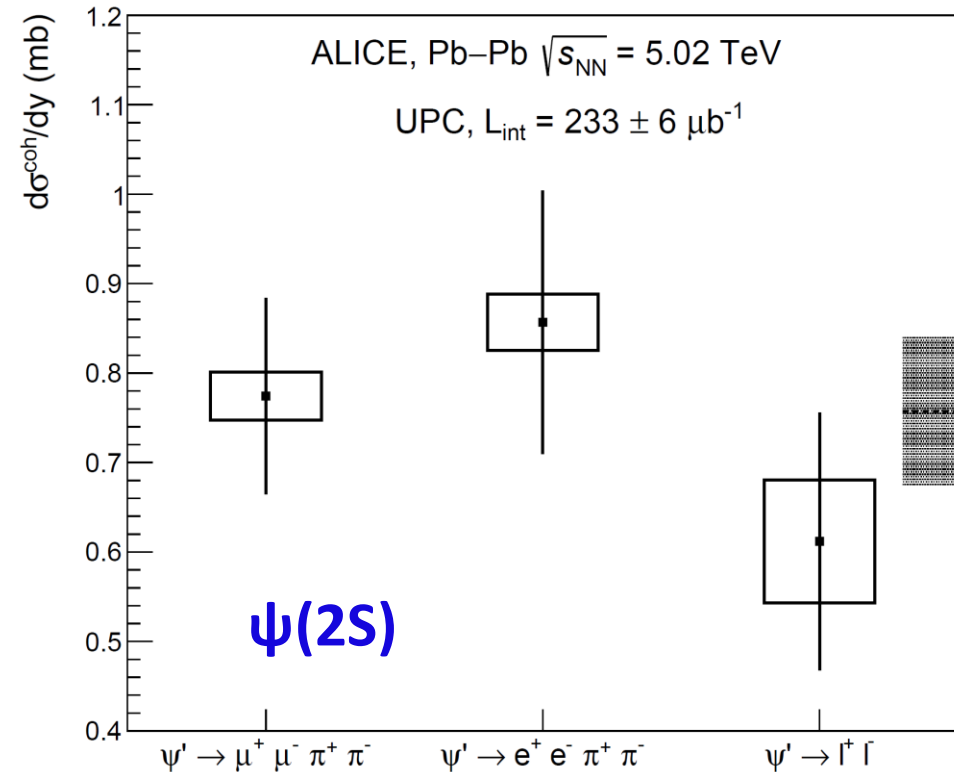
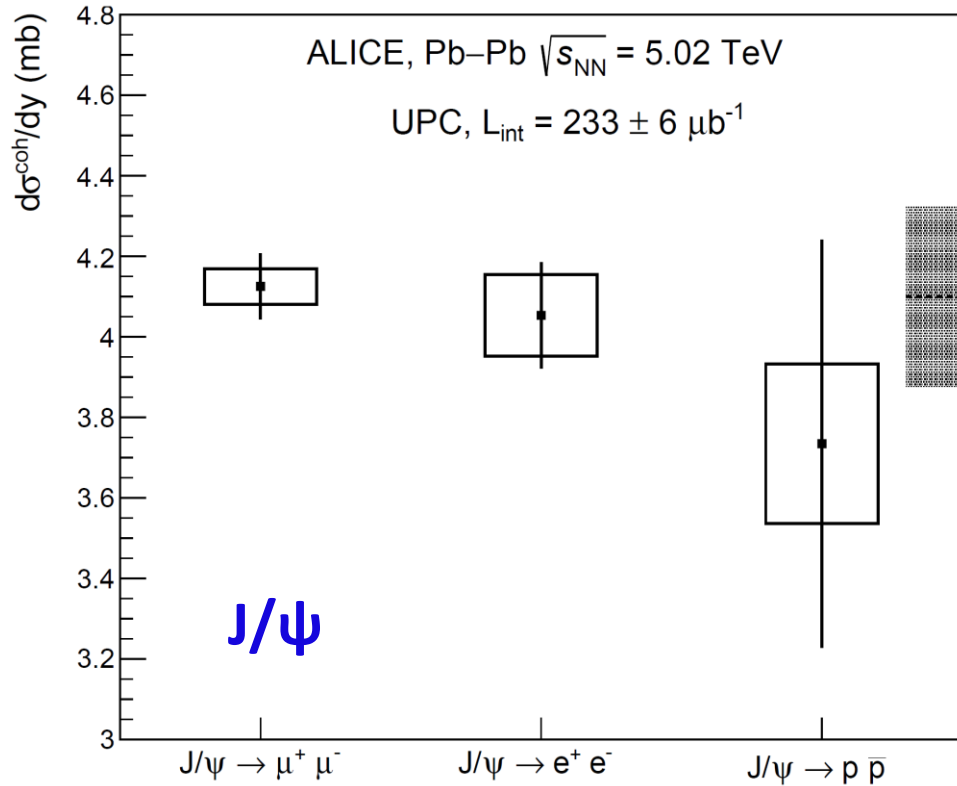
выходы (из спектров по инв. массе)

$$N_{\psi(2S)}^{coh} = \frac{N_{\psi(2S)}}{1 + f_I}$$

↑ доля некогерентных VM

$$N_{J/\psi}^{coh} = \frac{N_{J/\psi}}{1 + f_I + f_D}$$

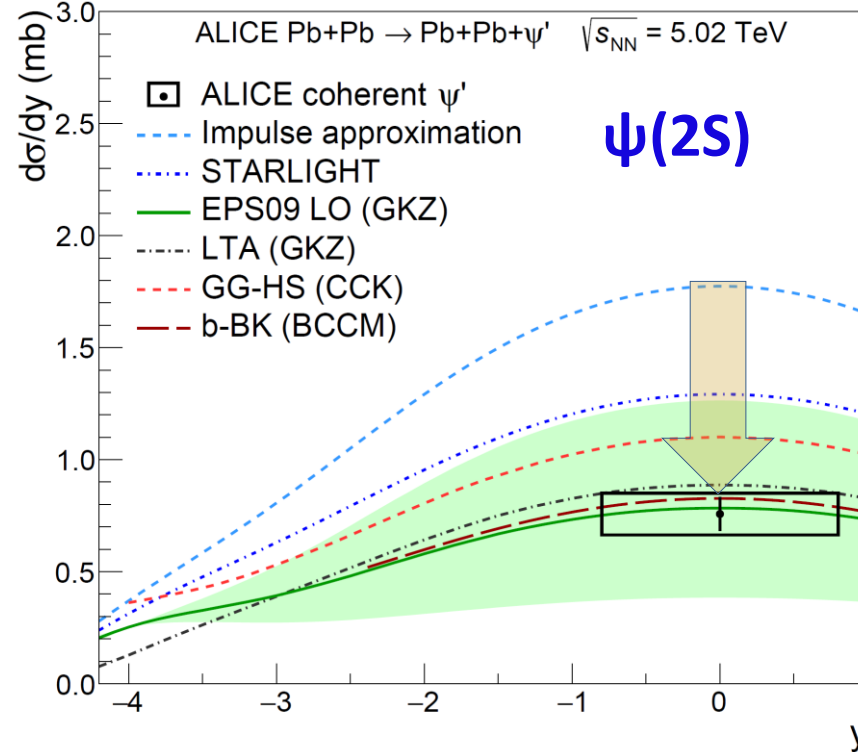
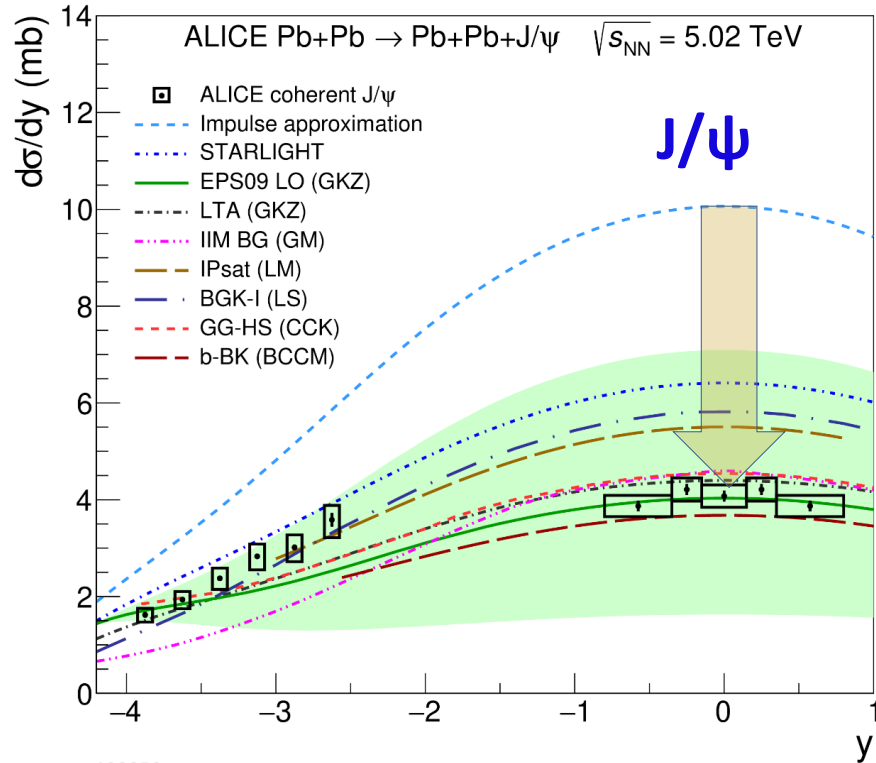
↑ доля вторичных (feed-down) J/ψ



Хорошее согласие сечений, измеренных в различных каналах

Сравнение с теоретическими предсказаниями

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



Значительное подавление в области центральных быстрот:

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

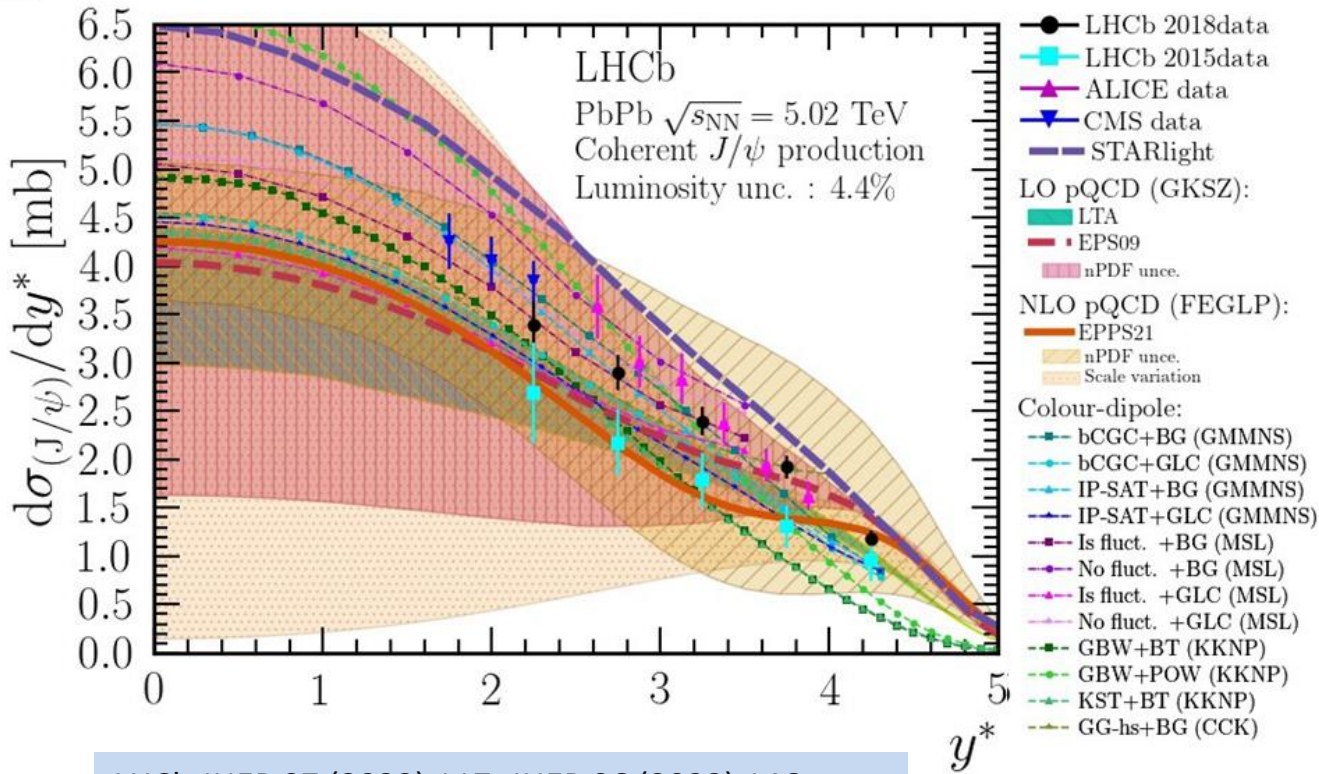
в согласии с LTA и EPS09

В области $y \sim -3$ подавление меньше, чем ожидалось

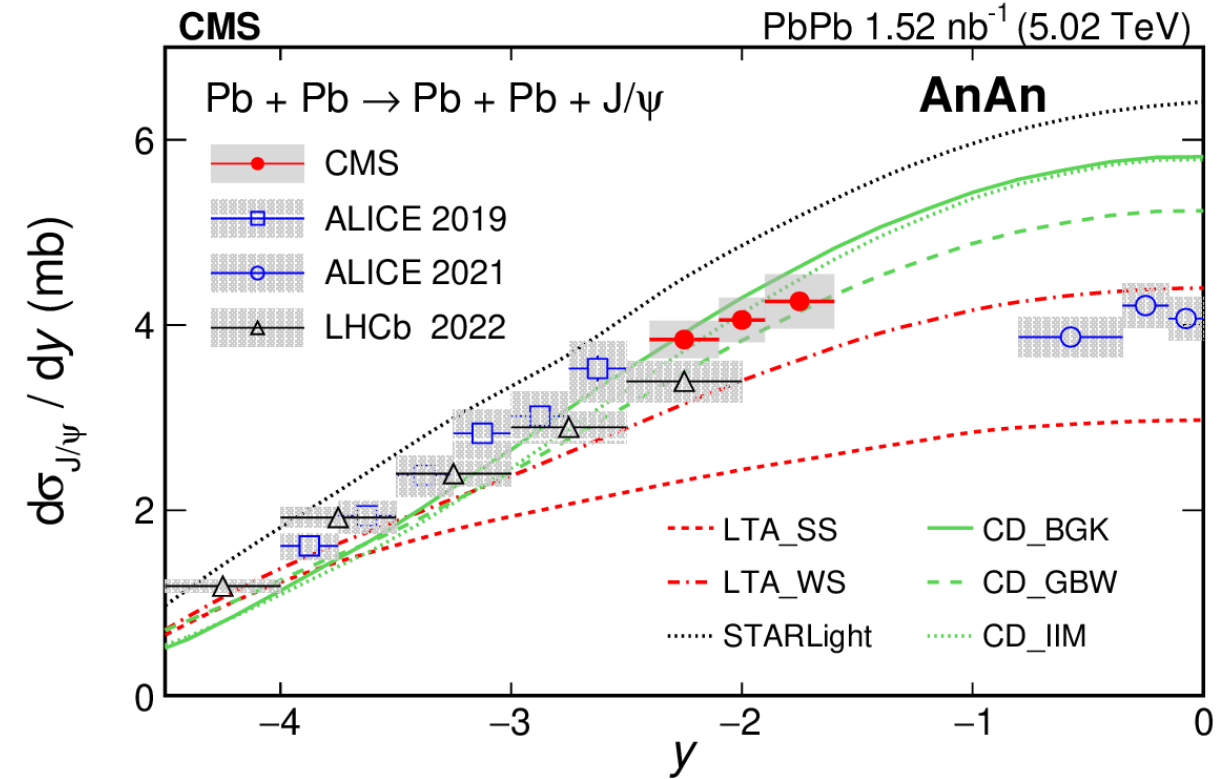
ALI-PUB-499958

- **Impulse approximation: no nuclear effects**
- **STARLIGHT: VDM + Glauber**, Klein, Nystrand et al: Comput. Phys. Commun. 212 (2017) 258
- **EPS09 LO (GKZ): EPS09 shadowing**: Guzey, Kryshen, Zhalov, PRC93 (2016) 055206
- **LTA (GKZ): Leading Twist Approximation**: Guzey, Kryshen, Zhalov, PRC93 (2016) 055206
- **GM: Color dipole model + IIM CGC**: Goncalves, Machado et al.: PRC 90 (2014) 015203, JPG 42 (2015) 105001
- **LM IPSat: Color dipole model + IPSat CGC**: T. Lappi, H. Mäntysaari, PRC 83 (2011) 065202; 87 (2013) 032201
- **CCK: hot-spot model + Glauber-Gribov**: Cepila, Contreras, Krelina, PRC97 (2018) 024901
- **LS: Color dipole model + BGK-I CGC**: Luszczak, Schafer: PRC 99, 044905 (2019)

Сравнение с другими экспериментами



LHCb JHEP 07 (2022) 117, JHEP 06 (2023) 146



CMS, arXiv:2303.16984

- Согласие с LHCb в области больших быстрот
- “Tension” с LHCb в области $|y| \sim 3$ меньше в сравнении с результатами анализа данных 2018 года
- Согласие с последними результатами CMS

Извлечение фактора глюонных экранировок из данных Run 2

В области центральных быстрот неопределенности нет:

