



Эксперимент ALICE: физические результаты

Е. Крышень

Научная сессия ОФВЭ

25 декабря 2019

Набранная статистика в Run2



pp (при $\mu \sim 0.01$):

$\sim 4 \times 10^9$ minimum bias событий

$\sim 10 - 36$ /pb редких триггеров

- триггеры на высокую множественность
- триггеры на центральную дифракцию
- мюонные триггеры и др.

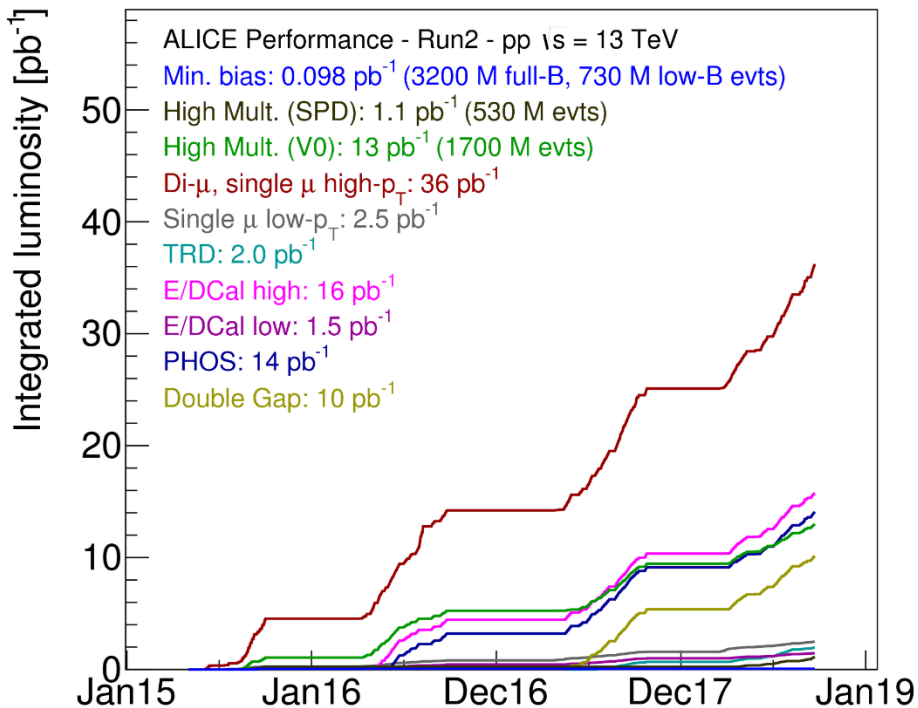
Pb-Pb:

~ 315 M minimum bias

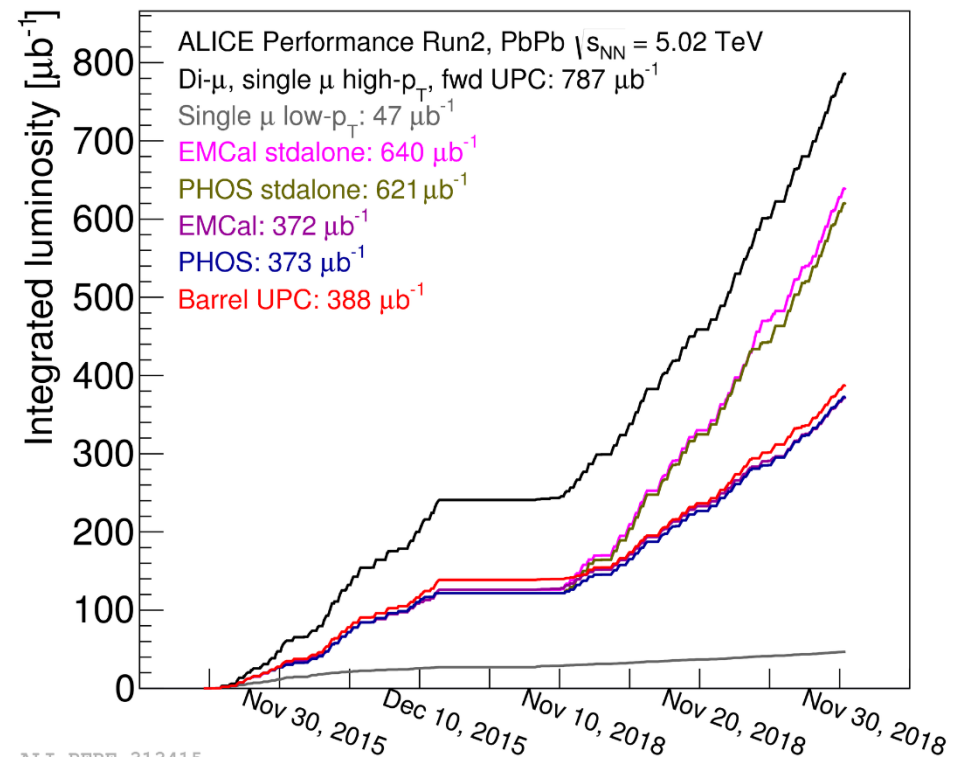
~ 150 M центральных событий

$\sim 400-800$ /ub UPC

и др.

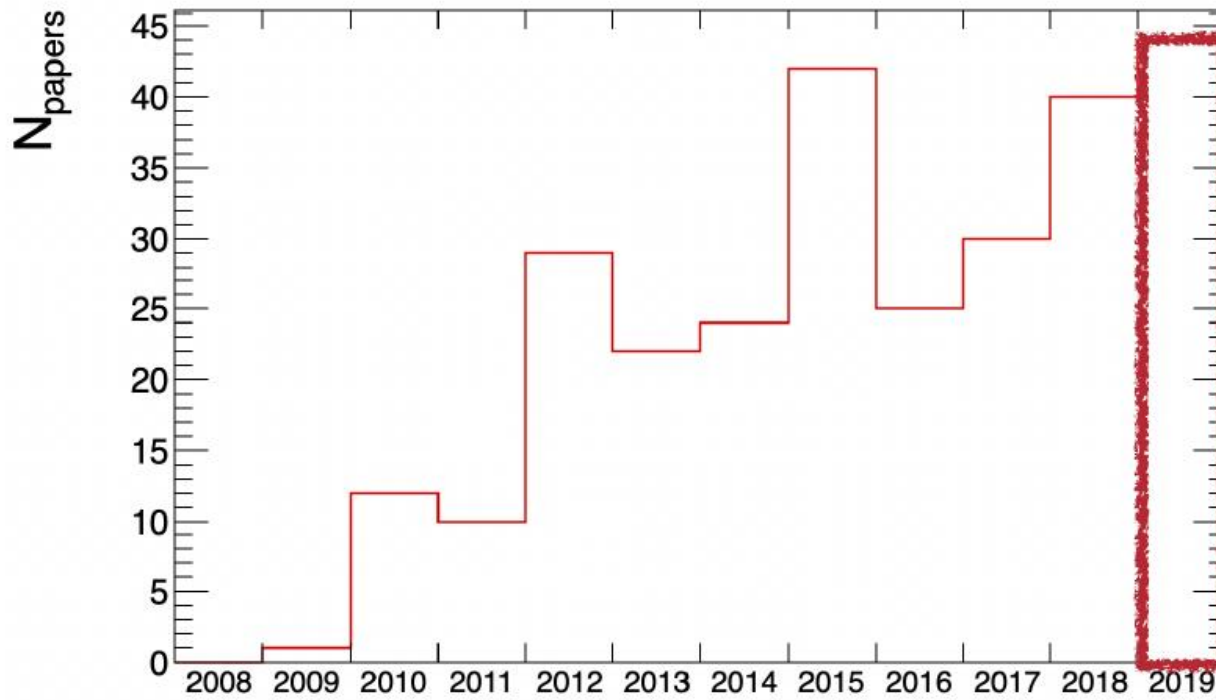


ALI-PERF-313410



ALI-PERF-313415

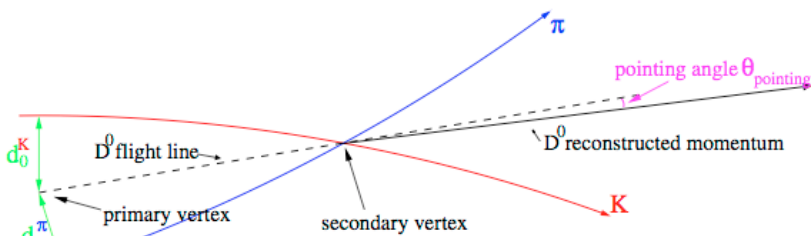
Публикации ALICE в 2019 году



Некоторые избранные результаты:

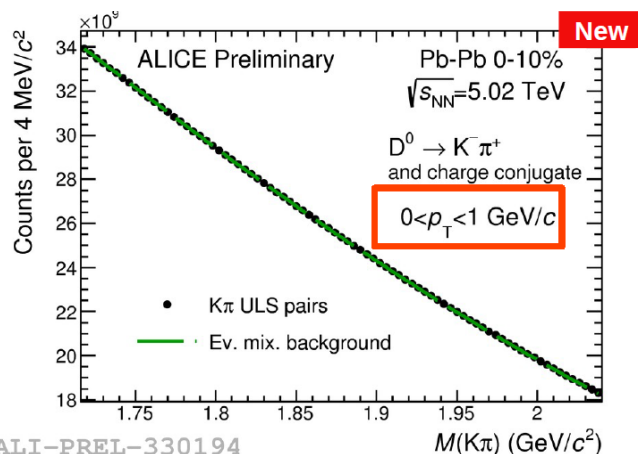
- Подавление очарованных мезонов при малых импульсах
- Измерение жизни гипертритона
- Изучение нуклон-гиперонных взаимодействий
- Новые результаты по физике резонансов
- Новые результаты по ультра-периферическим столкновениям

Спектры очарованных барионов до $p_T = 0$

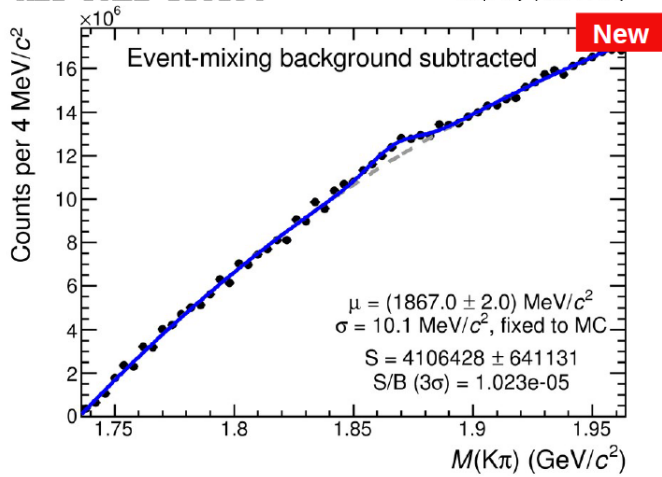


$c\tau \sim 123 \mu\text{m}$

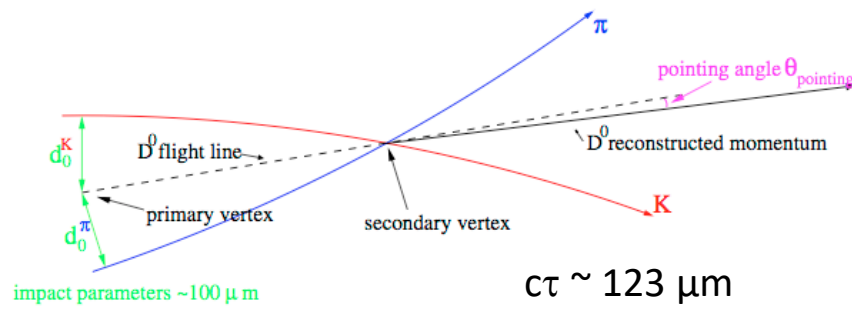
impact parameters $\sim 100 \mu\text{m}$