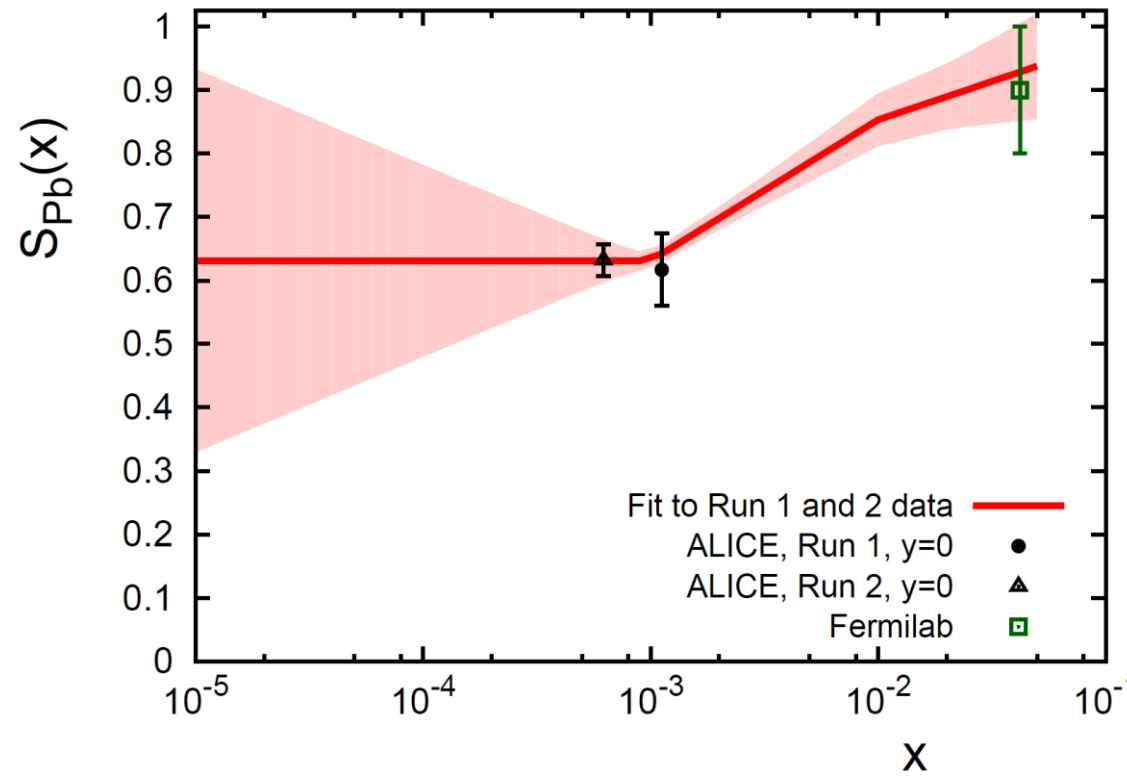
$$S_{Pb}(x = 0.00112) = 0.62 \pm 0.057,$$

$$S_{Pb}(x = 6.17 \times 10^{-4}) = 0.63 \pm 0.025$$

Вклады при малых и больших x можно разделить на основании предполагаемого поведения $S_{Pb}(x)$, например:

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

Где параметры (и погрешности) можно определить из аппроксимации данных по зависимости сечения от быстроты



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

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

Извлечение фактора глюонных экранировок из данных Run 2

В области центральных быстрот неопределенности нет:

$$S_{Pb}(x = 0.00112) = 0.62 \pm 0.057,$$

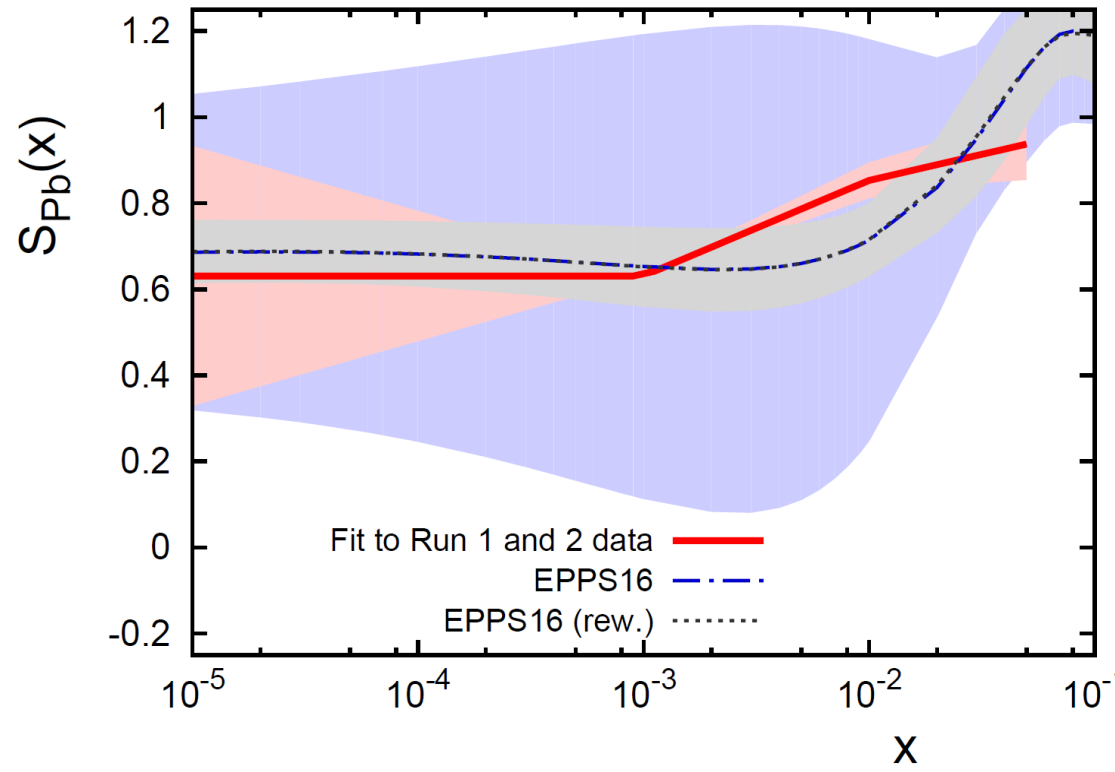
$$S_{Pb}(x = 6.17 \times 10^{-4}) = 0.63 \pm 0.025$$

Вклады при малых и больших x можно разделить на основании предполагаемого поведения $S_{Pb}(x)$, например:

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

Где параметры (и погрешности) можно определить из аппроксимации данных по зависимости сечения от быстроты

Также можно оценить влияние фактора ядерного подавления, извлеченного из данных, на текущие неопределенности глюонной плотности, используя метод статистического взвешивания

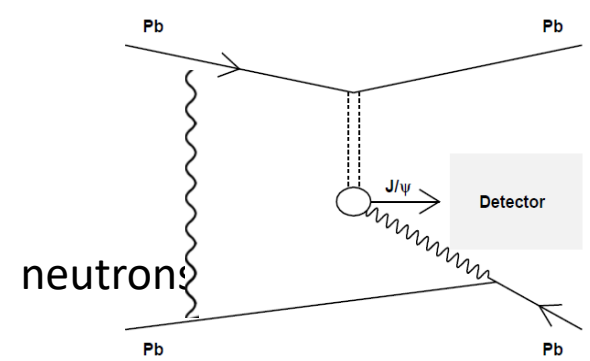
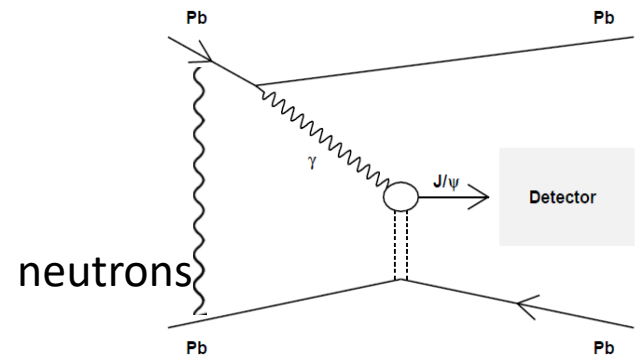
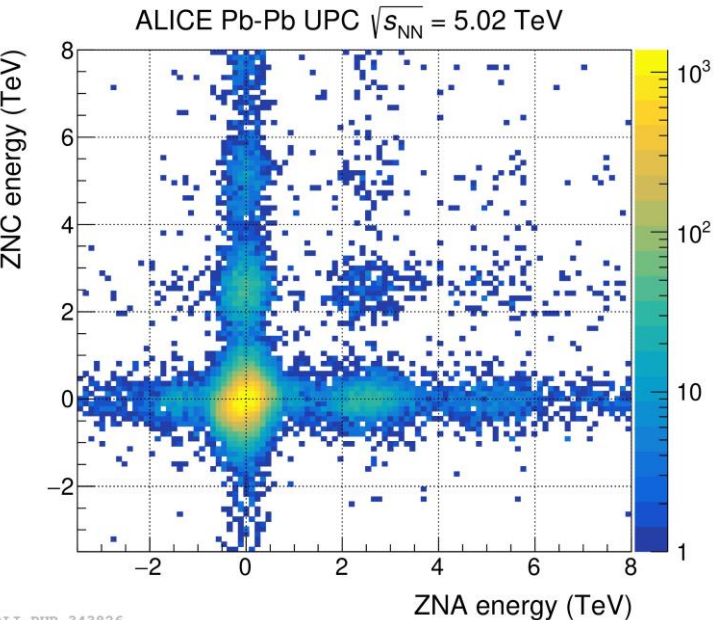


$$\frac{d\sigma_{PbPb}(y)}{dy} = n_\gamma(y)\sigma_{\gamma Pb}(y) + n_\gamma(-y)\sigma_{\gamma Pb}(-y)$$

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

Когерентное сечение J/ψ + испускание нейтронов

ALICE, JHEP 06 (2020) 035



измерения

потоки (можно рассчитать с хорошей точностью)

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

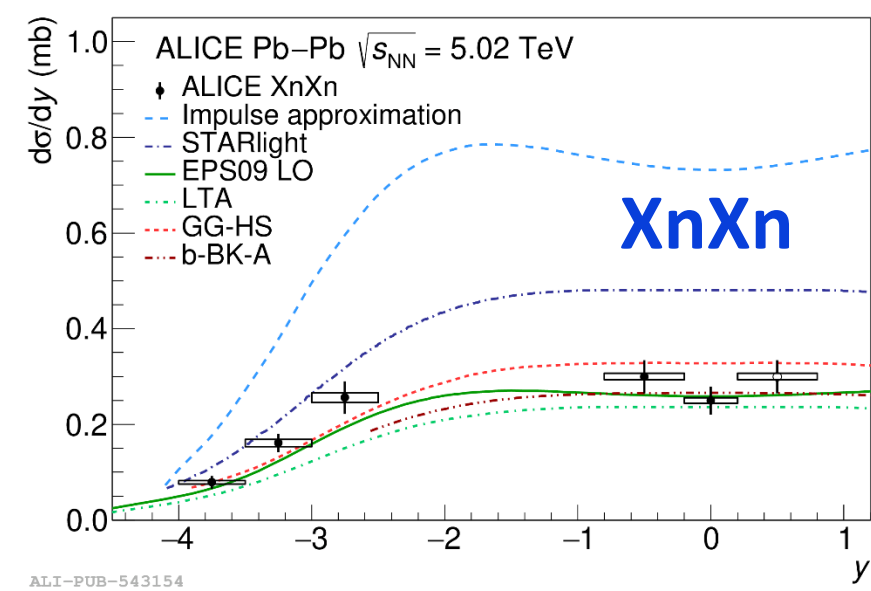
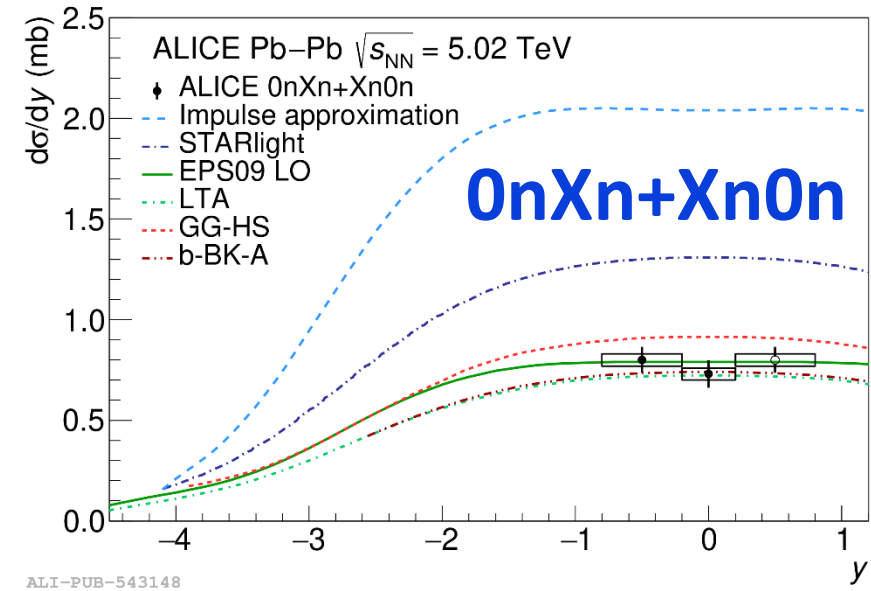
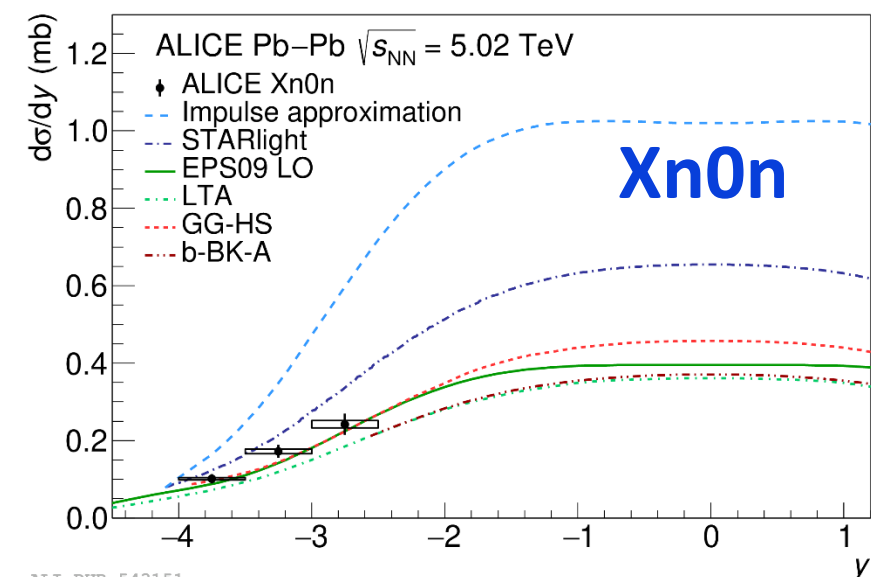
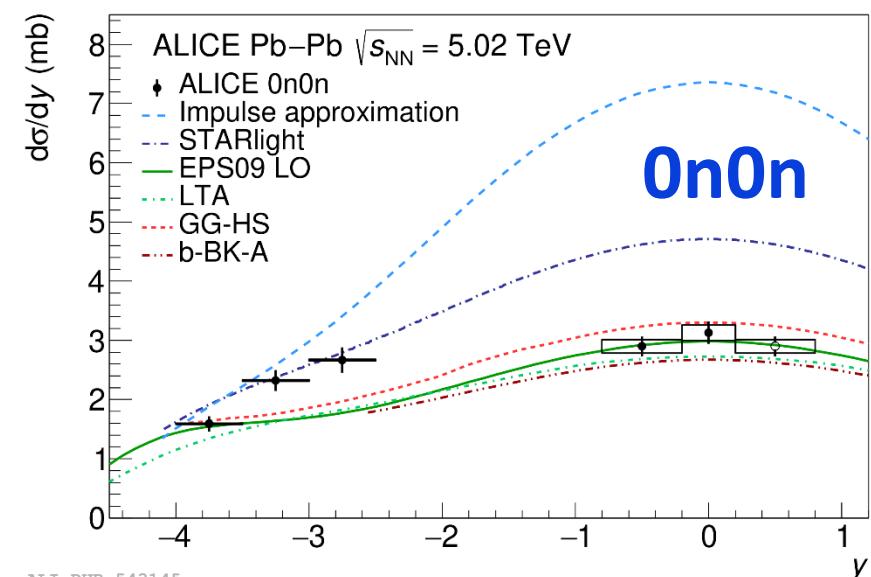
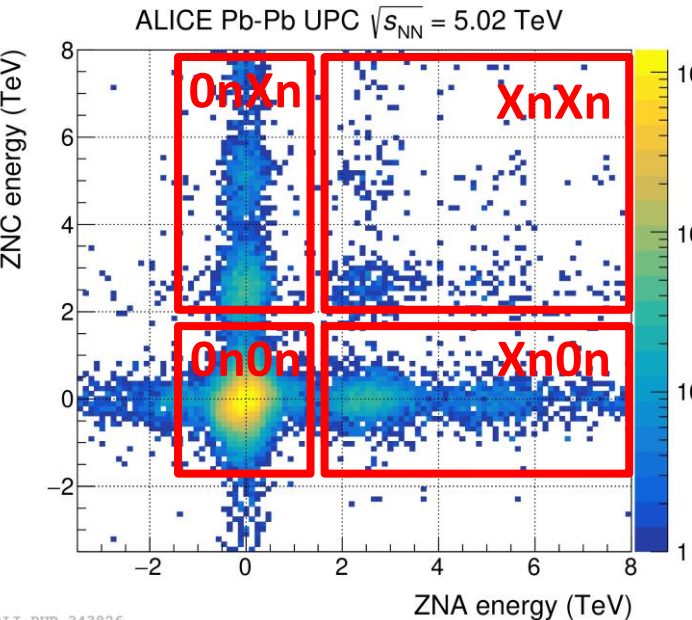
$$\frac{d\sigma_{PbPb}^{0nXn}(y)}{dy} = n_{\gamma}^{0nXn}(y)\sigma_{\gamma Pb}(y) + n_{\gamma}^{0nXn}(-y)\sigma_{\gamma Pb}(-y)$$

Неизвестные фотоядерные сечения

Guzey, Strikman, Zhilov, EPJC74 (2014) 2942

Когерентное сечение J/ψ + испускание нейтронов

ALICE, JHEP 06 (2020) 035



Доли событий в различных классах хорошо согласуются с расчетами

Извлечение фотоядерных сечений

- Фотоядерные сечения $\sigma_{\gamma\text{Pb}}(y)$ и $\sigma_{\gamma\text{Pb}}(-y)$ были извлечены путем χ^2 -минимизации разницы левой и правой частей
- Учет коррелированных ошибок с использованием скрытых (nuisance) параметров
- При этом учитывались неопределенности рассчитанных потоков фотонов:
 - Неопределенность $\sim 2\%$, связанная с вариацией радиуса ядра
 - Неопределенность, связанная с долей $0n0n$, $0nXn$ и $XnXn$ классов в полном потоке (от 1 до 8% в зависимости от интервала по быстроте)

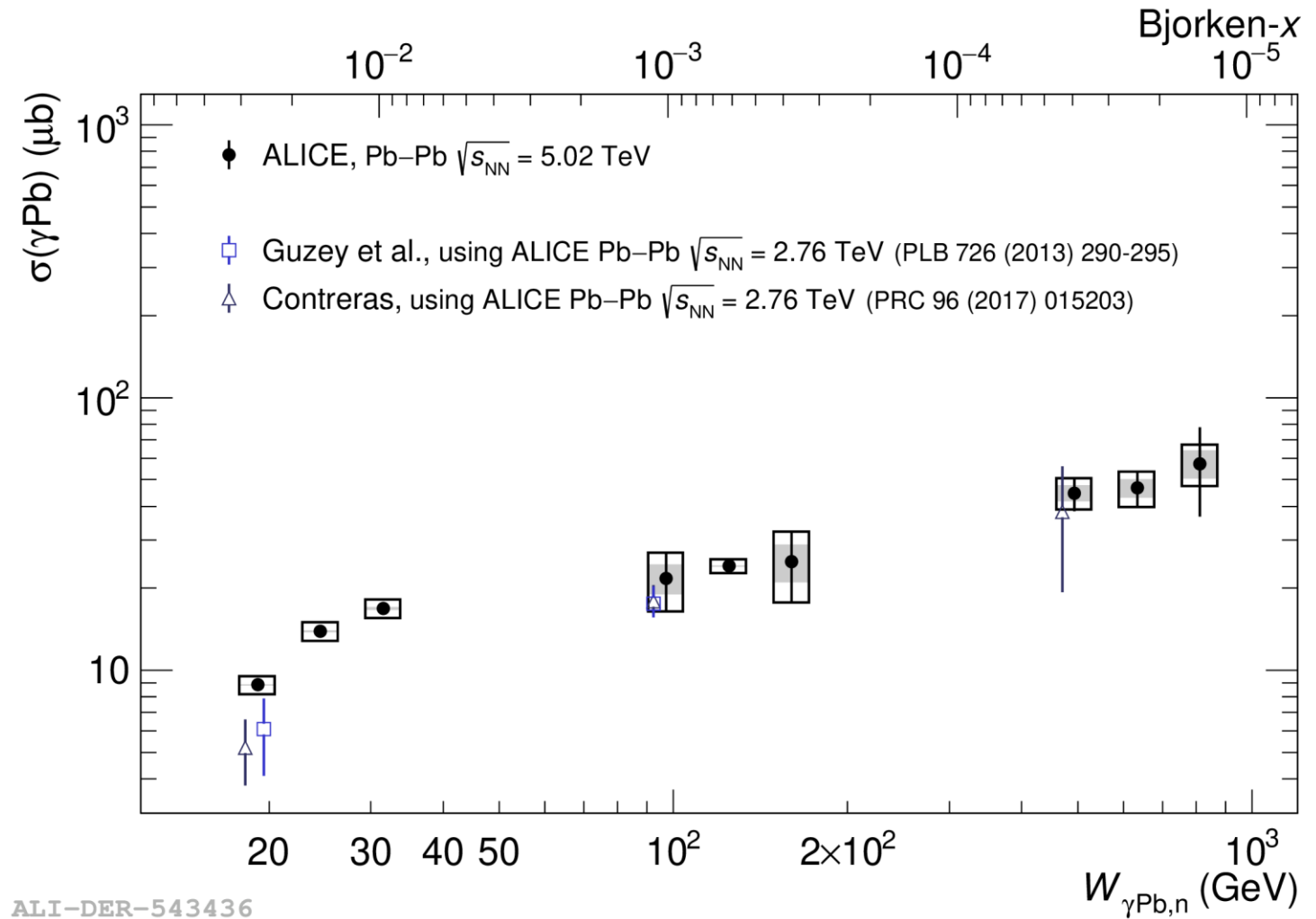
$$\frac{d\sigma_{\text{PbPb}}^{0n0n}(y)}{dy} = n_{\gamma}^{0n0n}(y)\sigma_{\gamma\text{Pb}}(y) + n_{\gamma}^{0n0n}(-y)\sigma_{\gamma\text{Pb}}(-y)$$

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

y	n_{γ}^{0n0n}	n_{γ}^{0nXn}	n_{γ}^{XnXn}
$3.5 < y < 4$	178.51	18.18	6.34
$3 < y < 3.5$	162.99	18.19	6.34
$2.5 < y < 3$	147.46	18.19	6.34
$0.2 < y < 0.8$	77.88	17.88	6.33
$-0.2 < y < 0.2$	62.86	17.47	6.27
$-0.8 < y < -0.2$	48.31	16.75	6.18
$-3 < y < -2.5$	3.91	4.97	2.78
$-3.5 < y < -3$	1.22	2.15	1.42
$-4 < y < -3.5$	0.26	0.61	0.48

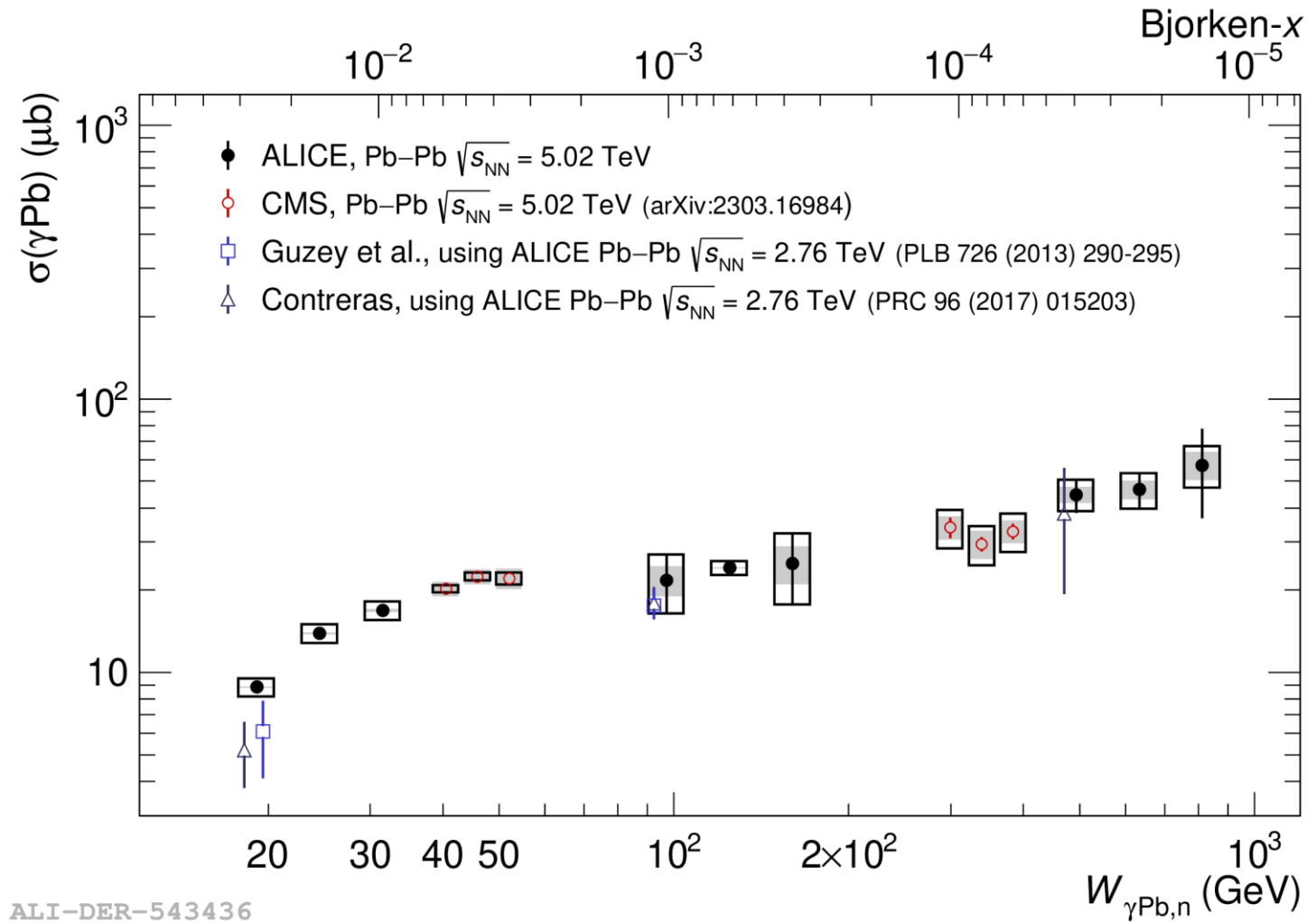
Зависимость фотоядерных сечений от энергии

- Впервые фотоядерное сечение измерено до энергий ~ 1 ТэВ!
- Согласие с сечениями, извлеченными из результатов Run 1.



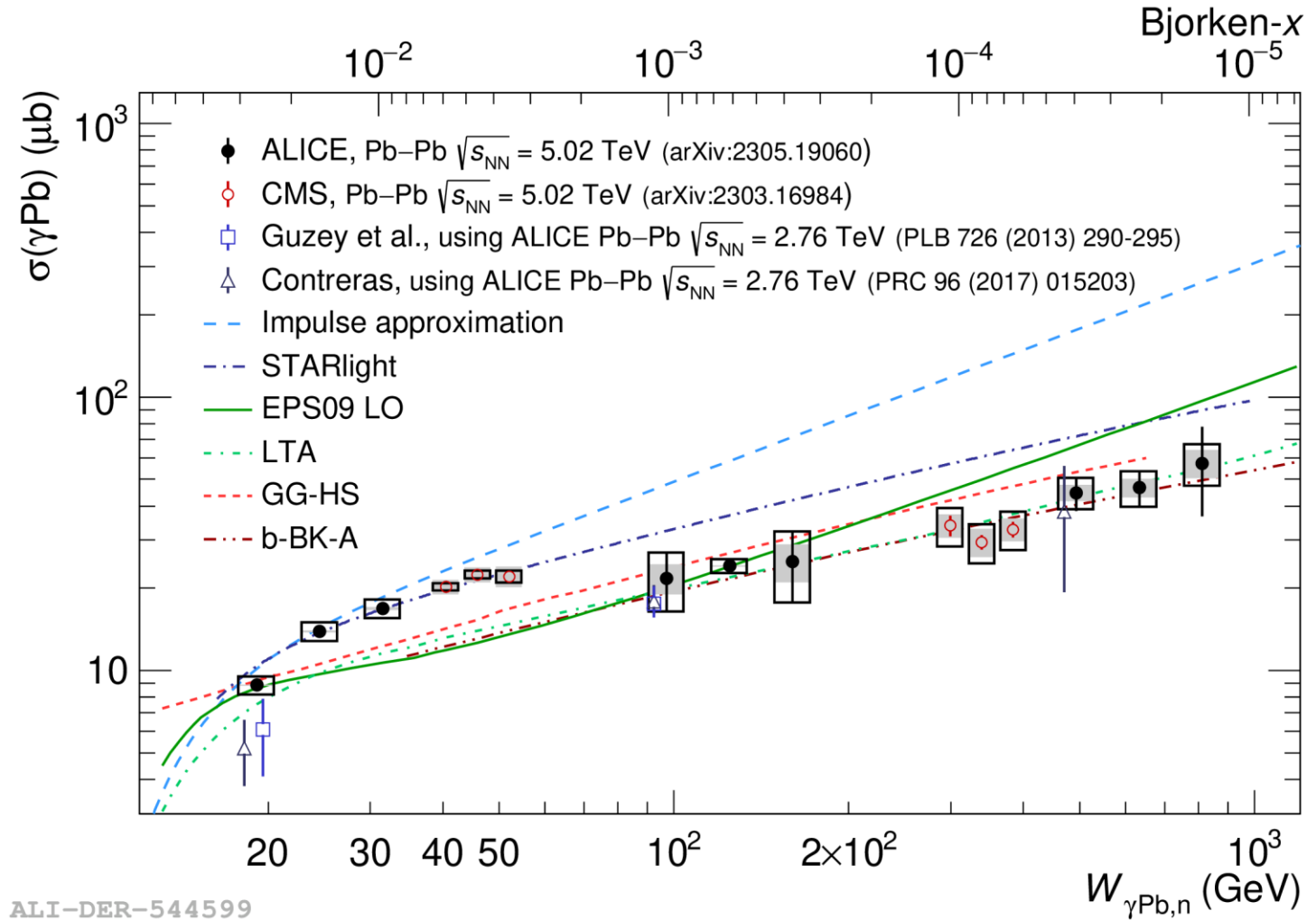
Зависимость фотоядерных сечений от энергии

- Впервые фотоядерное сечение измерено до энергий ~ 1 ТэВ!
- Согласие с сечениями, извлеченными из результатов Run 1.
- Согласие с результатами CMS



Зависимость фотоядерных сечений от энергии

- Впервые фотоядерное сечение измерено до энергий ~ 1 ТэВ!
- Согласие с сечениями, извлеченными из результатов Run 1.
- Согласие с результатами 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)

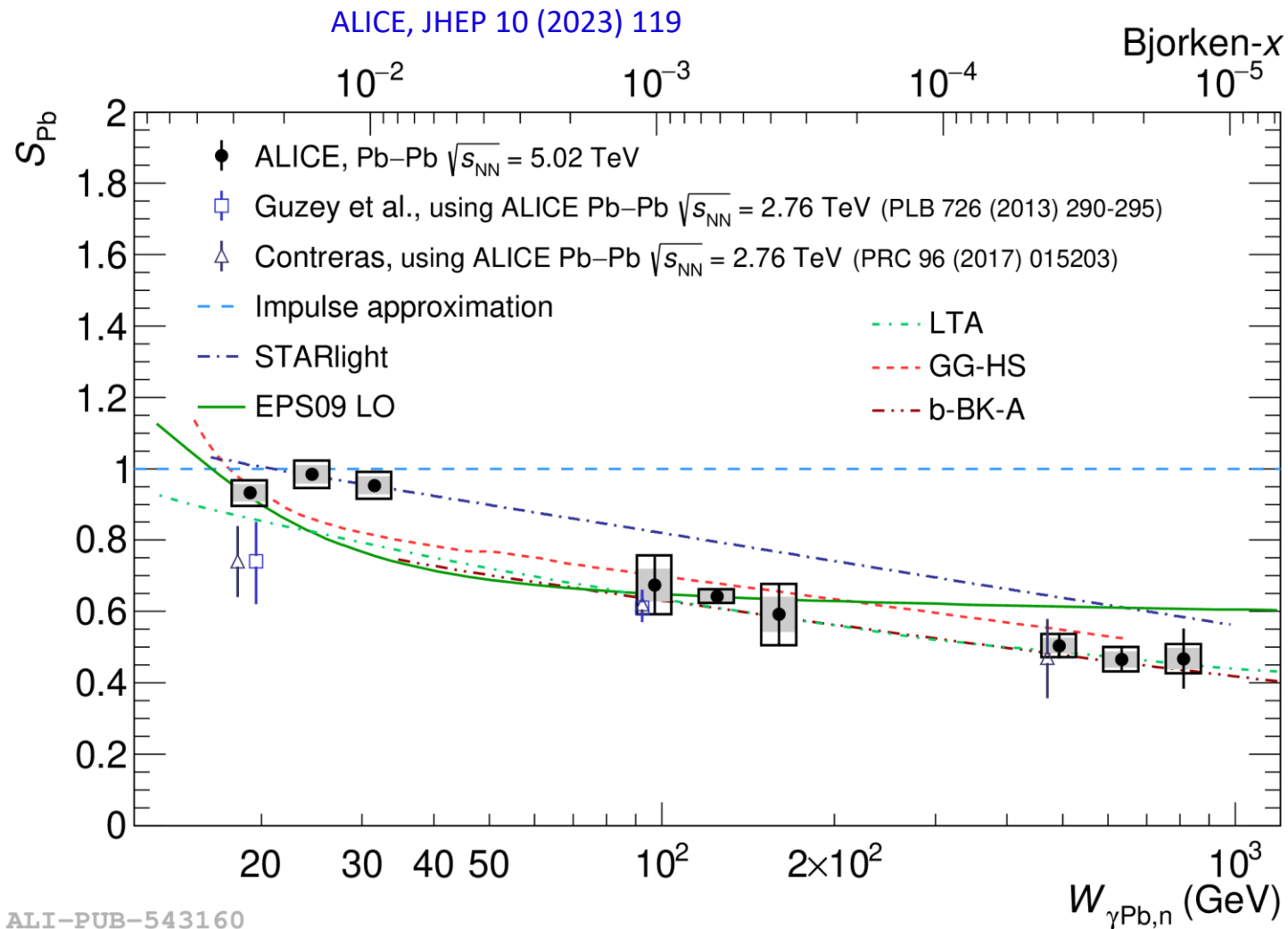
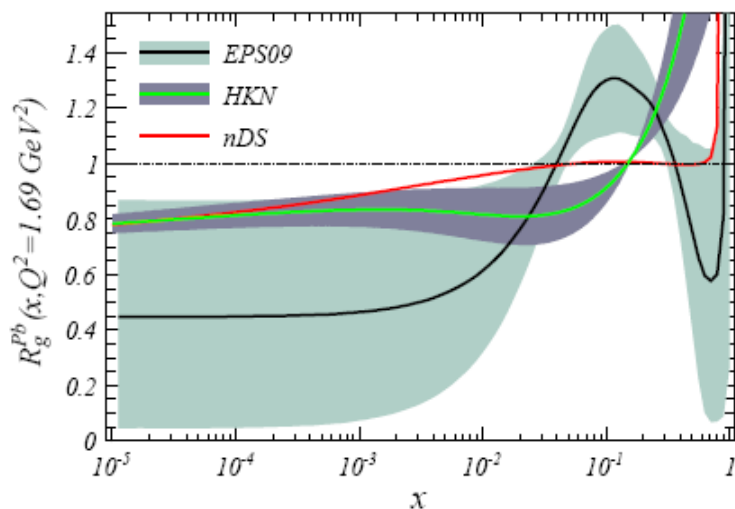