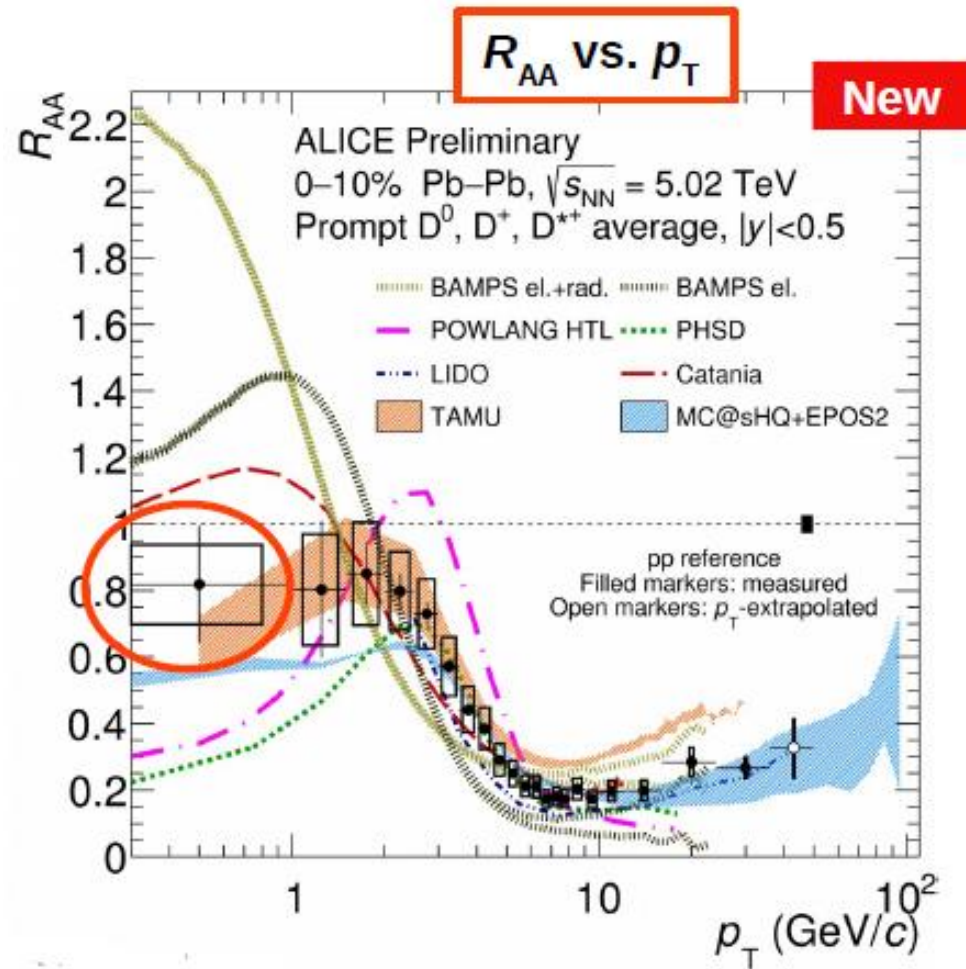
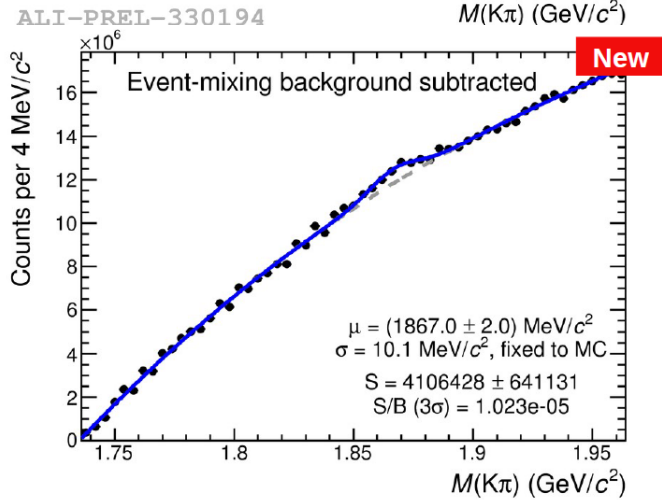
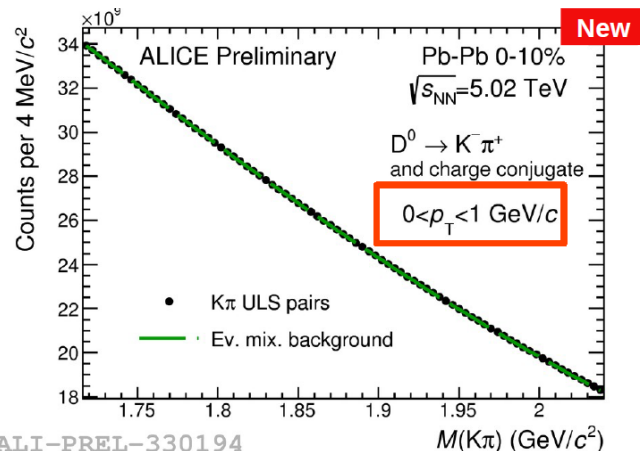
ALI-PREL-330194



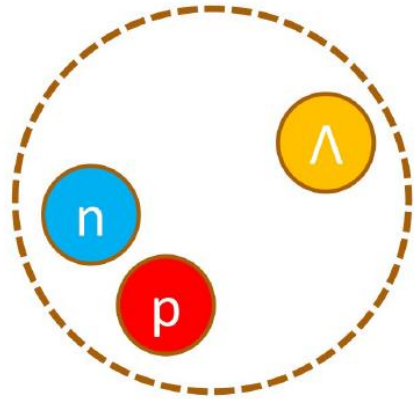
Спектры очарованных барионов до $p_T = 0$



$\sigma\tau \sim 123 \mu\text{m}$



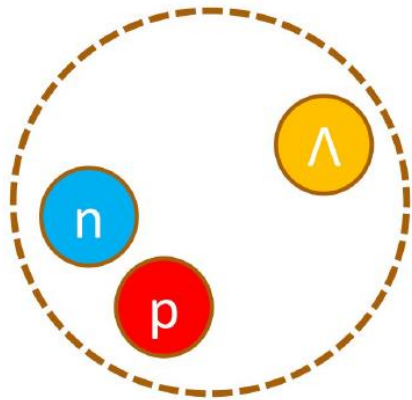
Первое измерение спектра D-мезонов до нулевых p_T !
 → Новые ограничения на модели энергетических потерь кварков в КГП



- Bound state of Λ , p and n
- $m = 2.991 \text{ GeV}/c^2$, $B_\Lambda = 130 \text{ keV}$
→ rms-radius = 10.3 fm

На сколько изменяется время жизни Λ -гиперона в ядре по сравнению со свободным Λ ?

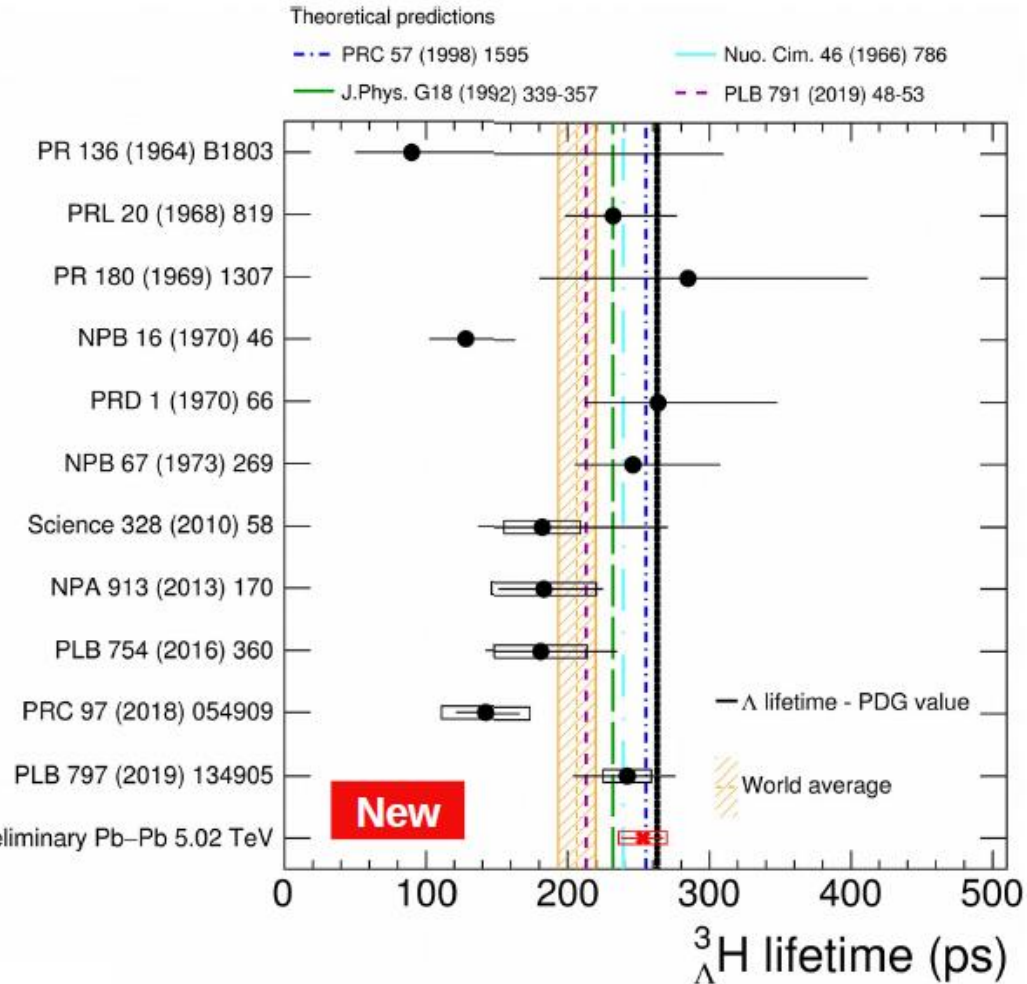
Измерение времени жизни гипертритона



- Bound state of Λ , p and n
- $m = 2.991 \text{ GeV}/c^2$, $B_\Lambda = 130 \text{ keV}$
- \rightarrow rms-radius = 10.3 fm

На сколько изменяется время жизни Λ -гиперона в ядре по сравнению со свободным Λ ?