Фактор ядерного подавления

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

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

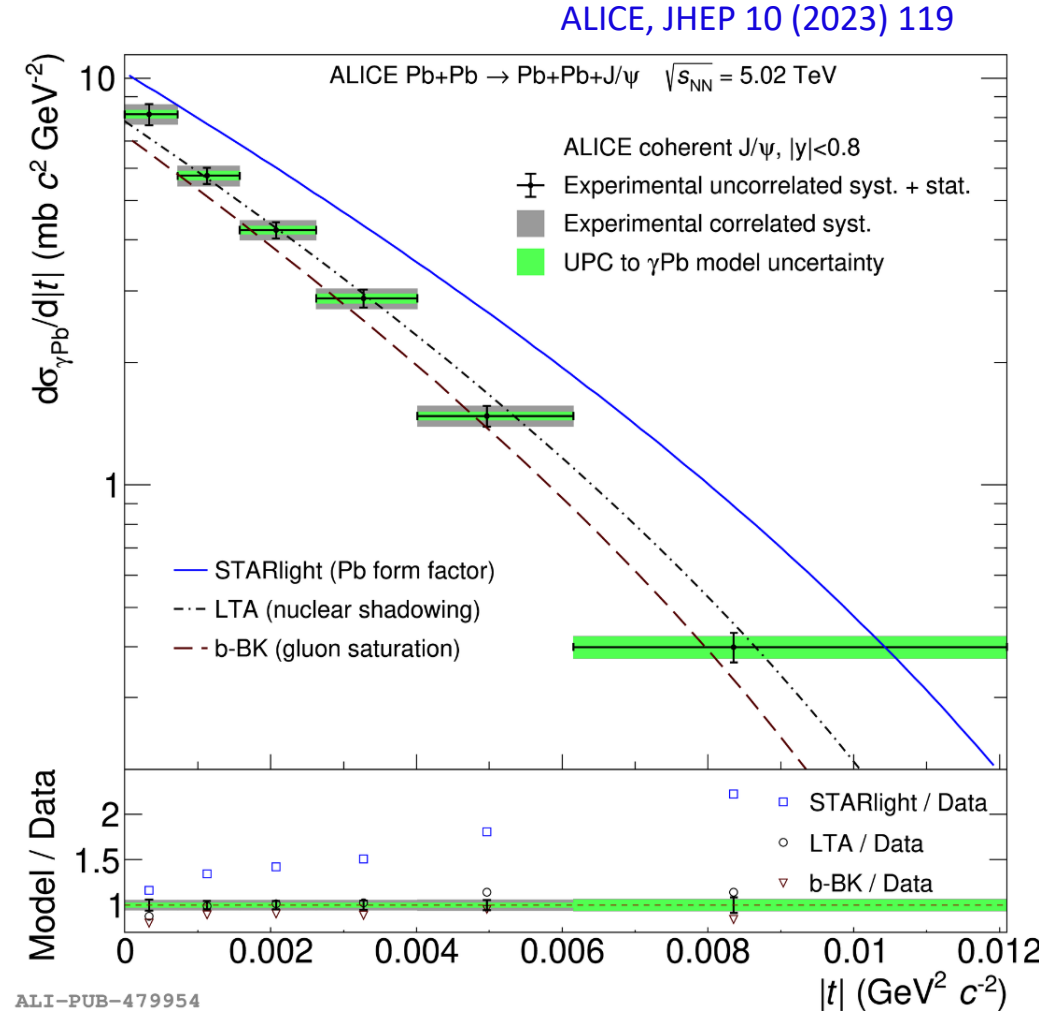
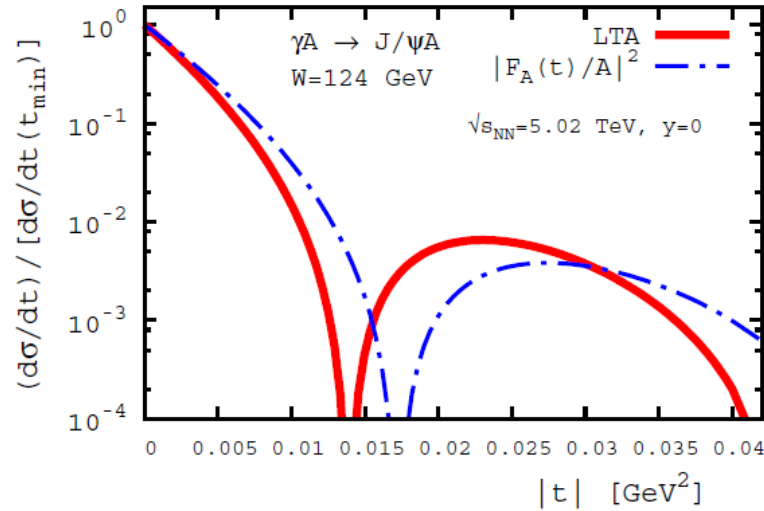
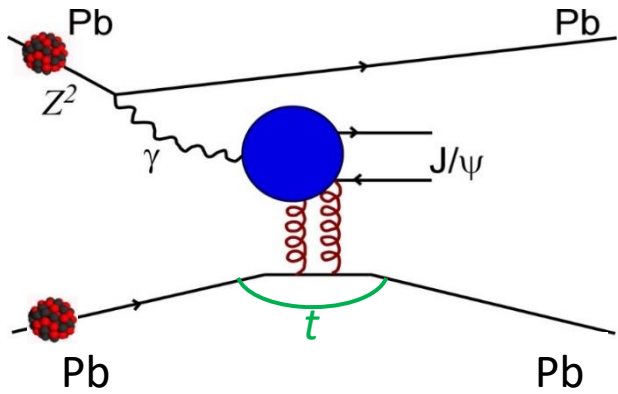
- При расчете погрешности учитывается неопределенность импульсного приближения (доминирует при малых энергиях)



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

t-зависимость когерентного сечения J/ψ

- Измерение t-зависимости когерентного сечения позволяет изучать эффекты экранировок в поперечной плоскости
- Важную роль играет коррекция распределений, связанная с разрешением детектора и ненулевым поперечным импульсом фотона

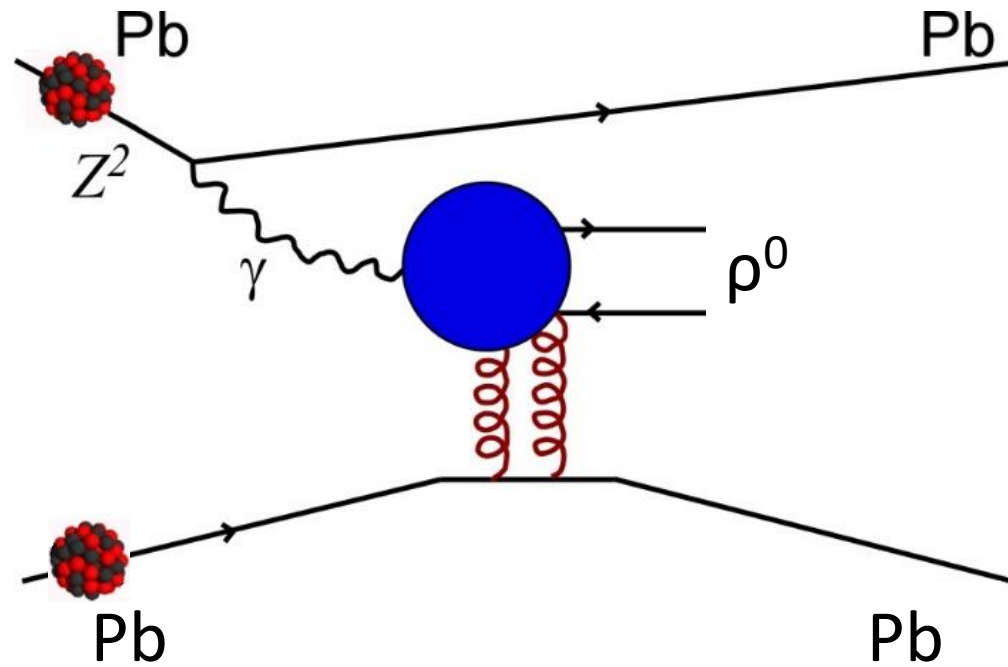


Измеренная t-зависимость значительно отклоняется от простой модели t-зависимости, определяемой квадратом форм-фактора

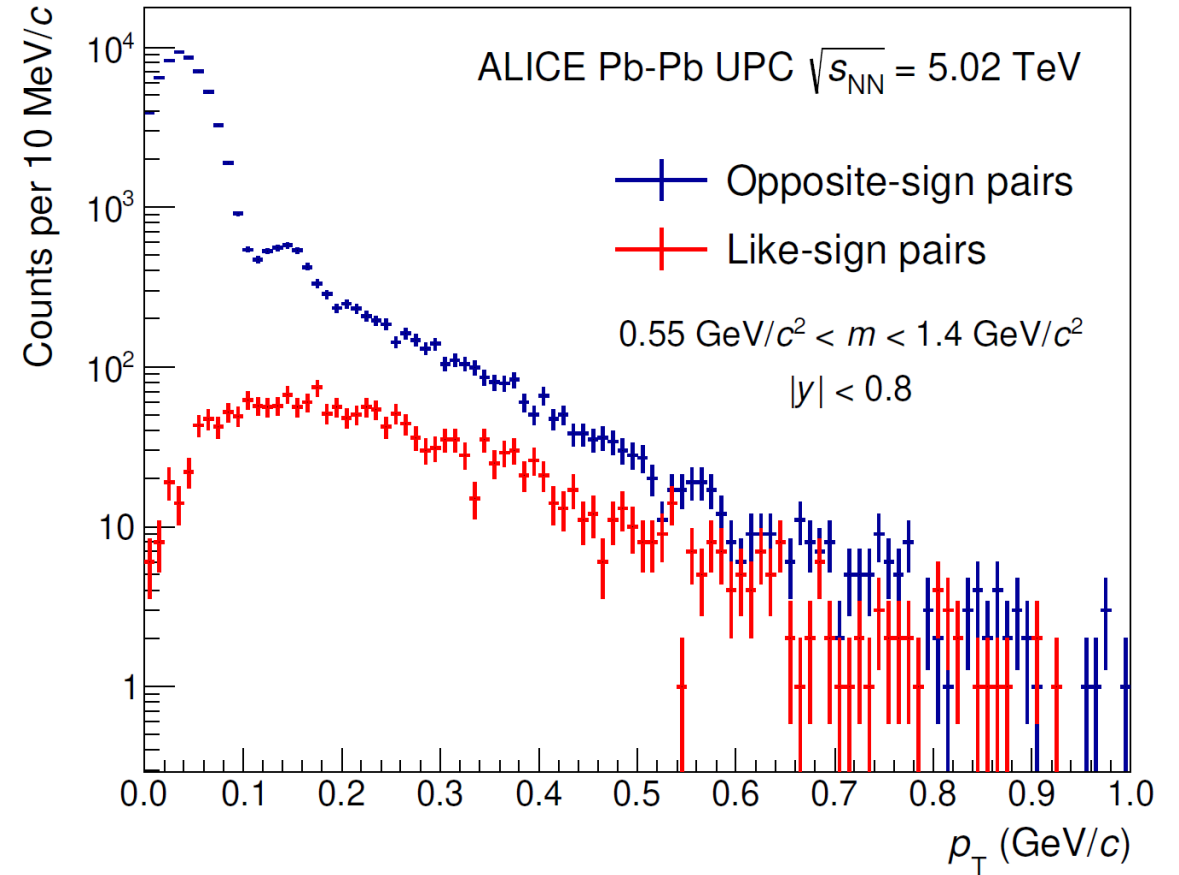
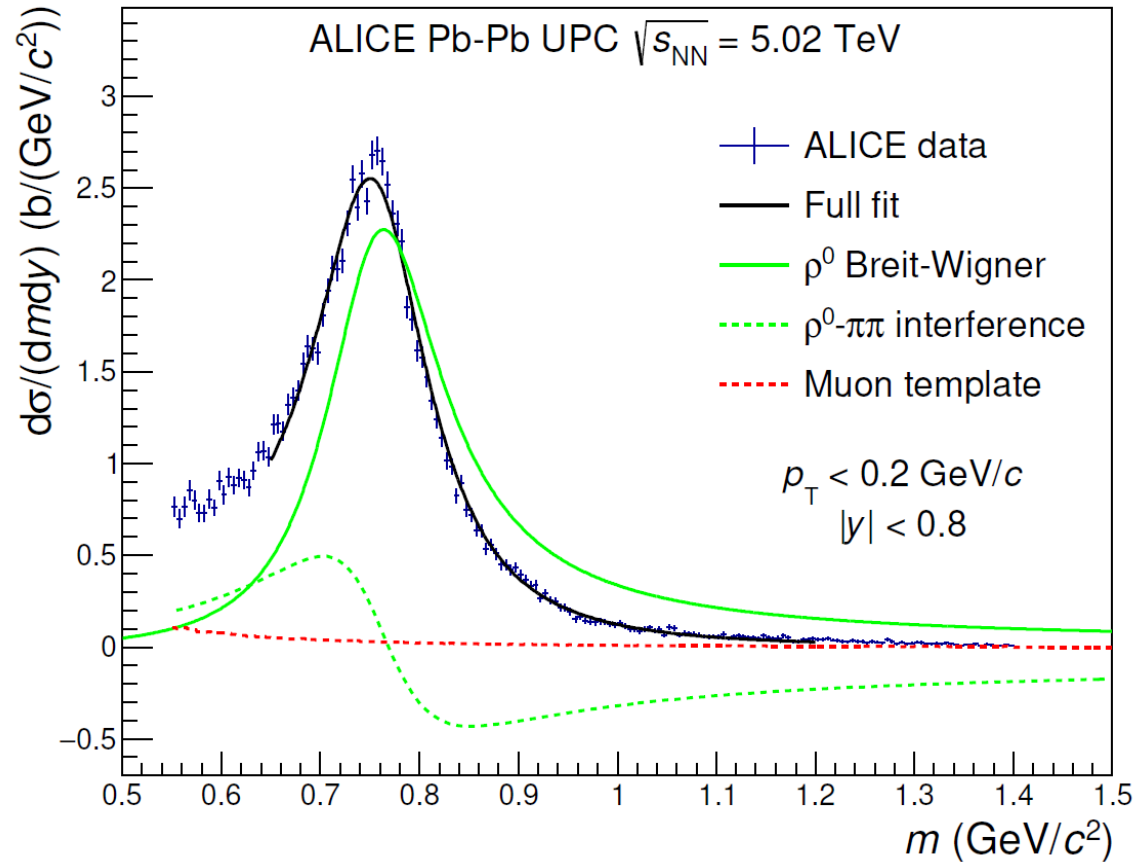
$$|t| \approx p_T^2$$

Глава 5

Фоторождение ρ^0 в Pb-Pb УПС



Когерентное рождение ρ^0 в Pb-Pb @ 5.02 ТэВ



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

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

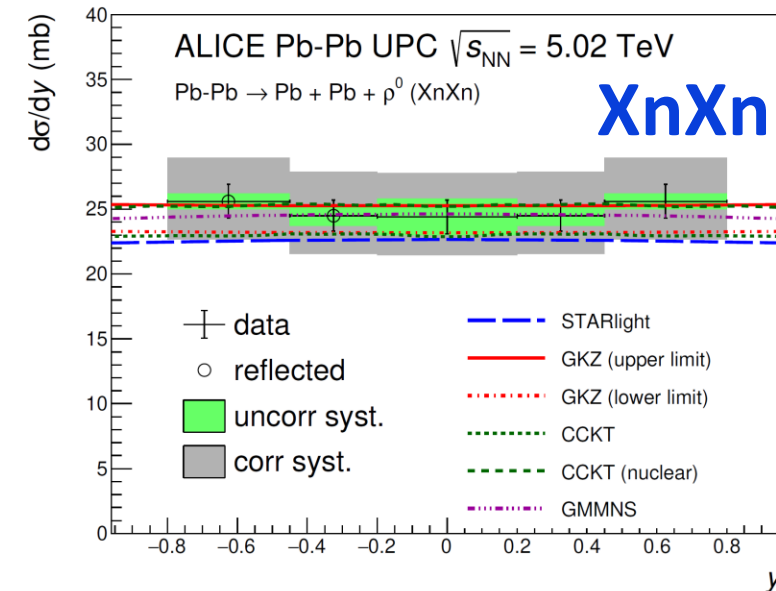
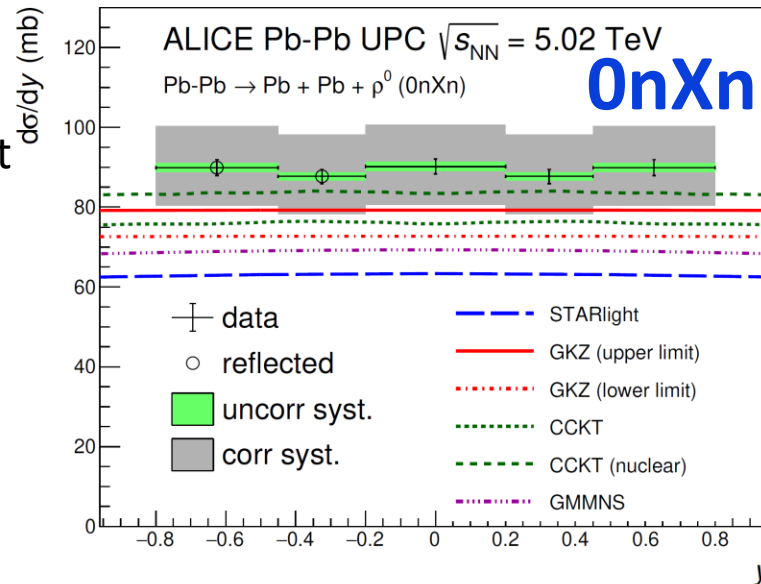
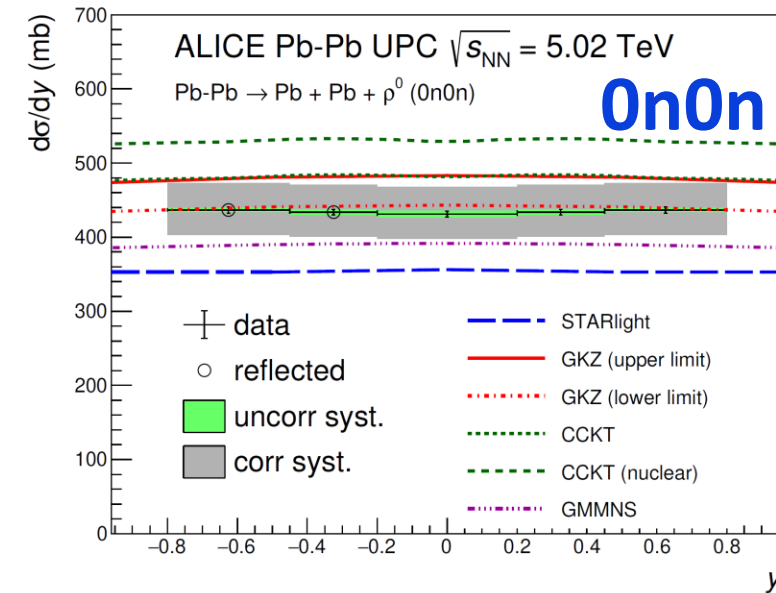
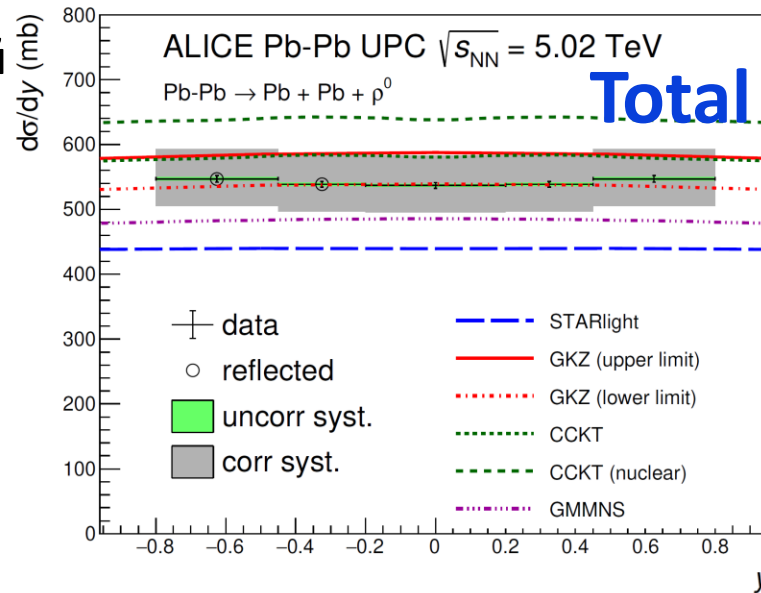
$$BW_\rho = \frac{\sqrt{m \cdot m_{\rho^0} \cdot \Gamma(m)}}{m^2 - m_{\rho^0}^2 + im_{\rho^0} \cdot \Gamma(m)}$$

Сечение когерентного рождения ρ^0 в Pb-Pb @ 5.02 ТэВ

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

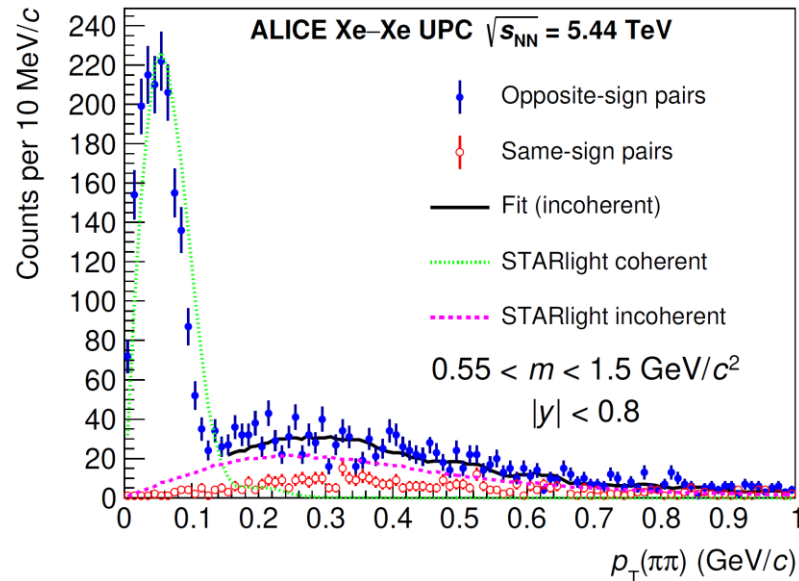
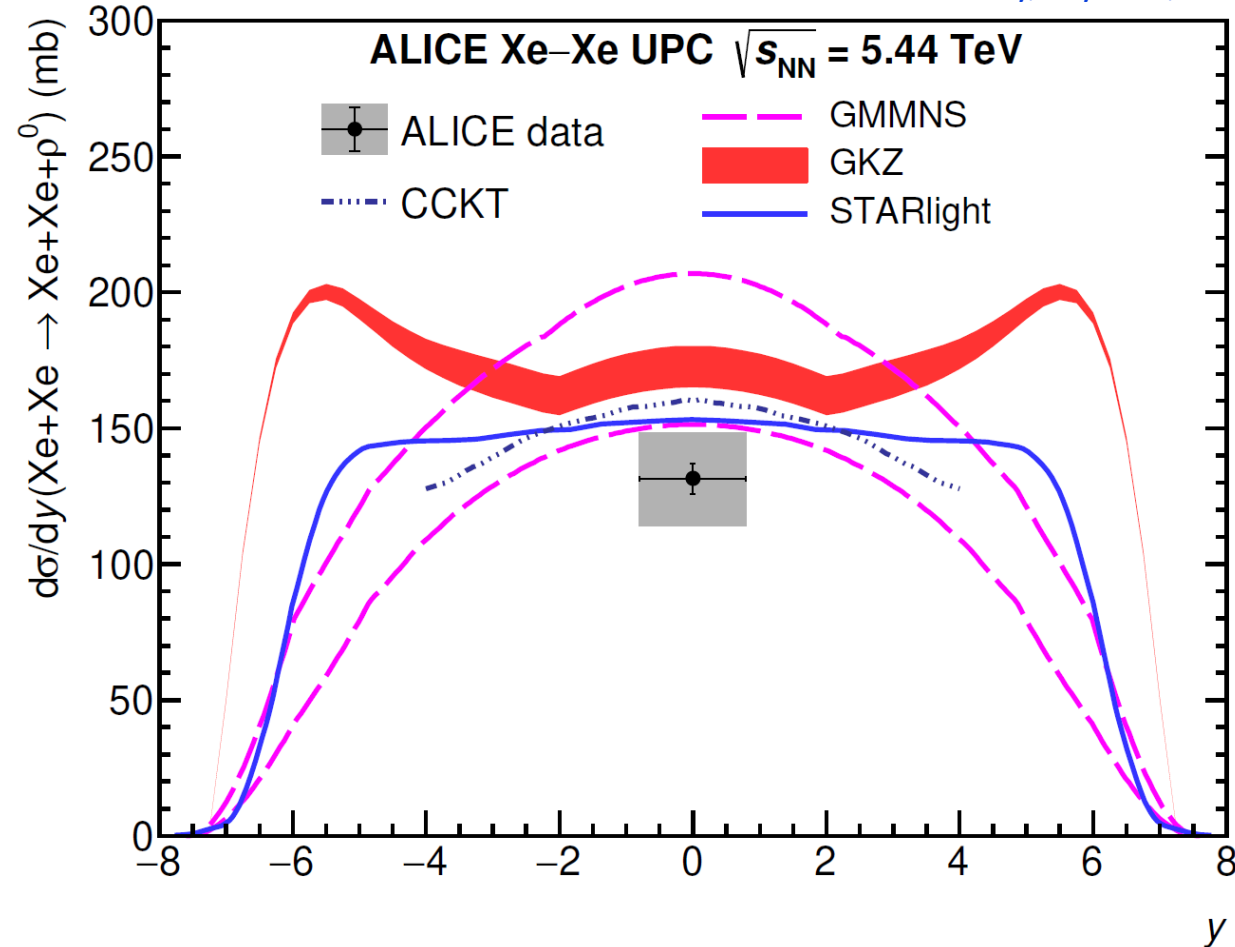
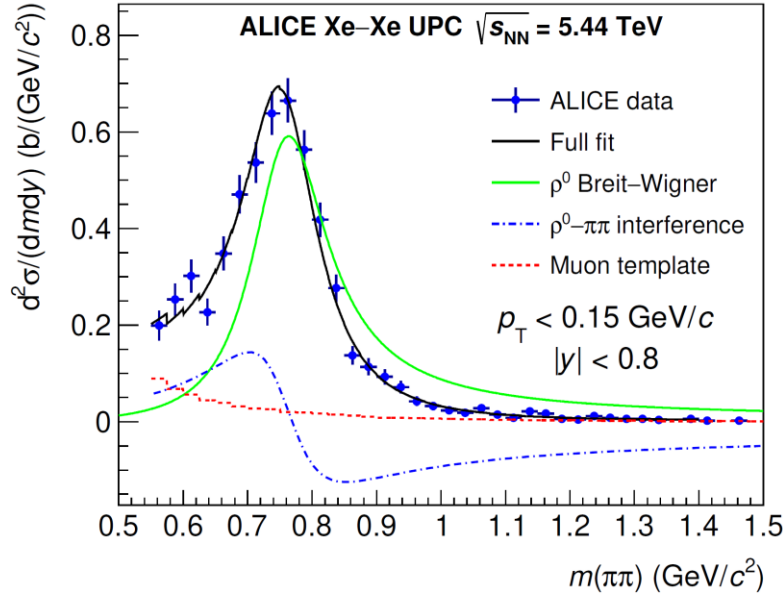
Модели:

- **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 ρ^0 в Xe-Xe

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



- Измерения в коротком сеансе Xe-Xe столкновений 2017 года
- Предсказания немного переоценивают измеренное сечение когерентного рождения ρ^0 в Xe-Xe

A-зависимость когерентного сечения фоторождения ρ^0

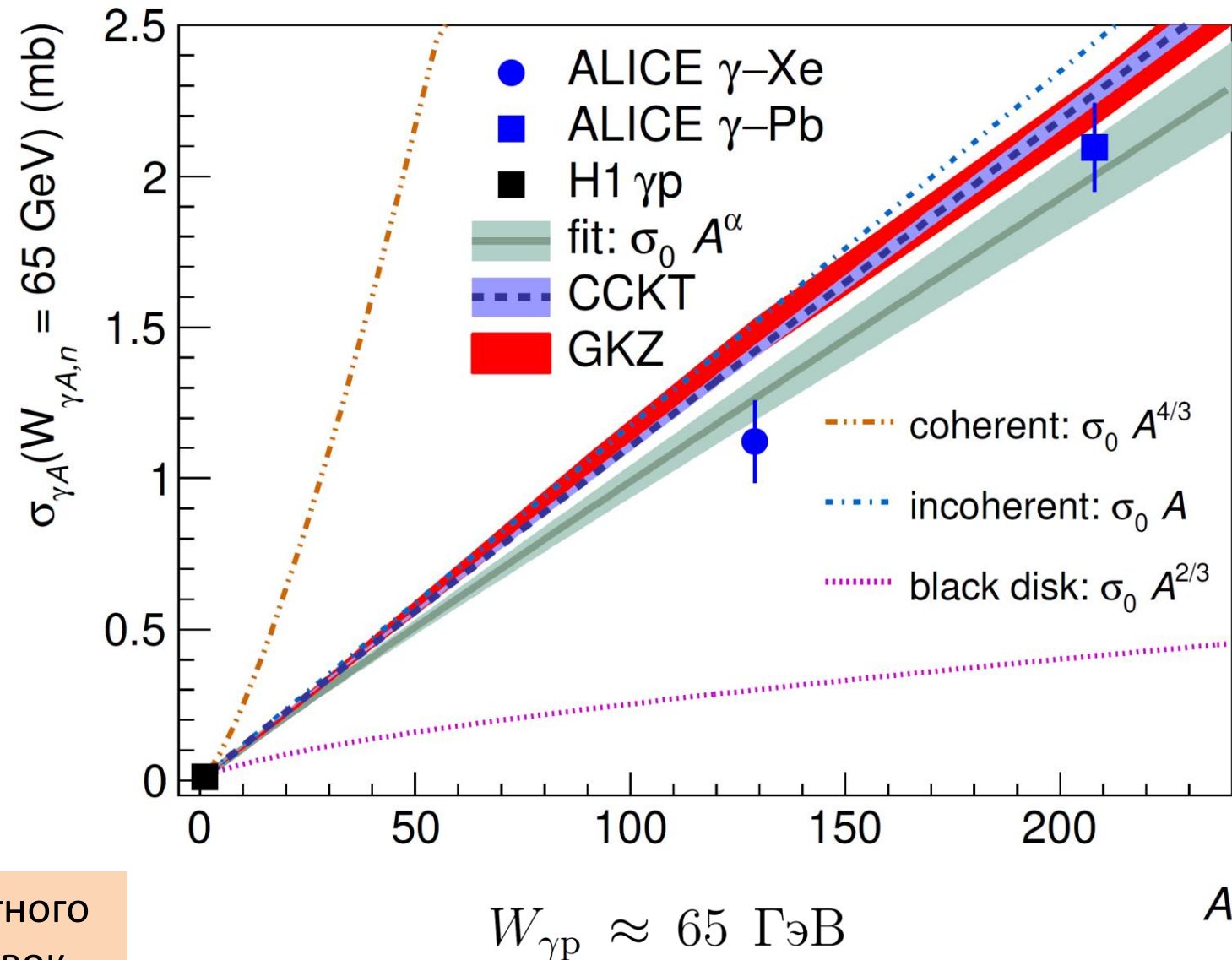
$$\sigma_{\gamma A \rightarrow A \rho^0}(W_{\gamma p}) = \frac{\sigma_{AA \rightarrow AA \rho^0}(y=0)}{2N_{\gamma A}(y=0)}$$

Экстремальные случаи:

- $\alpha = 4/3$ – когерентное рождение без ядерных эффектов
- $\alpha = 1$ – некогерентное рождение без ядерных эффектов
- $\alpha = 2/3$ – режим черного диска

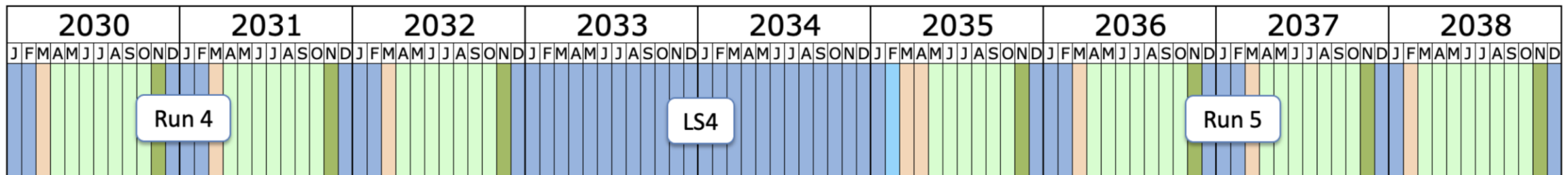
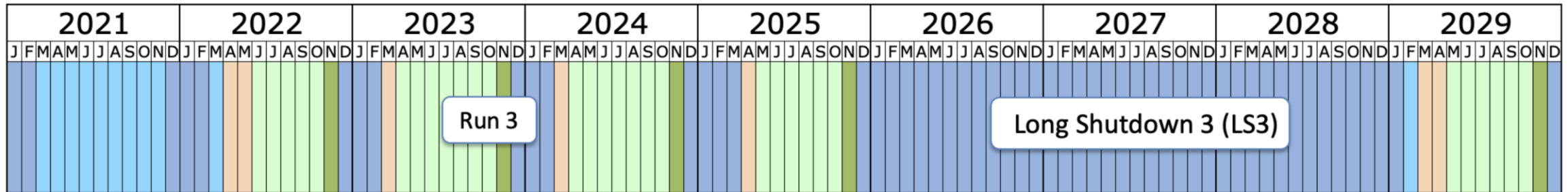
Измеренная зависимость: $\alpha = 0.96 \pm 0.02$