- Результаты прошлых лет:
- Новые данные (PbPb2018) + машинное обучение



Время жизни Λ -гиперона в ядре не изменяется по сравнению со свободным Λ (в пределах ошибок)

Фемтоскопия в ALICE

Statistical definition

Experimental definition

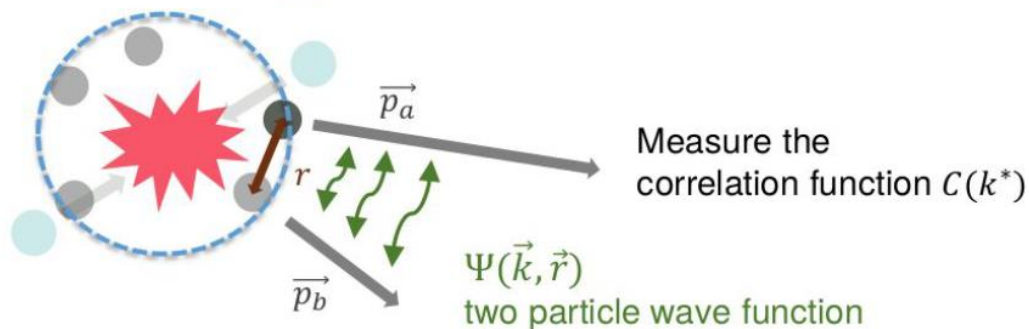
Theoretical definition

$$C(k^*) = \frac{\mathcal{P}(\vec{p}_a, \vec{p}_b)}{\mathcal{P}(\vec{p}_a)\mathcal{P}(\vec{p}_b)} = \mathcal{N} \frac{N_{\text{Same}}(k^*)}{N_{\text{Mixed}}(k^*)} = \int S(\vec{r}) |\Psi(\vec{k}^*, \vec{r})|^2 d^3\vec{r} \xrightarrow{k^* \rightarrow \infty} 1$$

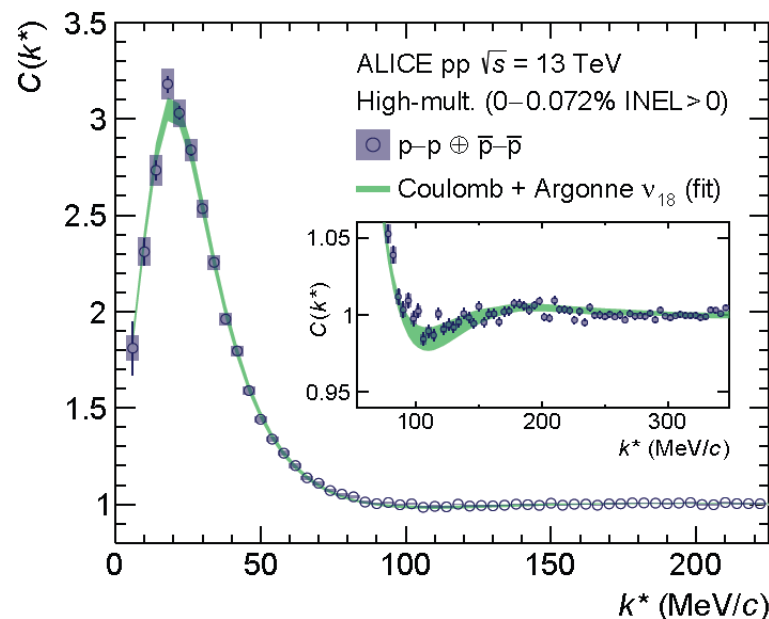
Single-particle momenta

Relative distance / reduced momentum in the rest frame of the pair

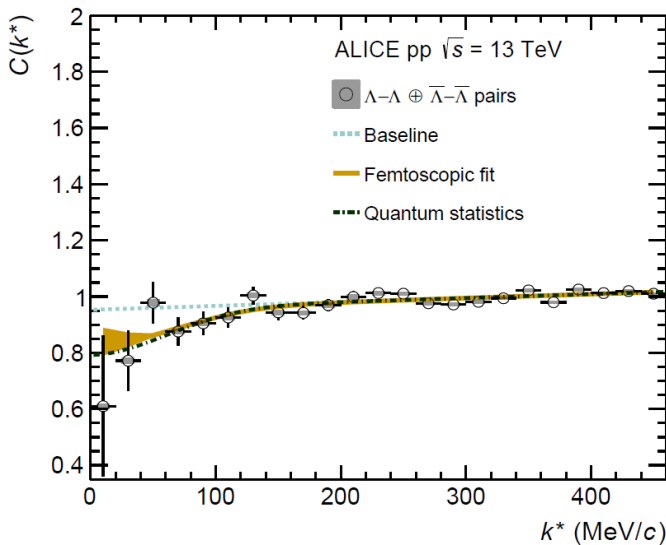
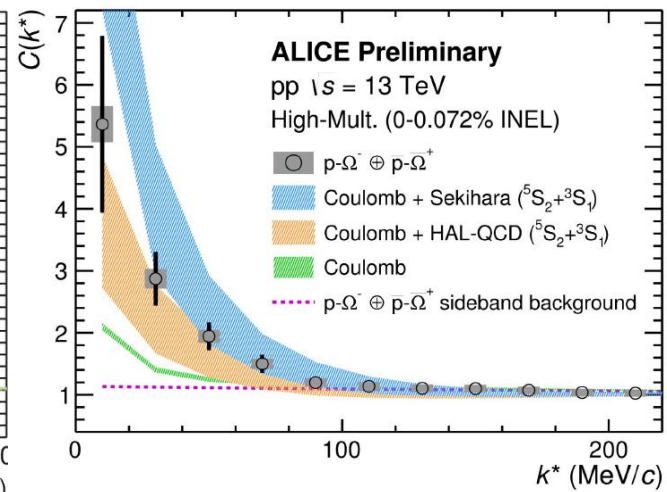
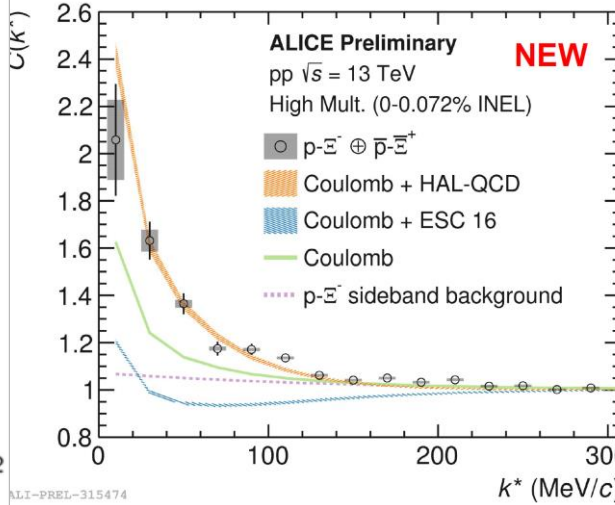
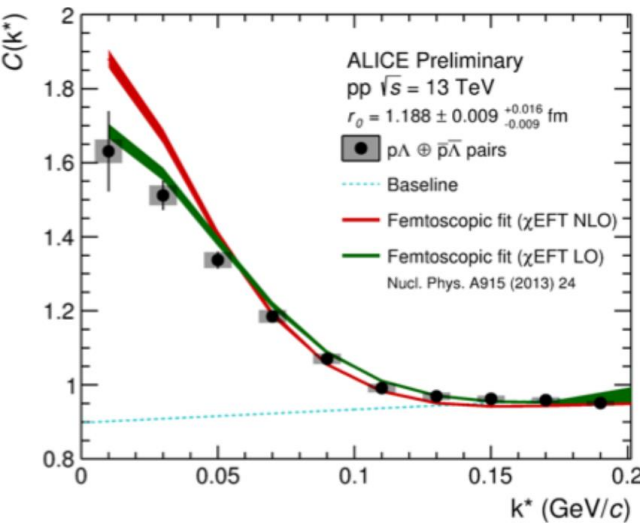
Source function $S(\vec{r})$



- Главное предположение: размер источника одинаков для всех взаимодействующих частиц
- Размер источника можно измерить для хорошо известной системы (например pp-корреляции).



Исследование гиперон-нуклонных взаимодействий



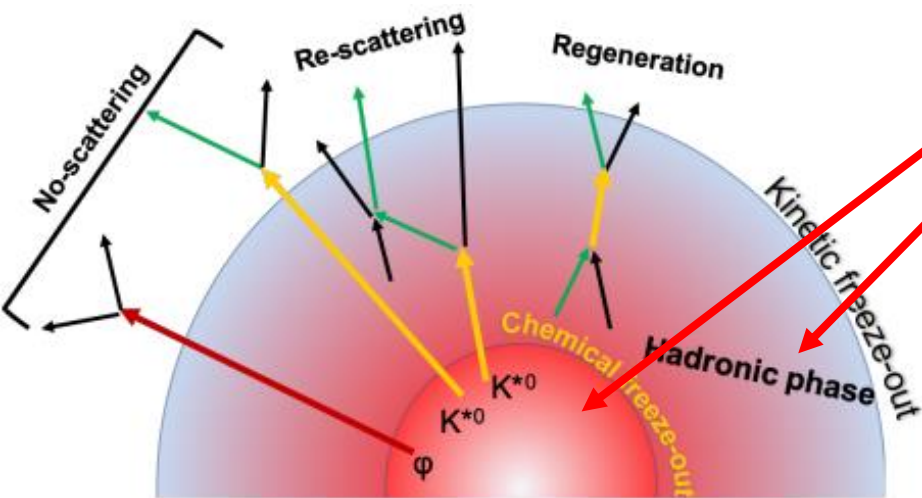
- ALICE: первое измерение потенциала $p\Xi$, $p\Omega$ и $\Lambda\Lambda$ взаимодействий
- Результаты хорошо согласуются с предсказаниями решеточных моделей (HAL-QCD)
- Знание потенциала гиперон-нуклонных и гиперон-гиперонных взаимодействий важно для расчетов уравнения состояния ядерной материи и параметров (масс) нейтронных звезд