Значительное отклонение от чисто когерентного поведения => важность ядерных экранировок

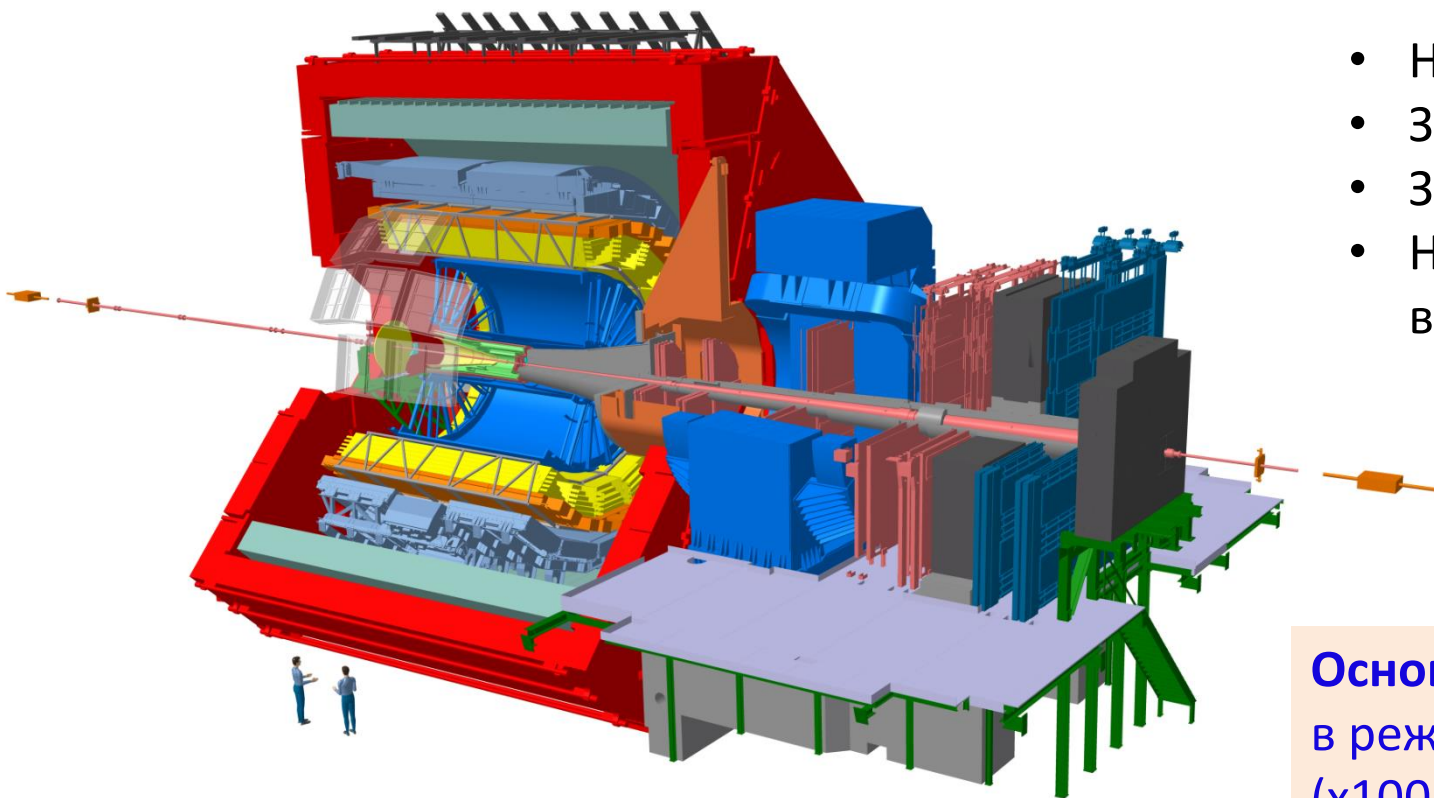


Глава 6

Перспективы измерений в УПС

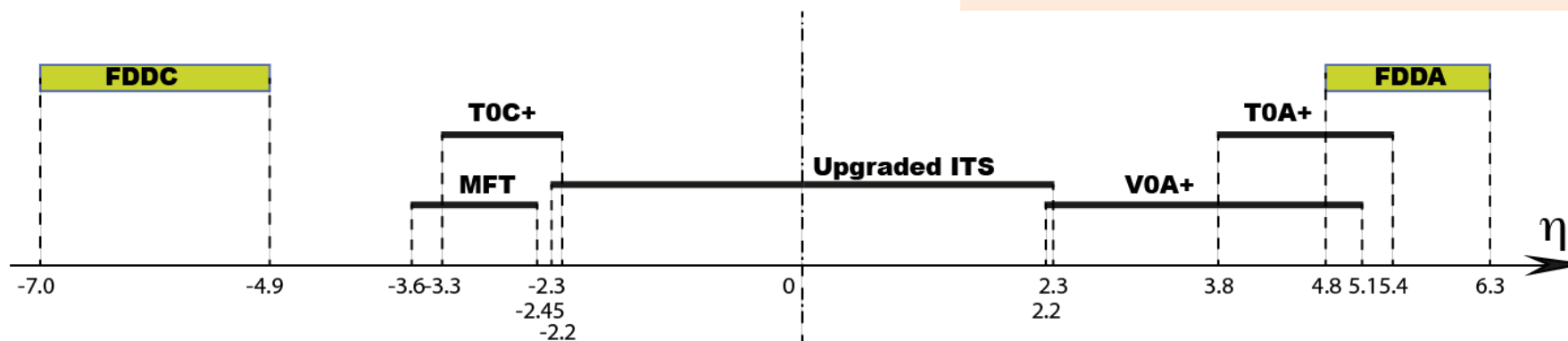


ALICE в Run 3 и Run 4



- 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

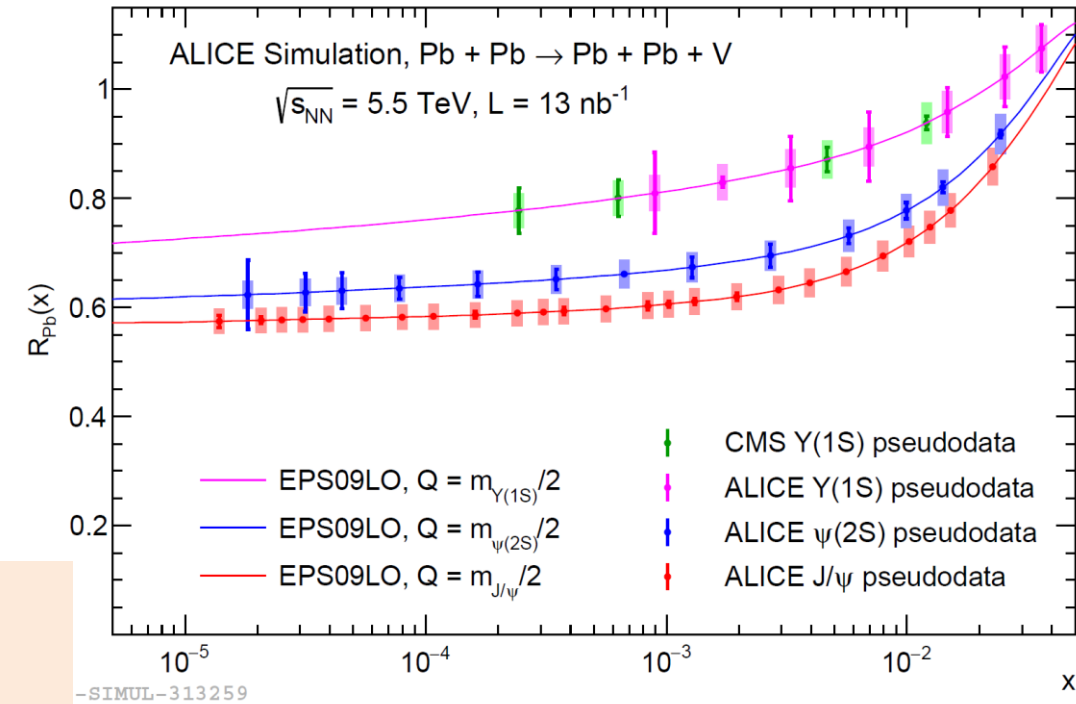
Ожидаемая статистика в Run 3-4 (13 /нб):

Канал распада	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

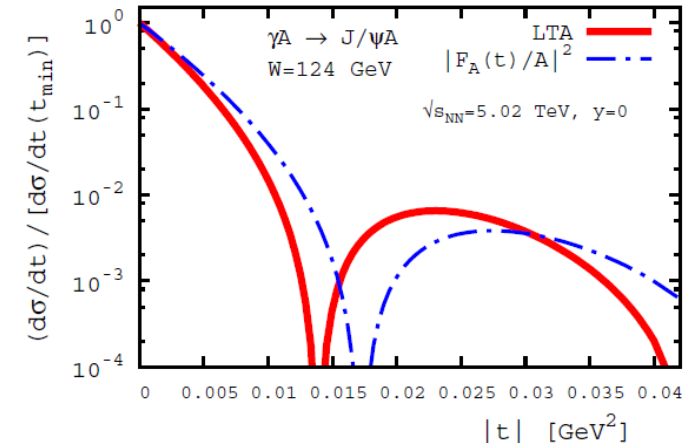
Основные цели в Run 3-4:

- 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

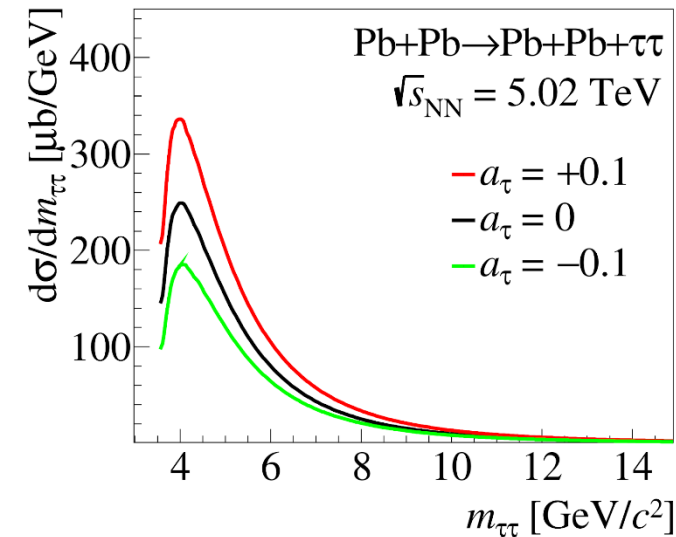
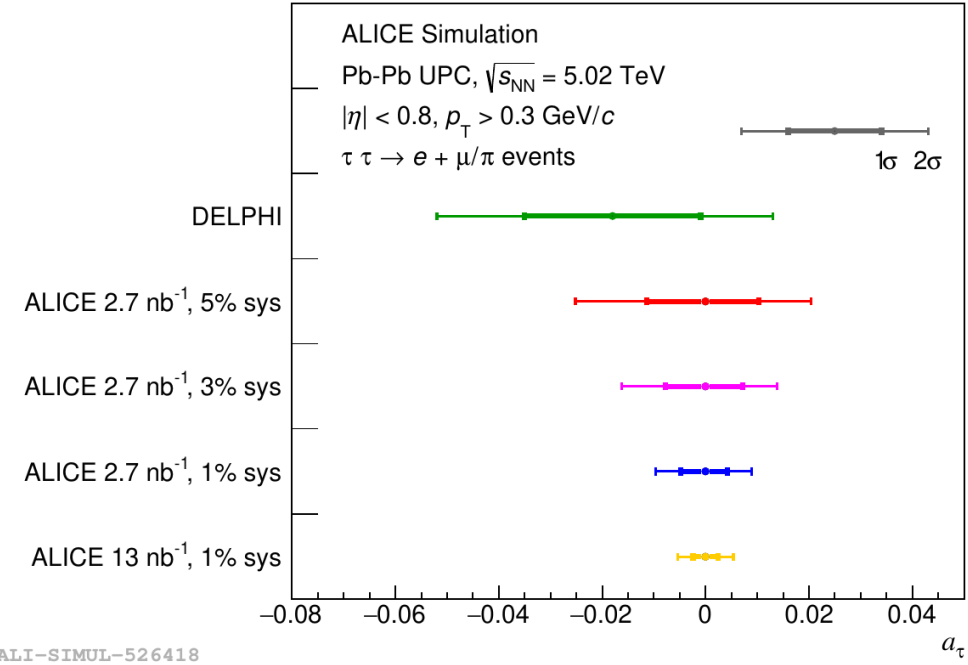
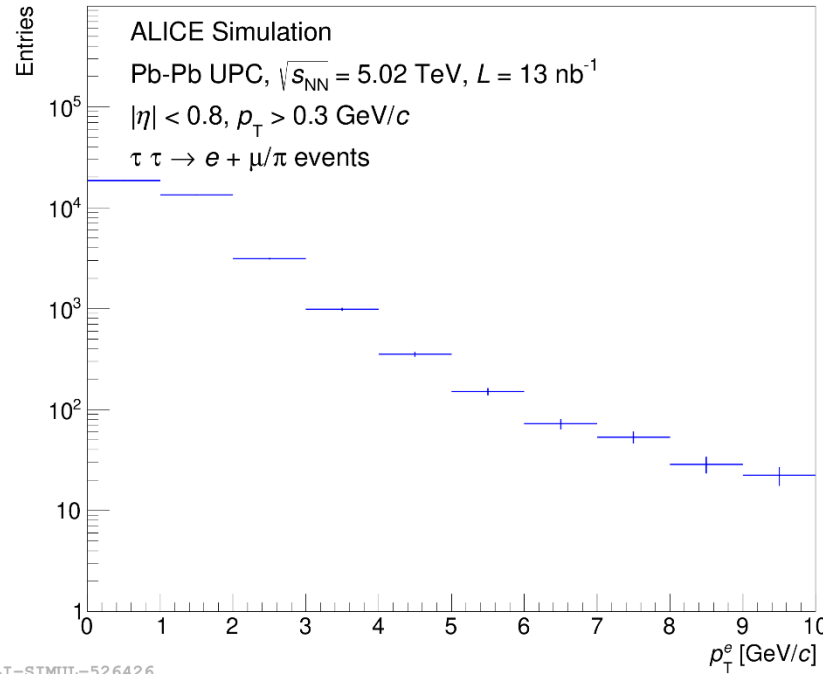
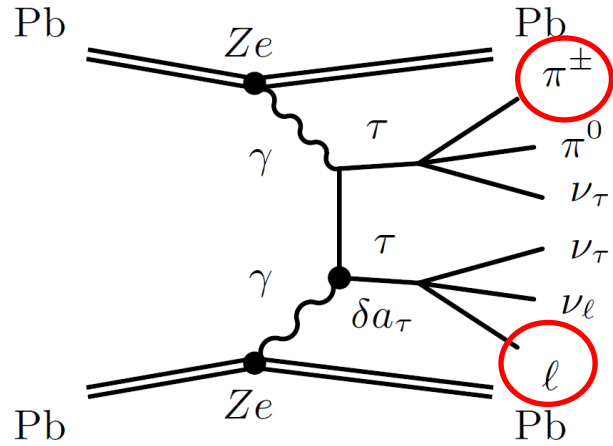


Guzey, Strikman, Zhilov PRC95 (2017) 025204



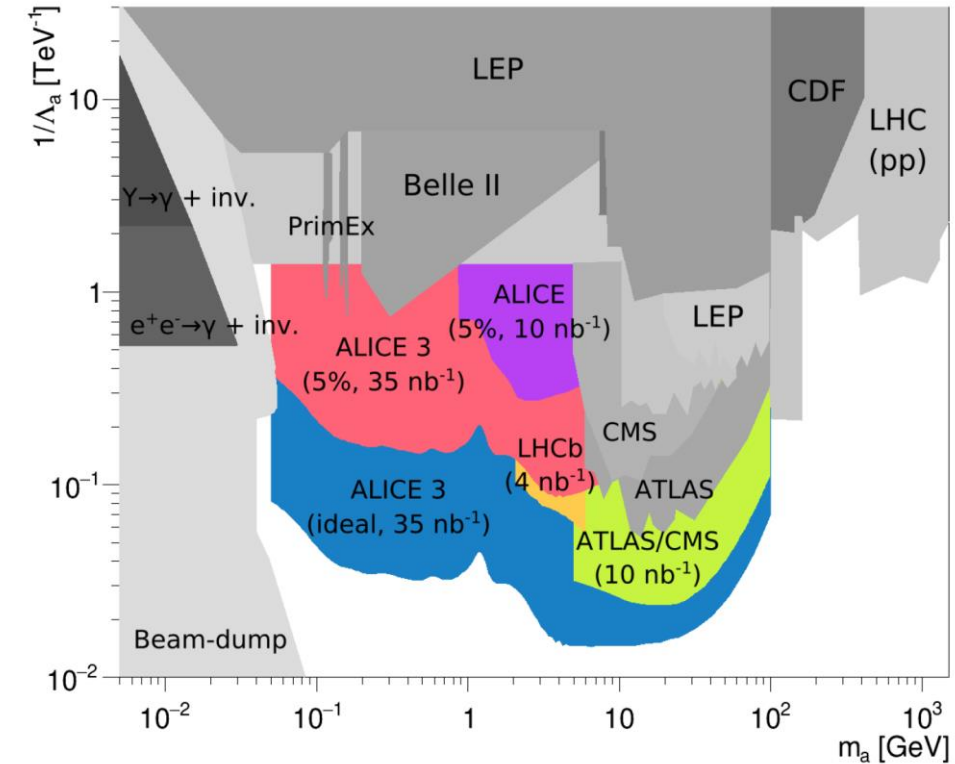
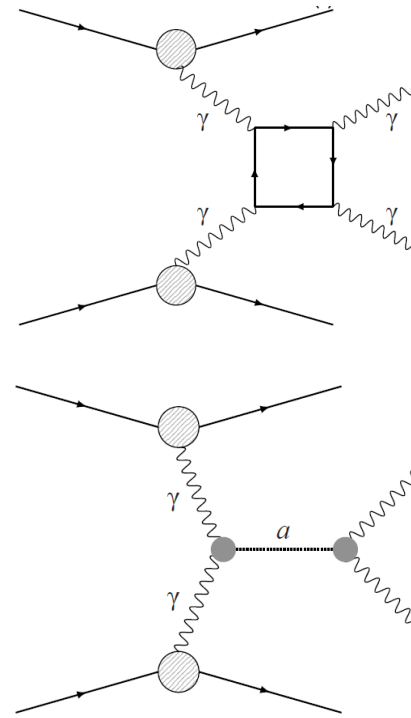
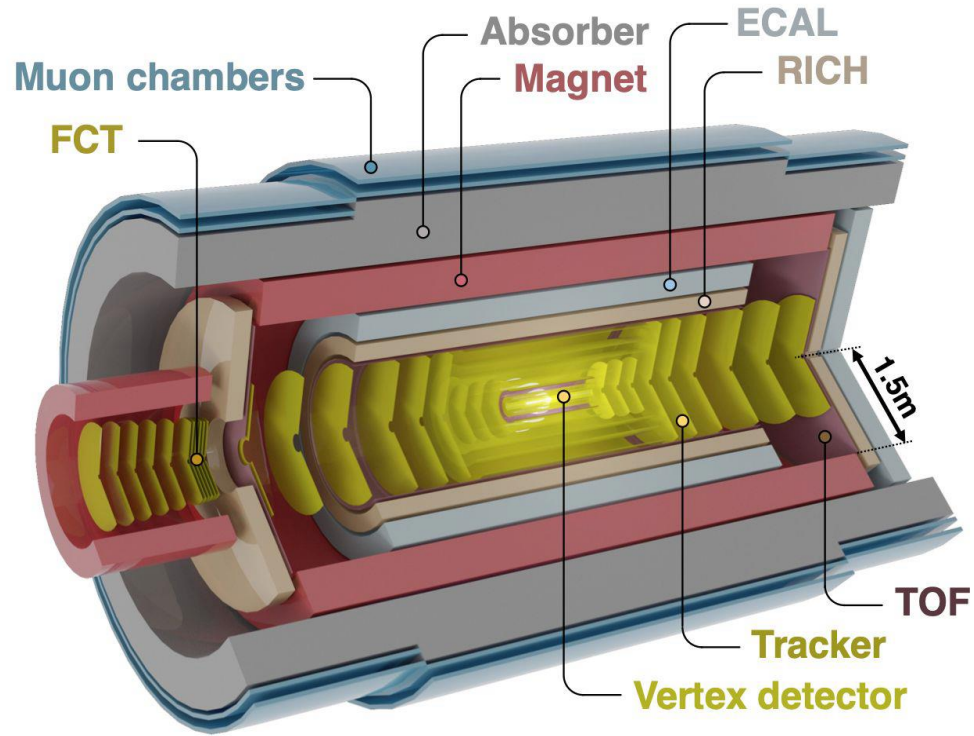
Перспективы измерений a_τ в УПС

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



- Сечение рождения тау-лептонных пар чувствительно к значению аномального магнитного момента a_τ
- Рассчитаны возможные пределы на a_τ , 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 LOI, arXiv: 2211.02491

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

- 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 π^0 пар)
- Получены пределы на параметры аксионоподобных частиц (возможные резонансы в дифотонном спектре)

Публикации с ALICE Collaboration

1. B. Abelev, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Exclusive J/ψ 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/ψ photoproduction off protons in ultra-peripheral p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. Eur. Phys. J. C79 (2019) 402.
3. B. Abelev, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Coherent J/ψ photoproduction in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. Phys. Lett. B718 (2013) 1273.
4. 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.
5. 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.
6. S. Acharya, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Coherent J/ψ photoproduction at forward rapidity in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. Phys. Lett. B798 (2019) 134926.
7. S. Acharya, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Coherent J/ψ and ψ' photoproduction at midrapidity in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. Eur. Phys. J. C81 (2021) 712.
8. S. Acharya, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), First measurement of the $|t|$ -dependence of coherent J/ψ photonuclear production. Phys. Lett. B817 (2021) 136280.
9. S. Acharya, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Energy dependence of coherent photonuclear production of J/ψ mesons in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. JHEP 10 (2023) 119.
10. J. Adam, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Coherent ρ^0 photoproduction in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. JHEP09 (2015) 095.
11. S. Acharya, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), First measurement of coherent ρ^0 photoproduction in ultra-peripheral XeXe collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV. Phys. Lett. B820 (2021) 136481.
12. S. Acharya, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Coherent photoproduction of ρ^0 vector mesons in ultra-peripheral Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. JHEP06 (2020) 035.
13. B. Abelev, ..., E. Kryshen et al. (ALICE Collaboration), Measurement of the Cross Section for Electromagnetic Dissociation with Neutron Emission in Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 252302.
14. 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.

3 публикации по фоторождению J/ψ на протоне в p-Pb ПУПС

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

3 публикации по фоторождению ρ^0

Измерение сечений электромагнитной диссоциации калибровка светимости

Публикации

15. V. Guzey, E. Kryshen, M. Strikman, and M. Zhalov. Evidence for nuclear gluon shadowing from the ALICE measurements of PbPb ultraperipheral exclusive J/ψ production. Phys. Lett. B726 (2013) 290.
16. V. Guzey, E. Kryshen, M. Strikman, and M. Zhalov. Nuclear suppression from coherent J/ψ photoproduction at the Large Hadron Collider. Phys. Lett. B816 (2021) 136202.
17. 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.
18. 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.
19. V. Guzey, E. Kryshen, and M. Zhalov. Incoherent ρ meson photoproduction in ultraperipheral nuclear collisions at the CERN Large Hadron Collider. Phys. Rev. C102 (2020) 015208.
20. E. Kryshen, M. Strikman, and M. Zhalov. Photoproduction of J/ψ with neutron tagging in ultraperipheral collisions of nuclei at RHIC and at the LHC. Phys. Rev. C108 (2023) 024904.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. D. d'Enterria, ..., E. Kryshen et al. Opportunities for new physics searches with heavy ions at colliders. J. Phys. G50 (2023) 050501.
25. E. Kryshen. Heavy Vector Meson Photoproduction in Ultra-peripheral Collisions at the LHC. Acta Phys. Polon. B 50 (2019) 1095.
26. E. Kryshen. Photoproduction of heavy vector mesons in ultra-peripheral Pb-Pb collisions. Nucl. Phys. A967 (2017) 273.
27. 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
28. ALICE collaboration. The ALICE experiment -- A journey through QCD. arXiv: 2211.04384

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 (по материалам конференций)

ALICE performance

Апробация: около 30 докладов на конференциях и семинарах

- Overview of recent ALICE results. XXI [Lomonosov](#) Conference (МГУ, Москва, 26 Августа 2023).
- Recent ALICE results on photon-induced interactions. 13th International workshop on [Multiple Partonic Interactions](#) at the LHC (MPI@LHC 2022). (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. 6th International Conference on Particle Physics and Astrophysics. [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
- ALICE Status Report. 145th [LHCC Meeting](#) - OPEN Session. 3 March 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 September 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).
- Recent ALICE results on coherent J/ψ photoproduction in ultra-peripheral Pb-Pb collisions. XXVII International Workshop on [Deep Inelastic Scattering](#) (Torino, Italy, 10 April 2019).
- Heavy vector meson photoproduction in ultra-peripheral collisions at the LHC. XXV [EPIPHANY Conference](#) On Advances In Heavy Ion Physics (Cracow, Poland, 11 January 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).
- Ultraperipheral collisions at the LHC. [EMMI Physics day](#) 2017. (Darmstadt, Germany, 28 November 2017).
- 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 February 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). Proceedings: arxiv:1410.8192.
- J/ψ 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).
- 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--16 March, 2013).
- Ultra-peripheral collisions with ALICE. International workshop "Results and prospects of forward physics at the LHC" (CERN, Switzerland, 11--13 February, 2013).
- ALICE status and plans. International workshop "LHC on the March" (Protvino, Russia, 20-- November, 2012).

На защиту выносятся следующие положения (1)

- Результаты расчетов сечений когерентного и некогерентного фоторождения легких векторных мезонов в зависимости от быстроты в ультрапериферических PbPb столкновениях в модели Грибова-Глаубера.
- Результаты расчетов сечений когерентного и некогерентного фоторождения тяжелых векторных мезонов в зависимости от быстроты в ультрапериферических Pb-Pb столкновениях в приближении лидирующих твистов и с использованием параметризации ESP09
- Методика извлечения глюонных экранировок из экспериментальных измерений когерентного рождения тяжелых векторных мезонов в ультрапериферических столкновениях.
- Результаты измерений энергетической зависимости сечений эксклюзивного фоторождения J/ψ на протоне в диапазоне энергий от 20 до 700 ГэВ, извлеченные из сечений рождения J/ψ 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/ψ 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 выше предсказаний.
- Результаты измерений сечения когерентного рождения $\psi(2S)$ мезонов в ультрапериферических Pb-Pb столкновениях при энергии 5.02 TeV, свидетельствующих, 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/ψ в ультрапериферических Pb-Pb столкновениях при энергии 5.02 TeV, сопровождающихся дополнительным обменом фотонами и диссоциацией одного или обоих сталкивающихся ядер. Из измеренных сечений извлечена энергетическая зависимость сечений когерентного фоторождения J/ψ мезонов вплоть до энергий $W_{\gamma N} \sim 800$ 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 $Q^2 \sim 3$ ГэВ².
- Результаты измерений t -зависимости сечений когерентного фоторождения J/ψ в ультрапериферических PbPb столкновениях, которые можно использовать для исследования эффектов подавления глюонной плотности в плоскости прицельных параметров. Результаты согласуются с предсказаниями приближения лидирующих твистов.
- Результаты измерений сечения когерентного рождения ρ -мезонов в ультрапериферических PbPb столкновениях при энергии 5.02 ТэВ и XeXe столкновениях при энергии 5.44 ТэВ. Измеренные сечения находятся в согласии с расчетами в модели Грибова-Глаубера, что свидетельствует о важности учета грибовских экранировок. Измерения сечений фоторождения ρ -мезонов, сопровождающихся дополнительным обменом фотонами и диссоциацией одного или обоих сталкивающихся ядер, находятся в хорошем согласии с предсказаниями моделей.
- Результаты расчетов статистических и систематических погрешностей факторов ядерного подавления для J/ψ , $\psi(2S)$ и $\Upsilon(1S)$ мезонов, которые могут быть измерены в ультрапериферических Pb-Pb столкновениях в будущих сеансах работы Большого Адронного Коллайдера.

BACKUP

Научная новизна и значимость

- В проведенном цикле работ были впервые измерены сечения фоторождения J/ψ и $\psi(2S)$ на ядрах в ультрапериферических p-Pb и Pb-Pb столкновениях.
- По сравнению с результатами, полученными на коллайдере HERA, более чем в два раза расширен диапазон энергий, в котором измерены сечения эксклюзивного фоторождения J/ψ на протоне. Степенная зависимость сечения, измеренная вплоть до энергии $W \sim 700$ ГэВ, свидетельствует об отсутствии явных сигналов насыщения глюонных плотностей вплоть до беркеновских $x \sim 10^{-5}$.
- Сечение фоторождения J/ψ впервые измерено на ядрах Pb 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 $x \sim 10^{-5}$.
- Впервые измерено сечение фоторождения ρ -мезонов в ультрапериферических Pb-Pb и Xe-Xe столкновениях. Впервые измерена A-зависимость сечения когерентного фоторождения ρ -мезонов. Наблюдаемое подавление сечений по сравнению с импульсным приближением свидетельствует о важности учета грибовских экранировок.
- Разработанные методики обработки экспериментальных данных широко используются в эксперименте ALICE для анализа ультрапериферических столкновений. Выполненные измерения позволяют проверить предсказания различных моделей фоторождения векторных мезонов на протонах и ядрах.

Достоверность

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов базируется на использовании современных экспериментальных методик физики высоких энергий, 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.

Личный вклад

Активное 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
- 2021-2022 – координатор написания 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

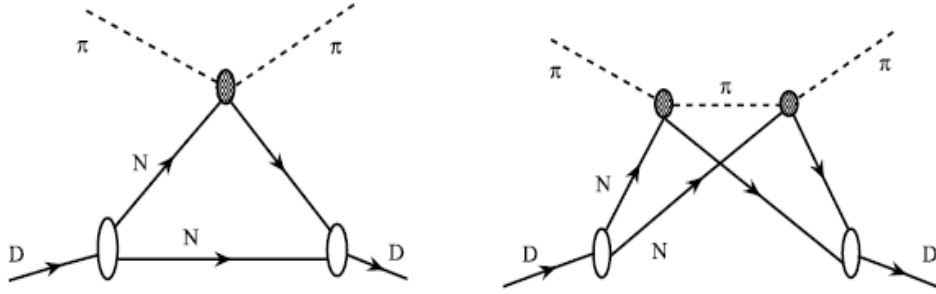
- Разработка стратегии извлечения глюонных экранировок и ожидаемых погрешностей в Run 3-4 → Yellow Report
- Анализ возможностей измерения аномального магнитного момента тау-лептона в УПС (с Н. Бурмасовым)
- Анализ возможностей измерения сечения рассеяния света на свете и поиска аксионов (с Н. Бурмасовым)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

On nuclear shadowing

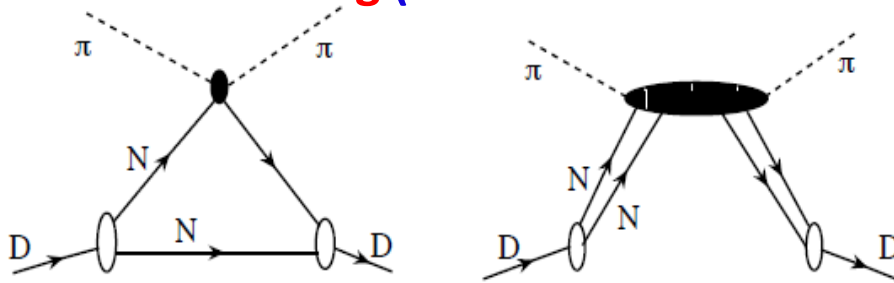
Glauber shadowing (modeling of several consequent interactions):



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

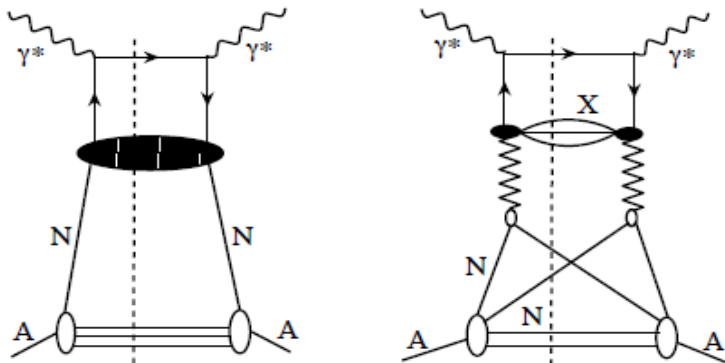
shadowing = destructive interference
between single and multiple interactions

Gribov shadowing (coherent interaction via intermediate diffractive states):



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

Leading twist shadowing (generalization of Gribov shadowing to the parton level):



$$xf_{j/A}(x, Q_0^2, b) = AT_A(b)xf_{j/N}(x, Q_0^2) - 8\pi A(A-1)B_{\text{diff}} \Re e \frac{(1-i\eta)^2}{1+\eta^2} \int_x^{0.1} dx_{\mathbb{P}} \beta f_j^{D(3)}(\beta, Q_0^2, x_{\mathbb{P}}) \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} dz_1 \int_{z_1}^{\infty} dz_2 \rho_A(\vec{b}, z_1) \rho_A(\vec{b}, z_2) e^{i(z_1-z_2)x_{\mathbb{P}}m_N} e^{-\frac{A}{2}(1-i\eta)\sigma_{\text{soft}}^j(x, Q_0^2) \int_{z_1}^{z_2} dz' \rho_A(\vec{b}, z')}$$

shadowing is expressed via diffractive PDFs

$$S_{\text{coh}}(x, \mu^2) = \left[1 - \frac{\sigma_2(x, \mu^2)}{\sigma_3(x, \mu^2)} \left(1 - \frac{2 \int d^2\mathbf{b} [1 - e^{-\frac{\sigma_3(x, \mu^2)}{2} T_A(\mathbf{b})}]}{A\sigma_3(x, \mu^2)} \right) \right]^2$$