Задачи группы ПИЯФ в 2019 году



- Группа ПИЯФ: М. Жалов, В. Гузей, В. Иванов, Е. Крышень, М. Малаев, В. Никулин, Е. Роцин, В. Рябов, Ю. Рябов, В. Самсонов, А. Ханзадеев, Н. Бурмасов
- Участие в обработке данных по **центральной дифракции** в протон-протонных столкновениях и **фоторождению векторных мезонов** в ультра-периферических p-p и Pb-Pb столкновениях, включая:
 - проведение соответствующих теоретических расчетов
 - руководство физической группой PWG-UD: космика, дифракционные и ультра-периферические столкновения
 - координация написания главы по ядерным PDF и эффектам начального состояния в ALICE physics review paper
 - участие в рабочей группе LHC по разработке стратегии изучения физики ультрапериферических и дифракционных столкновений в ране 3 и 4
- Участие в обработке данных по **рождению короткоживущих резонансов**:
 - руководство рабочей группой PWG-LF-Resonances, занимающейся изучением резонансов (В. Рябов)
- Координация рабочей группы по **отбору событий**
- **Участие в ремонте и апгрейде трековых камер** мюонного спектрометра
- Участие в сборке и монтаже **вершинного трекера мюонного плеча**
 - → доклад В. Никулина завтра, 26 декабря

Резонансы: хронометры адронной фазы

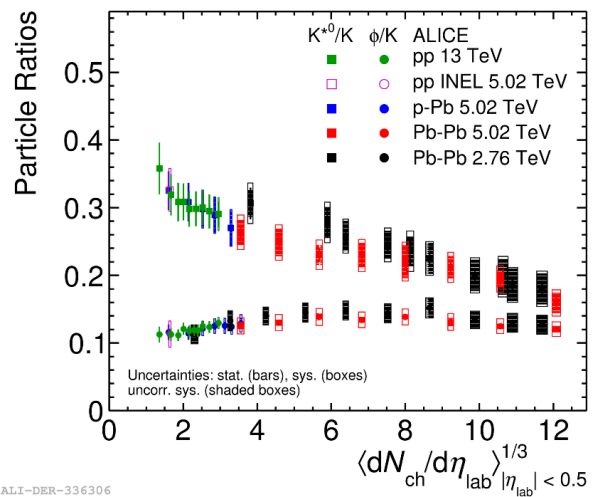


Две фазы ядро-ядерных столкновений:

- Кварк-глюонная плазма
- Адронный газ

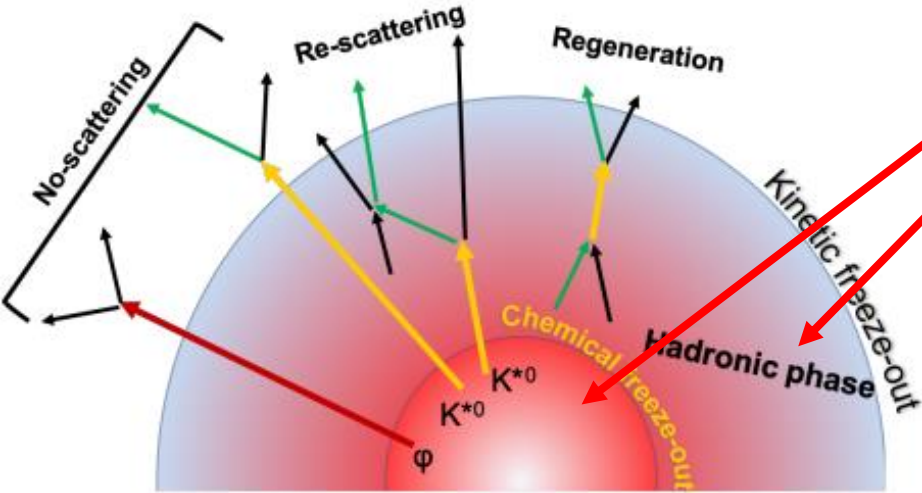
Время жизни резонансов сравнимо с типичным временем эволюции ядро-ядерных столкновений (~10 fm/c). Изучение резонансов позволяет судить о времени существования адронной фазы.

Lifetime [fm/c] : ρ [1.3] < K^* [4.2] < Λ^* [12.6] < Ξ^{0*} [21.7] < ϕ [46.2]



ALI-DER-336306

Резонансы: хронометры адронной фазы



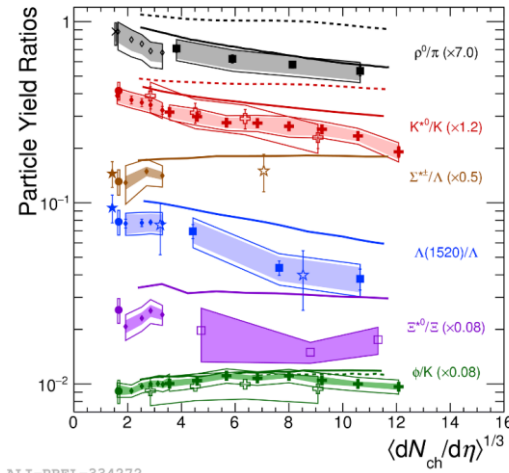
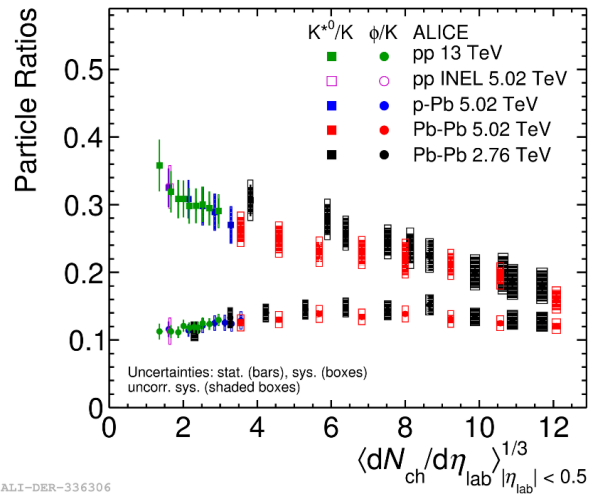
Две фазы ядро-ядерных столкновений:

- Кварк-глюонная плазма
- Адронный газ

Время жизни резонансов сравнимо с типичным временем эволюции ядро-ядерных столкновений (~ 10 fm/c).

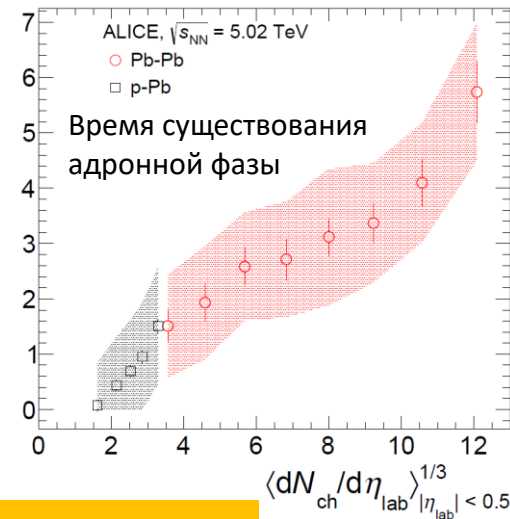
Изучение резонансов позволяет судить о времени существования адронной фазы.

Lifetime [fm/c] : ρ [1.3] < K^* [4.2] < Λ^* [12.6] < Ξ^{0*} [21.7] < ϕ [46.2]



ALICE Preliminary
 ♦ p-Pb $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV
 □ Pb-Pb $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV
 ⊕ Xe-Xe $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV
ALICE
 × pp $\sqrt{s} = 2.76$ TeV
 ● pp $\sqrt{s} = 7$ TeV
 • p-Pb $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV
 ■ Pb-Pb $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV
 ⊕ Pb-Pb $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV
STAR
 ★ pp $\sqrt{s} = 200$ GeV
 ☆ Au-Au $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV
 — EPOS3
 - - EPOS3 (UrQMD OFF)

τ (fm/c)



Время существования адронной фазы

ALI-DER-336306

ALI-PREL-334272

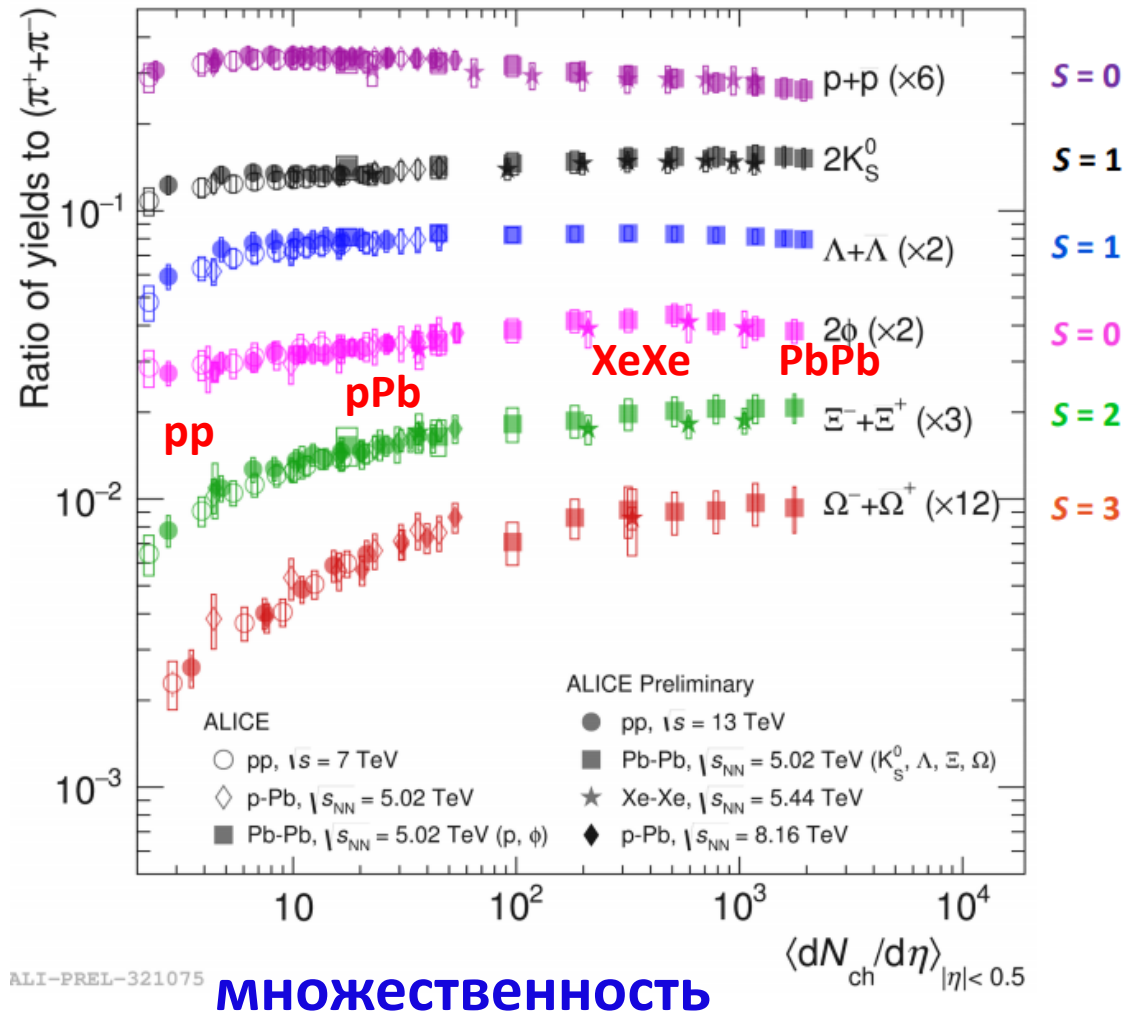
Систематическое измерение выходов резонансов

-> время жизни адронной фазы в центральных PbPb столкновениях $\sim 4-7$ фм/с

Выходы адронов



- Плавное изменение отношений выходов, не зависящее от энергии и типа сталкивающихся частиц
- $\rho/\pi \sim$ константа
- $\Lambda, \Xi, \Omega/\pi$ – рост выхода странности
- ϕ/π ($s\bar{s}$) растет с ростом множественности в pp и pPb:
 - Модель канонического подавления странности предсказывает константу для ϕ/π
 - ϕ/K и ϕ/Ξ слабо зависят от множественности



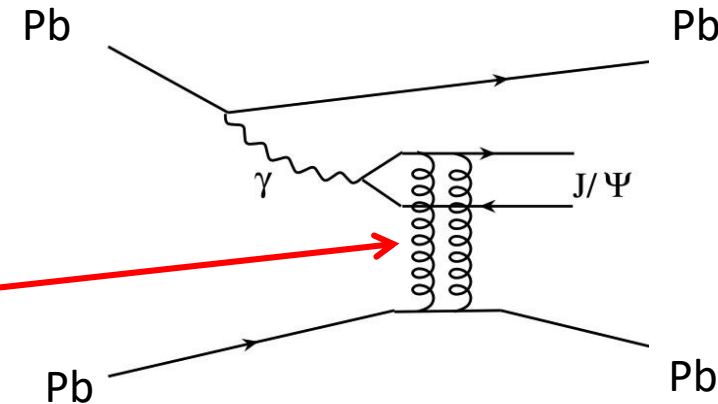
ϕ ведет себя как адрон с эффективной странностью 1-2

Фоторождение J/ψ в Pb-Pb UPC



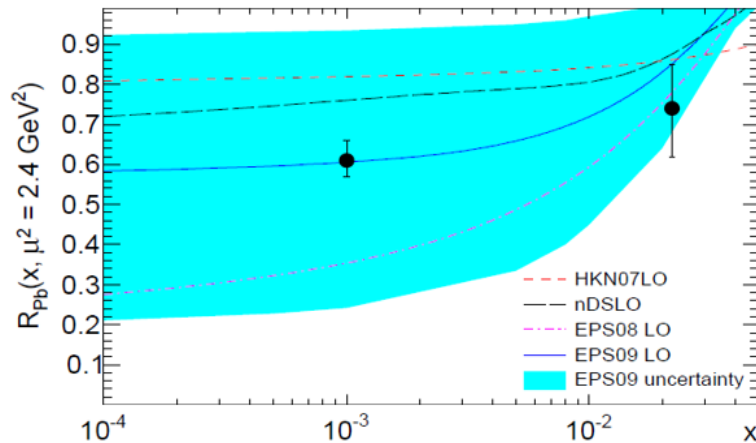
Сечение когерентного фоторождения J/ψ пропорционально квадрату глюонной плотности в ядрах:

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

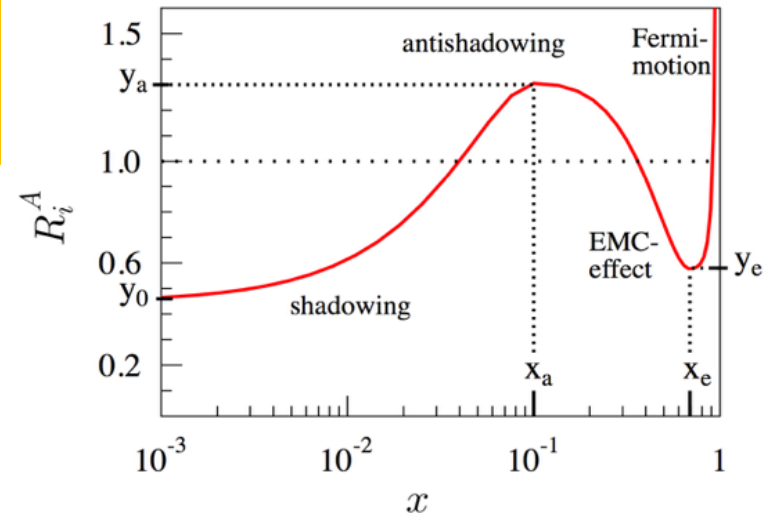


Сечение фоторождения J/ψ в ультра-периферических столкновениях чувствительно к ядерным глюонным экранировкам при малых x

Результаты рана 1:



Guzei, EK, Strikman, Zhilov. PLB 726 (2013) 290



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

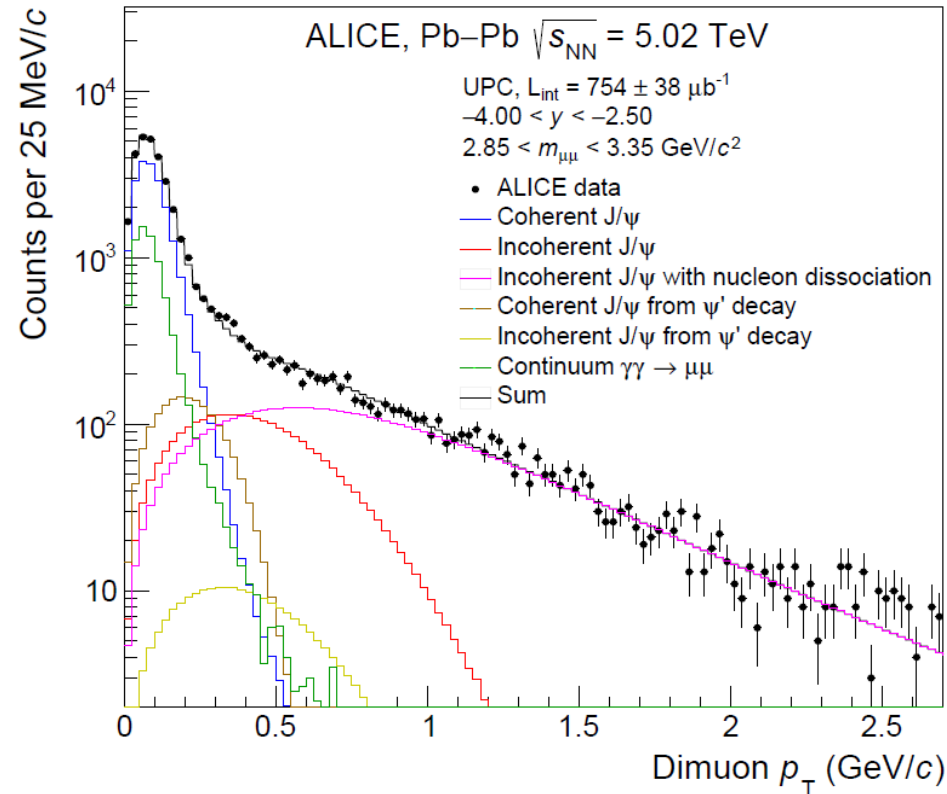
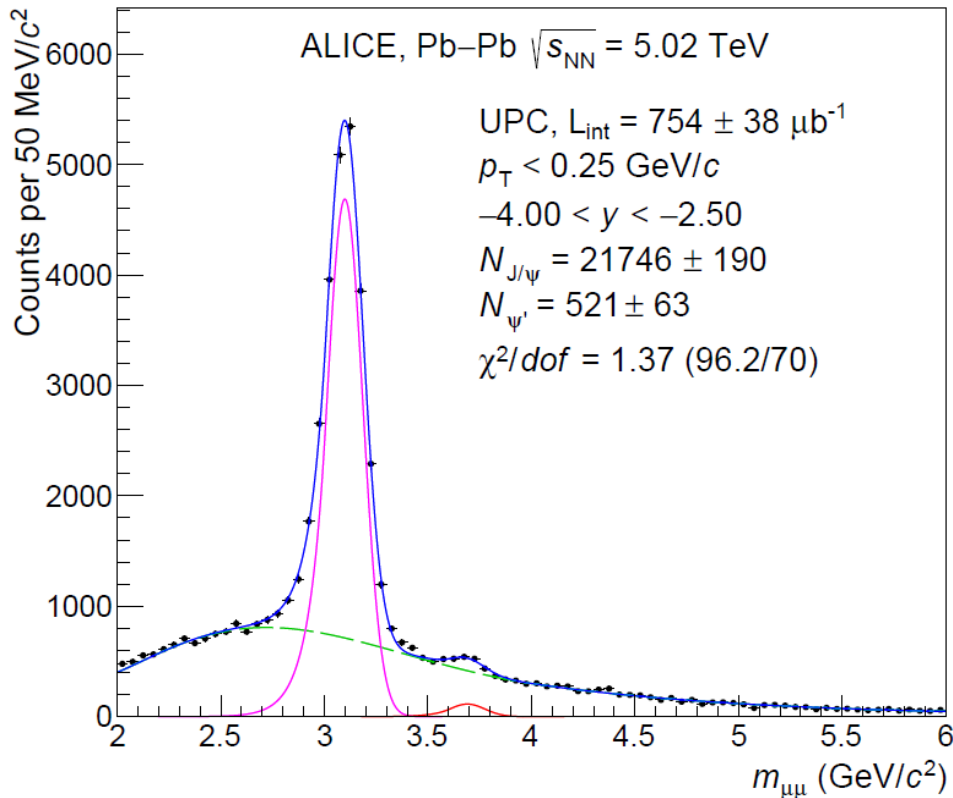
Invariant mass and pt distributions



ALICE

Увеличение статистики в ~200 раз по сравнению с Run 1

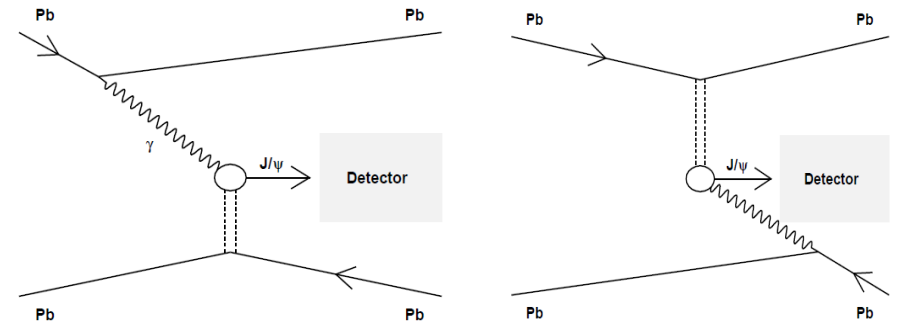
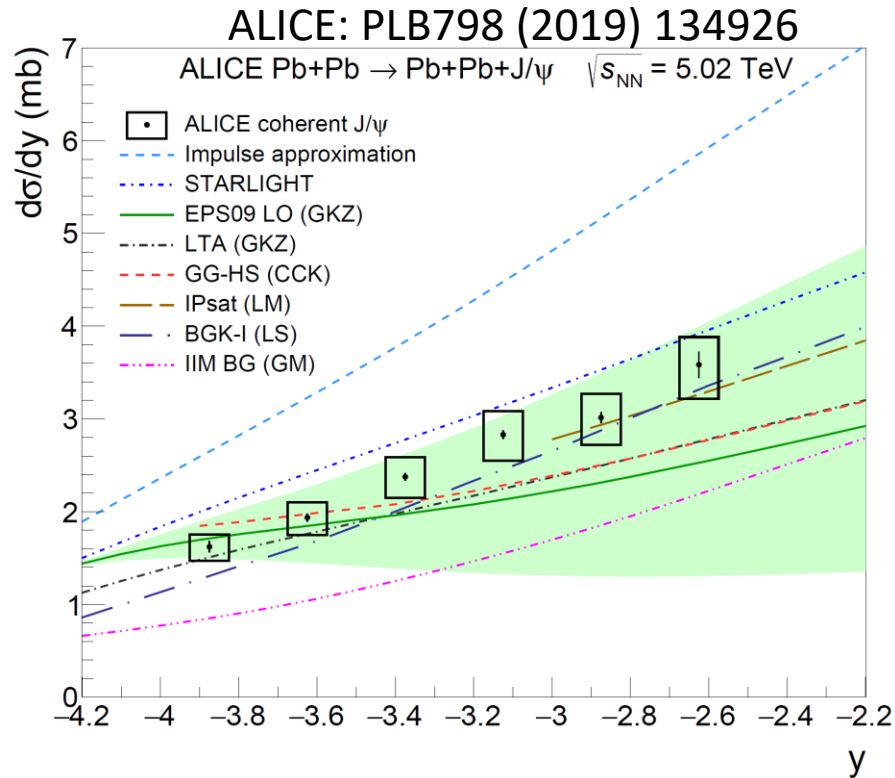
ALICE: PLB798 (2019) 134926



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

Coherent ψ' -to- J/ψ cross section ratio consistent with the ratio measured in photoproduction off protons

Coherent J/ψ cross section



$$\sigma(y) = n(+y)\sigma_{\gamma\text{Pb}}(+y) + n(-y)\sigma_{\gamma\text{Pb}}(-y)$$

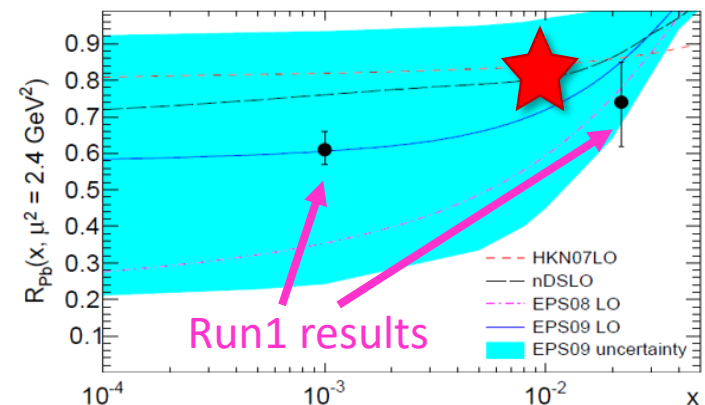
high-energy photons low-x gluons ($x \sim 10^{-5}$) low energy photons high-x gluons ($x \sim 10^{-2}$)

5-40% 60-95%

Dominant (60-95%) contribution of high-x gluons

Back-of-the-envelope calculation (neglect low-x):
ALICE/Impulse approximation ~ 0.6

=> gluon shadowing factor $\sim \sqrt{0.6} \sim 0.8$



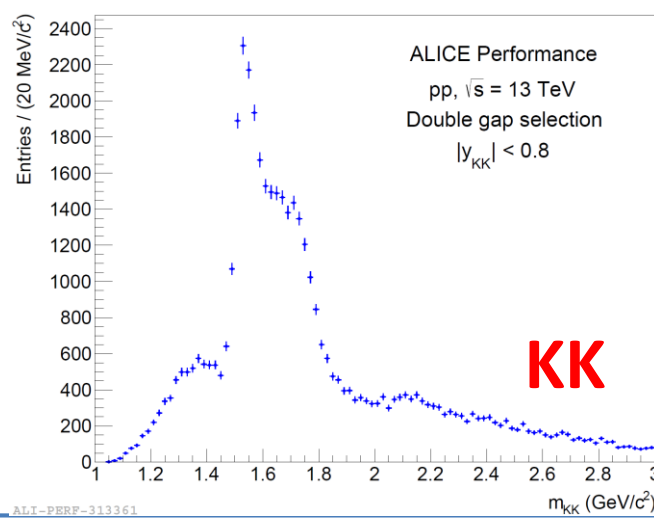
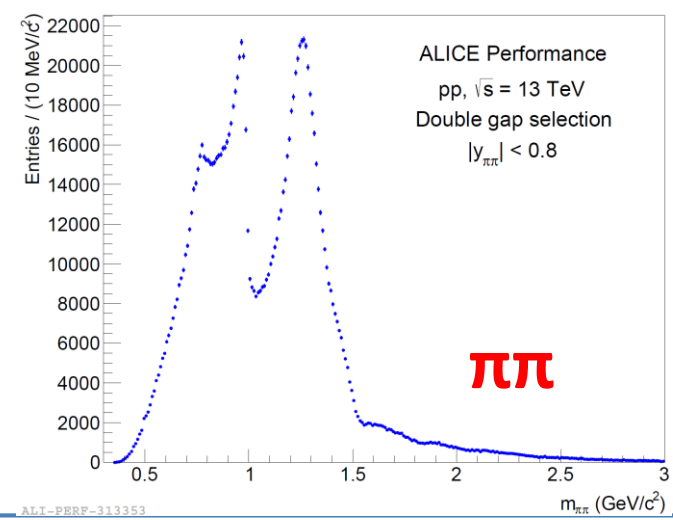
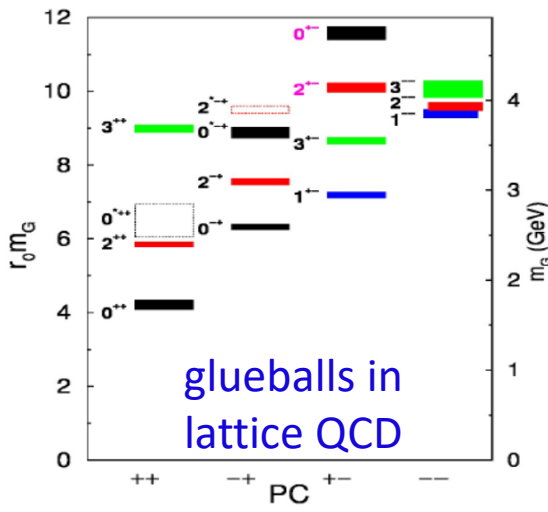
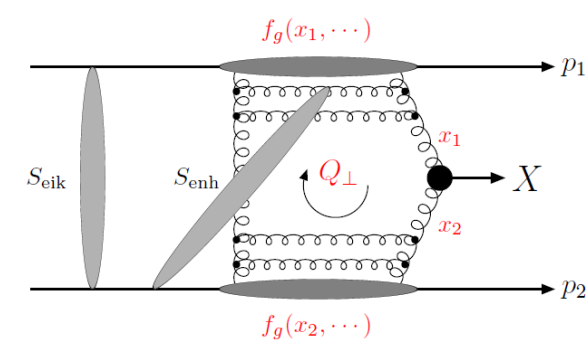
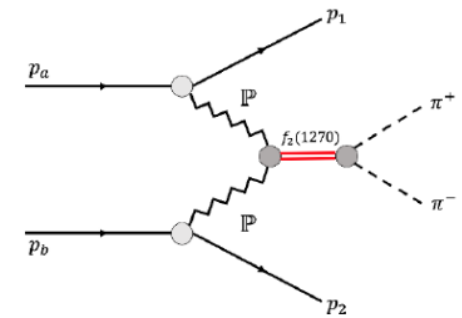
Run1 results

Первая статья, опубликованная по данным 2018 года

Центральная дифракция в pp



- pp2017-2018: набрано 10 /pb центральных дифракционных событий (специальный триггер на события с двумя гэпами по быстроте)
- Цели:
 - Парциально-волновой анализ $\pi\pi$, KK, pp, $2\pi 2K$, 4π событий и прецизионная спектроскопия 0^{++} и 2^{++} резонансов
 - Поиск глюболов: $f_0(1500)$, $f_0(1710)$ и т.д.
 - Определение мезон-померонных форм-факторов и эффективного спина померона
 - Изучение CEP в пертурбативном режиме при $M > 2$ ГэВ/c² (gap survival, рождение χ_c)
- Перспективы в ране 3: 200 /pb в режиме непрерывного считывания
- P. Azzi, ..., E. Kryshen et al. *Yellow report from WG1: Standard Model Physics at the HL-LHC and HE-LHC*. arXiv:1902.01211

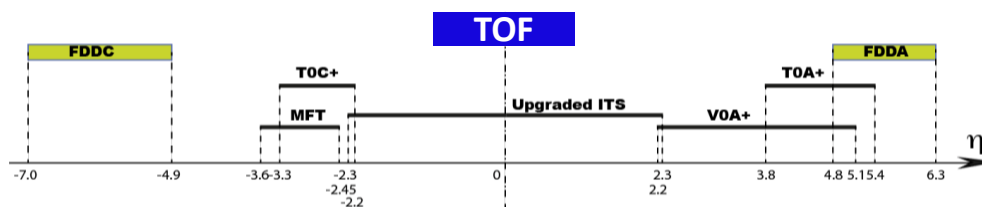


Подготовка к рану 3



Typical running conditions:

- Interaction rate in pp: 1MHz
- Pileup: ~4%

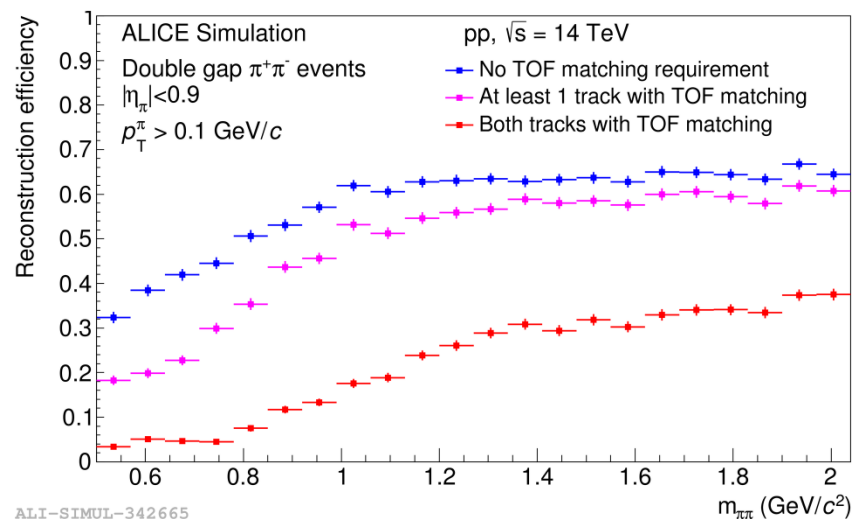
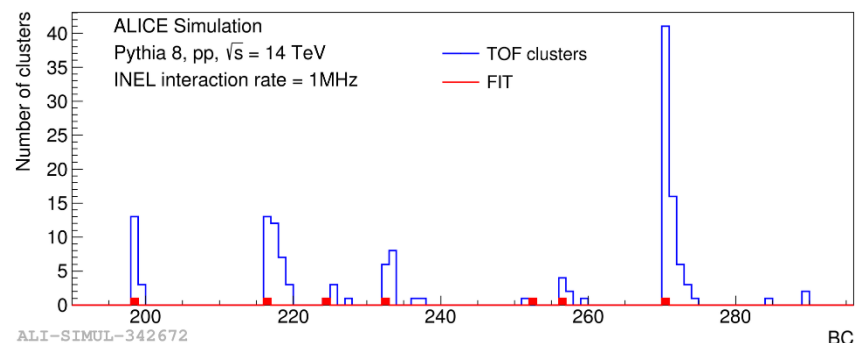


- Задача: разработка системы отбора центральных дифракционных событий в режиме непрерывного считывания

- Рассматриваются варианты:

1. Быстрый отбор и **реконструкция только части «интересных» временных интервалов** (Heart-Beat frames ~1 orbit)
2. Синхронная (HLT) или асинхронная (offline) **реконструкция всех данных** и последующий выбор интересных событий

- Показано, что использование только TOF+FIT информации не позволяет произвести эффективный отбор временных интервалов – нужна полная реконструкция (HLT или offline)
- Ожидаемая **скорость записи** дифракционных событий ~ 100 Hz



Результаты доложены на 3х внутренних совещаниях и на LHC forward physics WG meeting

- V. Riabov for the ALICE collaboration. [Overview of light flavor hadron production in ALICE at the LHC](#). 19th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics; 22-28 Aug 2019, Moscow, Russia. http://lomcon.ru/?page_id=204
- V. Riabov for the ALICE collaboration. [Overview of soft physics results from ALICE](#). QFTHEP'2019 XXIV International Workshop on High Energy Physics and Quantum Field Theory, 22-29 Sep 2019, Sochi, Russia; http://qfthep.sinp.msu.ru/talks2019/1569220314_VRiabov_QFTHEP.pdf
- E. Kryshen. [Shedding light on hadron structure with ultra-peripheral collisions](#). EMMI NQM Seminar. (Darmstadt, Germany, 7 February 2019).
- E. Kryshen for the ALICE collaboration. [Recent ALICE results on coherent J/psi photoproduction in ultra-peripheral Pb-Pb collisions](#). XXVII International Workshop on Deep Inelastic Scattering and Related Subjects (Torino, Italy, 10 April 2019). Proceedings: PoS (DIS2019) 056.
- E. Kryshen for the ALICE collaboration. [Shedding light on hadron structure with ultra-peripheral collisions in ALICE](#). CERN LHC Seminar (Geneva, Switzerland, 18 June 2019).
- E. Kryshen. [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). Proceedings: Acta Physica Polonica B50 (2019) 1095
- V. Guzey. [A summary on theory for cold QCD effects in eA and pA collisions; MCEGs for future ep and eA facilities](#), 20 November 2019, Erwin Schrödinger Institut, Вена, Австрия. <https://indico.cern.ch/event/845653/>
- >20 докладов на внутренних совещаниях

- 45 коллаборационных публикаций, включая:
 - ALICE Collaboration. *Production of the $\rho^0(770)$ meson in pp and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV*. PRC99 (2019), 064901
 - ALICE Collaboration. *Suppression of $\Lambda(1520)$ resonance production in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV*. PRC99 (2019) 024905.
 - ALICE Collaboration. *Energy dependence of exclusive J/ψ photoproduction off protons in ultra-peripheral p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV*. EPJC79 (2019), 402
 - 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
- P. Azzi, ..., E. Kryshen et al. *Yellow report from WG1: Standard Model Physics at the HL-LHC and HE-LHC*. arXiv:1902.04070
- D. Adamova, ..., A. Khanzadeev, E. Kryshen, V. Nikulin, V. Riabov, V. Samsonov et al., *A next-generation LHC heavy-ion experiment*. arXiv:1902.01211
- V. Guzey, M. Klasen, *Inclusive dijet photoproduction in ultraperipheral heavy-ion collisions at the CERN LHC in next-to-leading order QCD*, Phys. Rev. C 99 (2019) 065202
- V. Guzey, M. Klasen, *Constraints on nuclear parton distributions from dijet photoproduction at the LHC*, Eur. Phys. J. C (2019) 79:396
- В. Иванов, В. Н. Никулин, Е. В. Рощин, В. М. Самсонов, А. В. Ханзадеев. *Детекторная электроника мюонного спектрометра ALICE*. ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2019, №6, стр. 24-38



Спасибо за внимание!



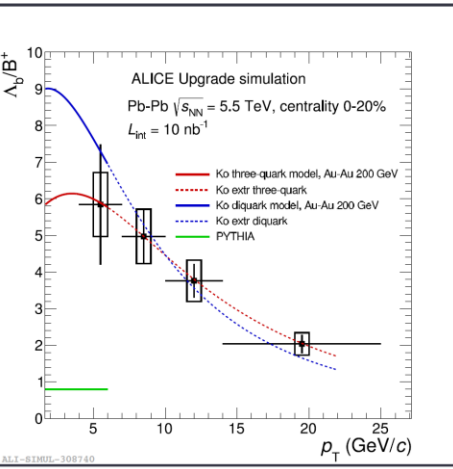
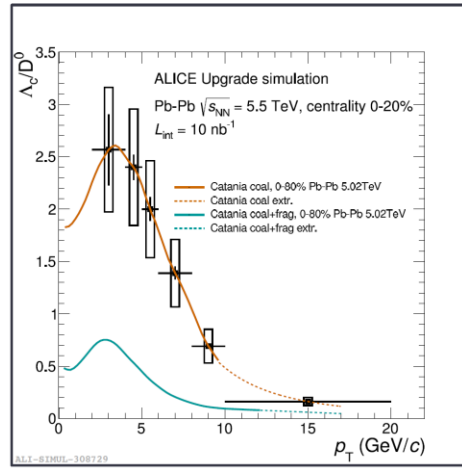
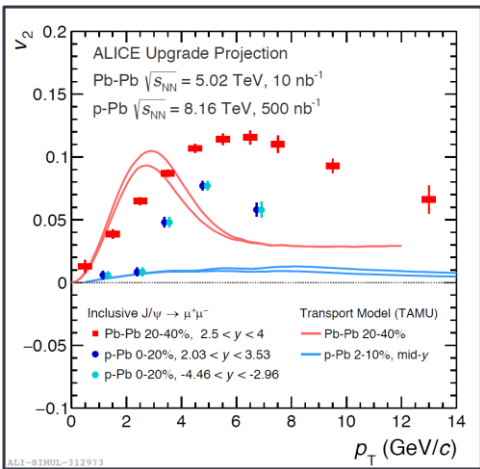
Планы на Run 3-4



Run3: $\mathcal{L}^{Pb-Pb}_{integrated} = 6.0 \text{ nb}^{-1}$

Run4: $\mathcal{L}^{Pb-Pb}_{integrated} = 7.0 \text{ nb}^{-1}$

- Pb-Pb @ 5.5 TeV: 13/nb
- Reference pp @ 5.5 TeV: 6/pb
- pp @ 14 TeV: 200/pb
- p-Pb @ 8.8 TeV: 1/pb

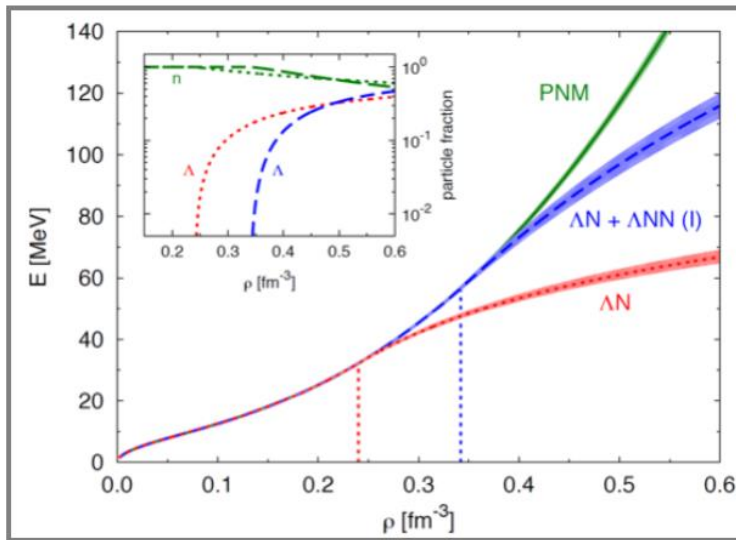


0⁺⁺ и 2⁺⁺ резонансы в PDG

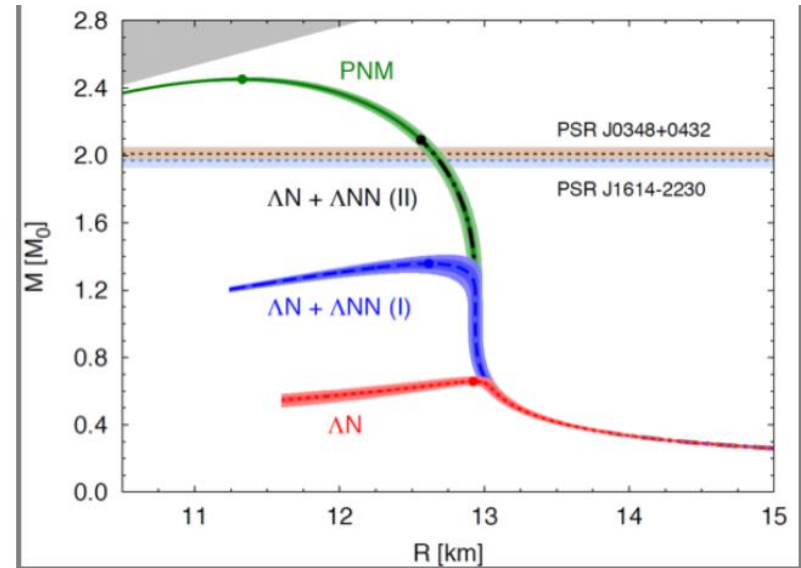


Name	M(MeV)	Γ (MeV)	$I^G J^{PC}$	$\pi\pi$	$K\bar{K}$	Other modes
$f_0(500)/\sigma$	400-550	400-700	0 ⁺ 0 ⁺⁺	~100	-	-
$f_0(980)$	990±20	10-100	0 ⁺ 0 ⁺⁺	dominant	seen	$\gamma\gamma$ seen
$f_2(1270)$	1275.5±0.8	186.7 ^{+2.2} _{-2.5} 3	0 ⁺ 2 ⁺⁺	84.2 ^{+2.9} _{-0.9}	4.6 ^{+0.5} _{-0.4}	4 π ~ 10%
$f_0(1370)$	1200-1500	200-500	0 ⁺ 0 ⁺⁺	seen	seen	$\rho\rho$ dominant
$f_0(1500)$	1504±6	109±7	0 ⁺ 0 ⁺⁺	34.9±2.3	8.6±1.0	4 π 49.5±3.3
$f'_2(1525)$	1525±5	73 ⁺⁶ ₋₅	0 ⁺ 2 ⁺⁺	0.8±0.2	88.7±2.2	$\eta\eta$ 10.4±2.2
$f_0(1710)$	1723 ⁺⁶ ₋₅	139±8	0 ⁺ 0 ⁺⁺	seen	seen	$\eta\eta$ seen
$f_2(1950)$	1944±12	472±18	0 ⁺ 2 ⁺⁺	seen	seen	$\eta\eta$ seen
$f_2(2010)$	2011 ⁺⁶⁰ ₋₈₀	202±60	0 ⁺ 2 ⁺⁺	-	seen	$\phi\phi$ seen
$f_4(2050)$	2018±11	237±18	0 ⁺ 4 ⁺⁺	17%	~0.7%	$\eta\eta$ 0.2%
$f_2(2300)$	2297±28	149±40	0 ⁺ 2 ⁺⁺	-	seen	$\phi\phi$ seen
$f_2(2340)$	2345 ⁺⁵⁰ ₋₄₀	322 ⁺⁷⁰ ₋₆₀	0 ⁺ 2 ⁺⁺	-	-	$\phi\phi, \eta\eta$ seen

EOS ядерной материи и нейтронные звезды



TOV



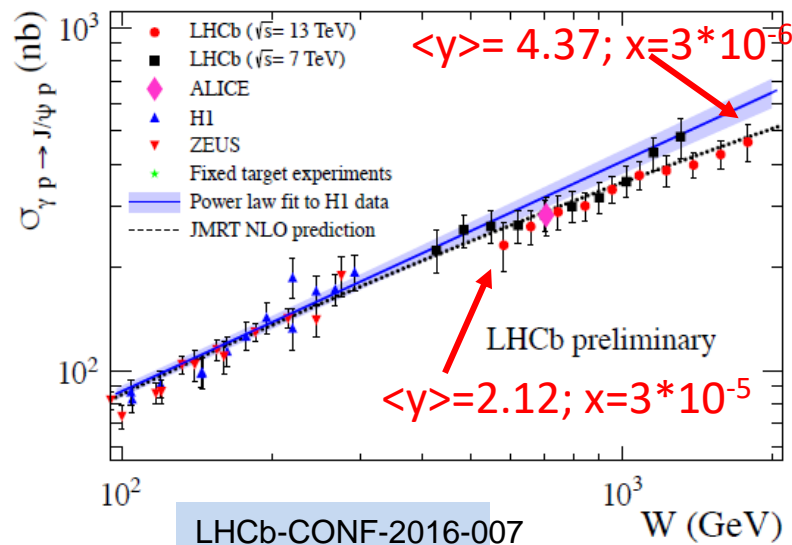
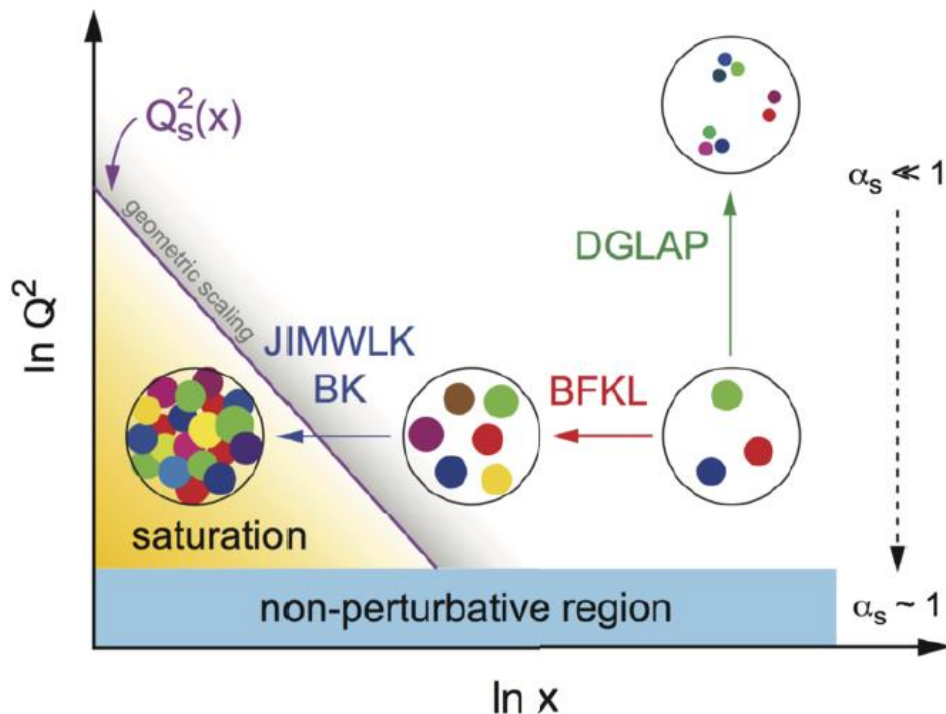
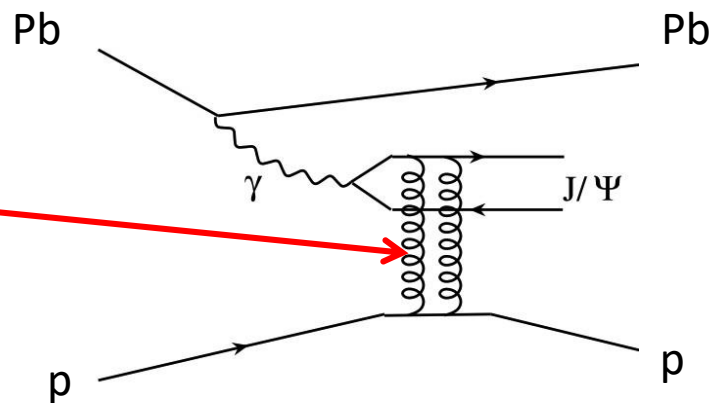
Фоторождение J/ψ в p-Pb UPC



LO QCD: сечение фоторождения J/ψ пропорционально квадрату глюонной плотности:

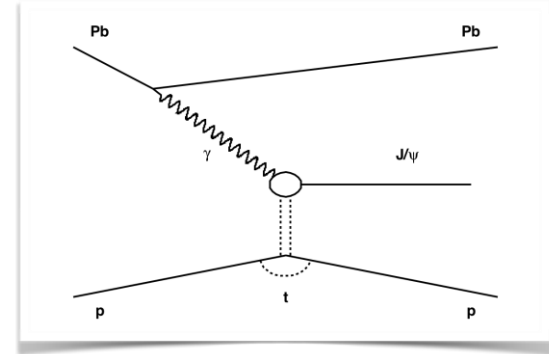
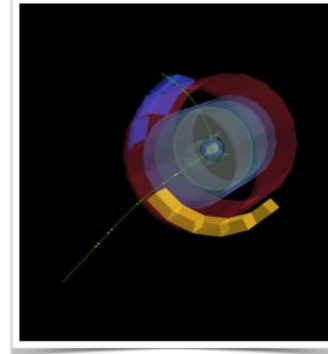
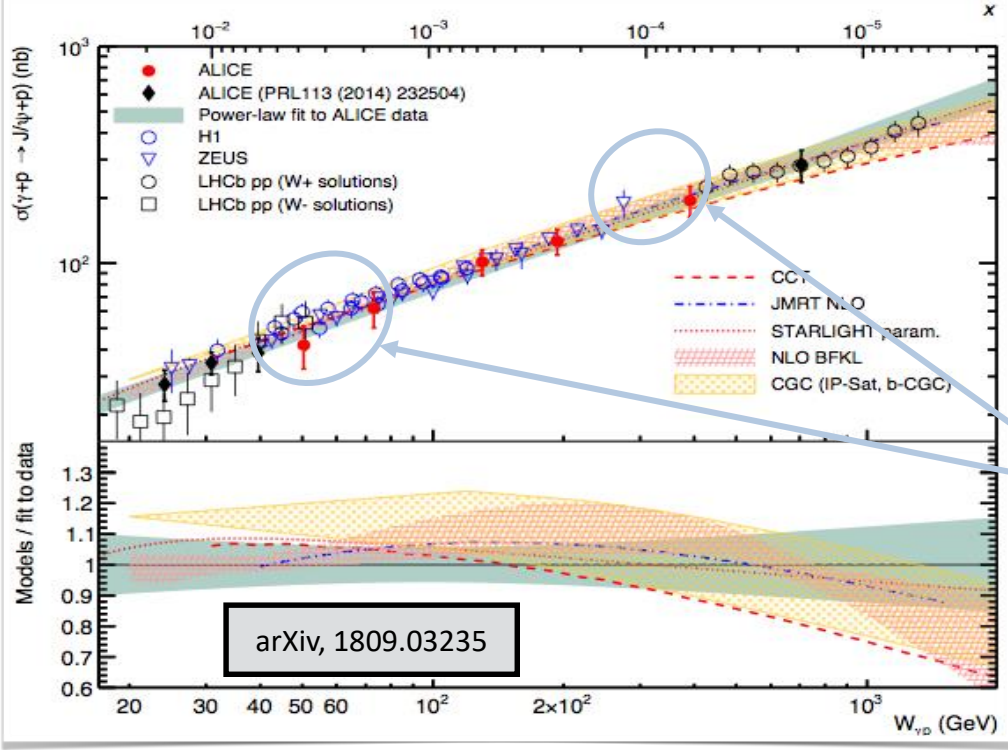
$$\left. \frac{d\sigma_{\gamma A \rightarrow J/\psi A}}{dt} \right|_{t=0} = \frac{M_{J/\psi}^3 \Gamma_{ee} \pi^3 \alpha_s^2(Q^2)}{48 \alpha_{em} Q^8} [xg_A(x, Q^2)]^2$$

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