Некогерентное фоторождение легких векторных мезонов

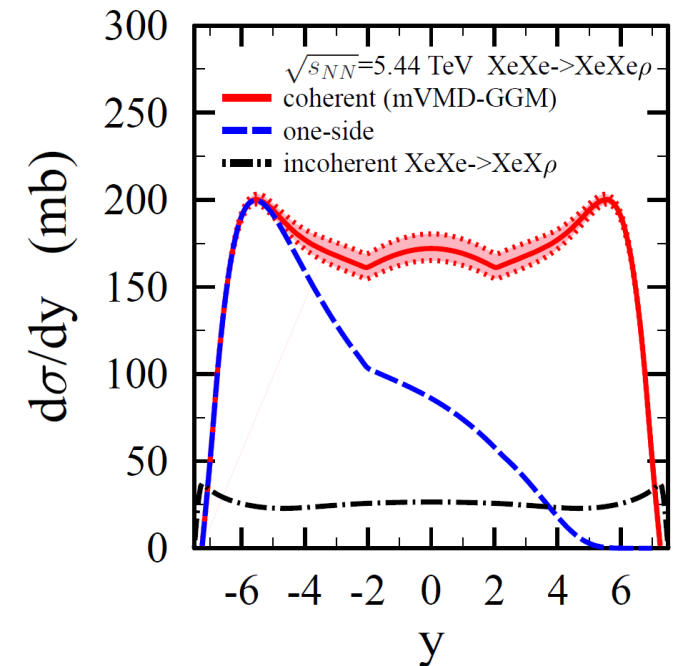
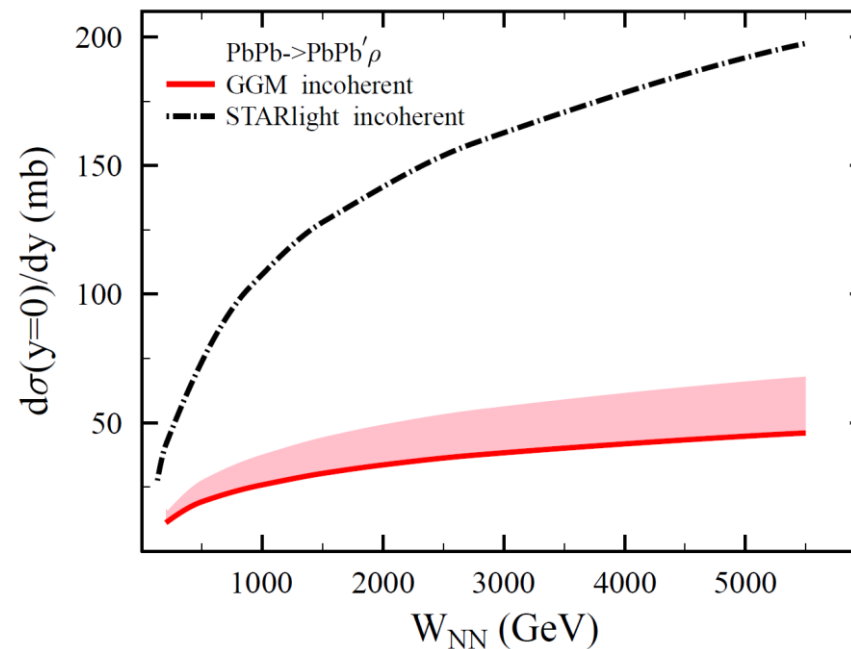
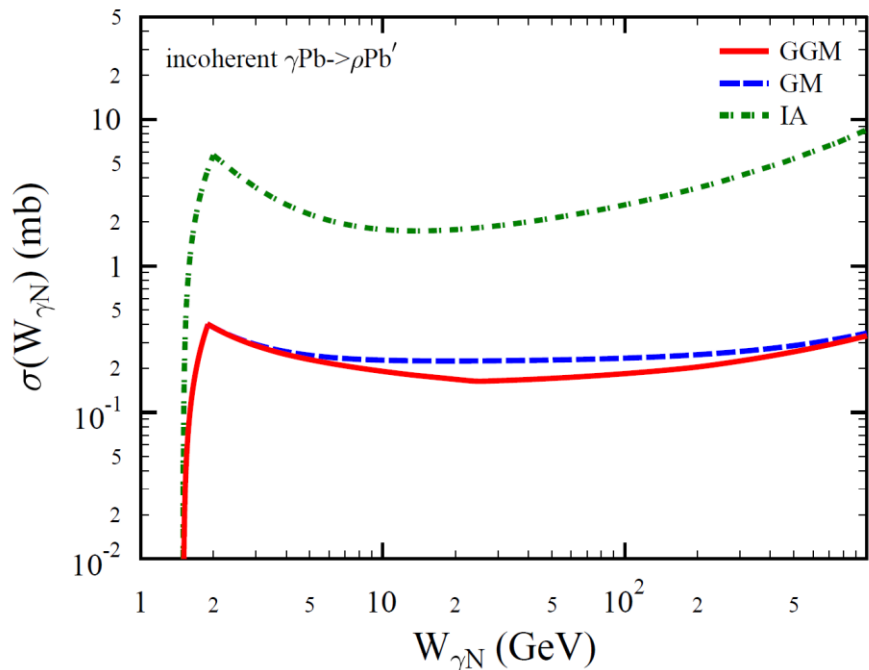
Guzey, Kryshen, Zhalov, PRC102 (2020) 015208

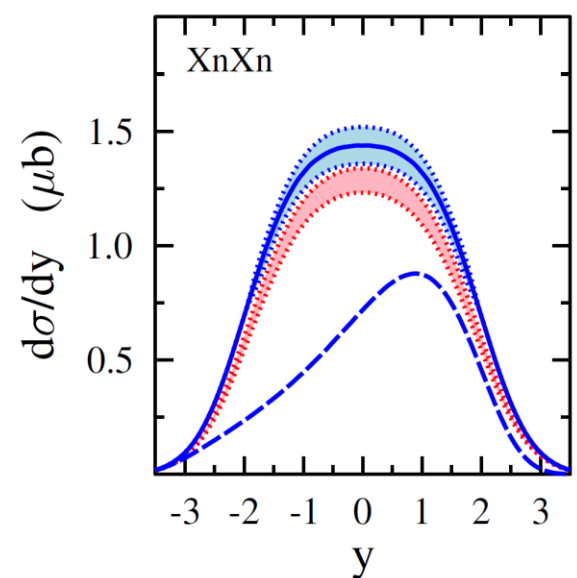
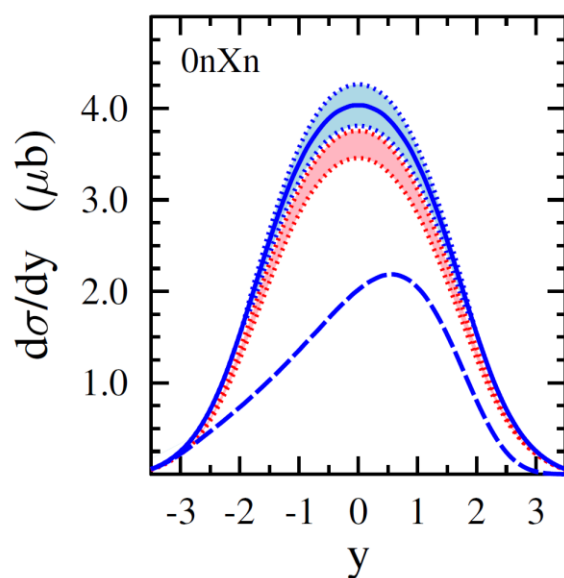
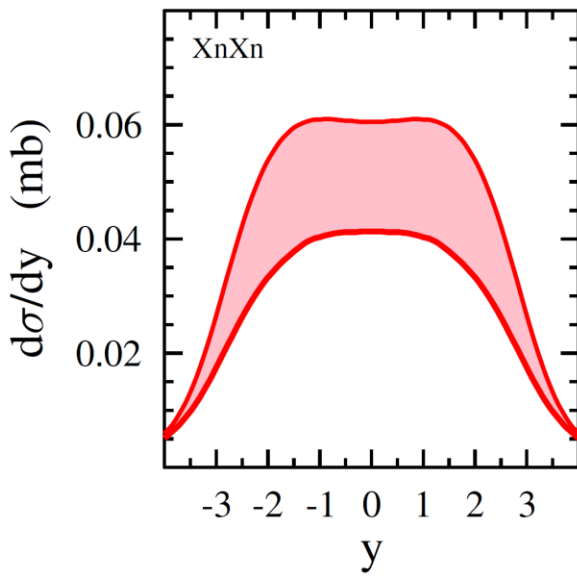
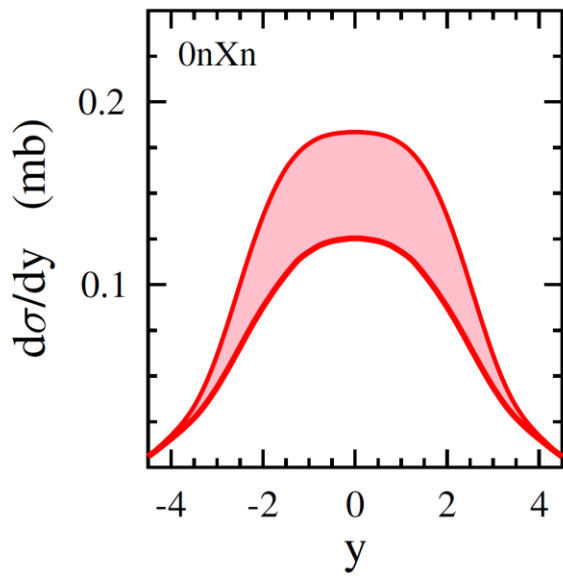
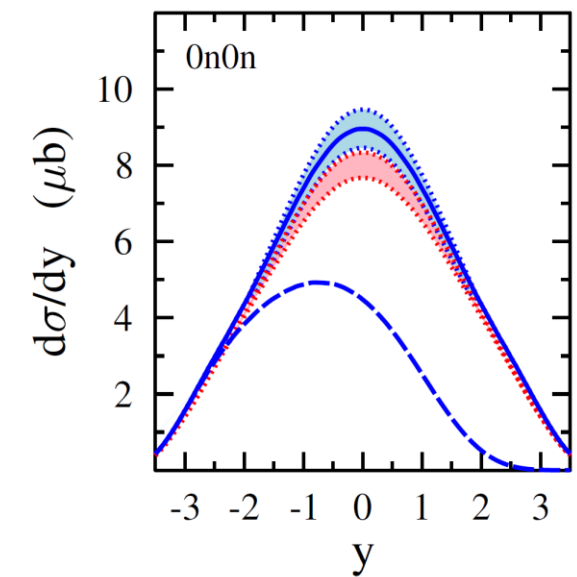
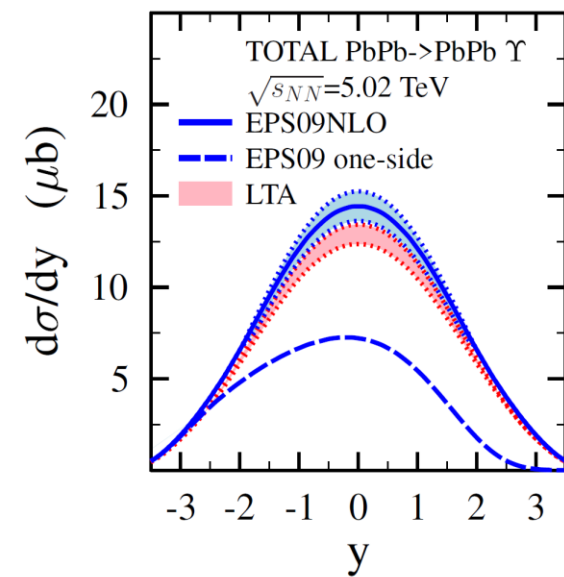
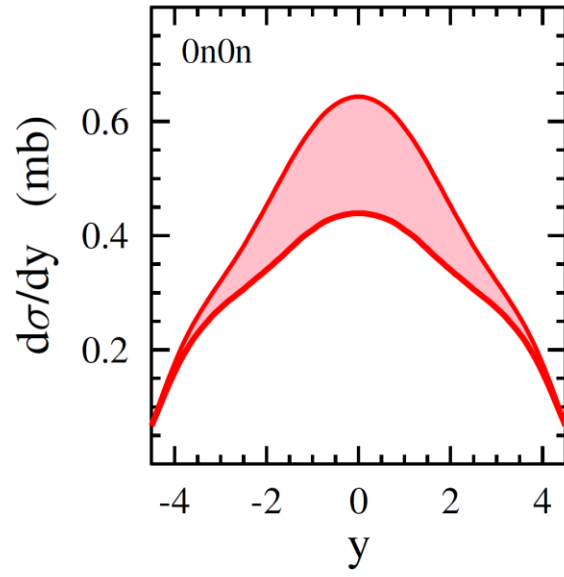
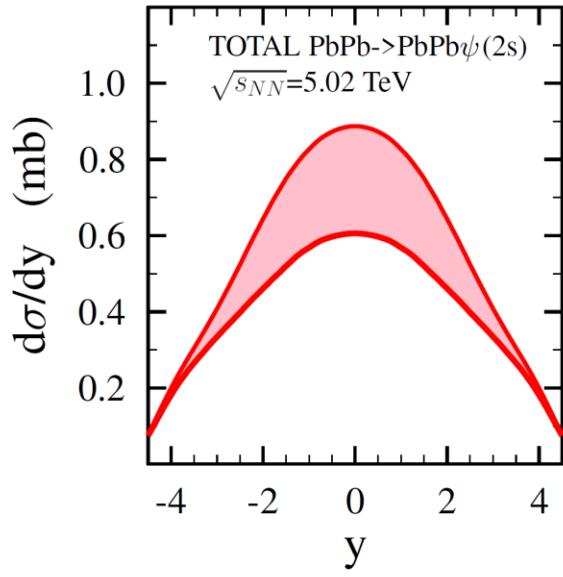
- Квазиупругое некогерентное сечение:

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

- Учет некогерентного рождения с диссоциацией нуклона мишени:

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





Фоторождение дипротонов в УПС

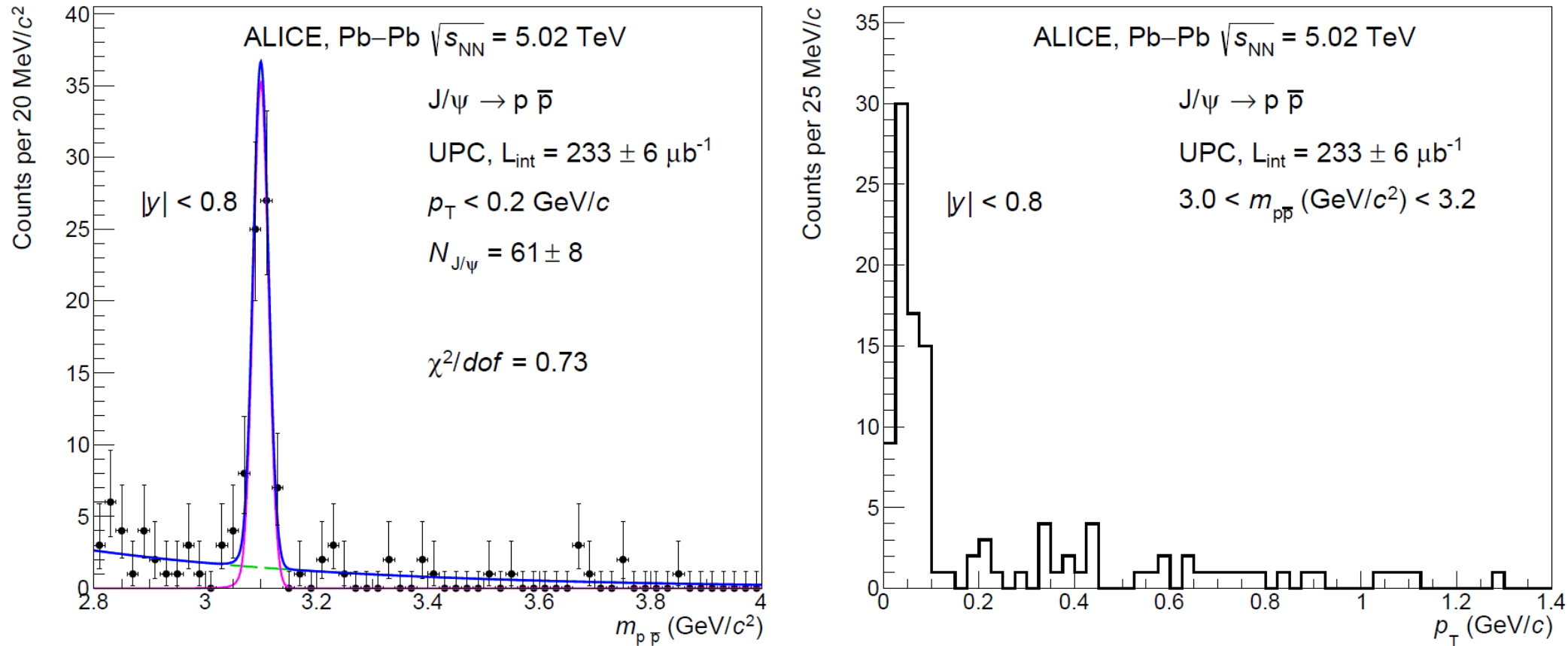


Рис. 4.6. Распределения по инвариантной массе (слева) и поперечному импульсу дипротонов (справа) в центральной области быстрот $|y| < 0.8$, полученные в ультрапериферических Pb-Pb столкновениях при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ.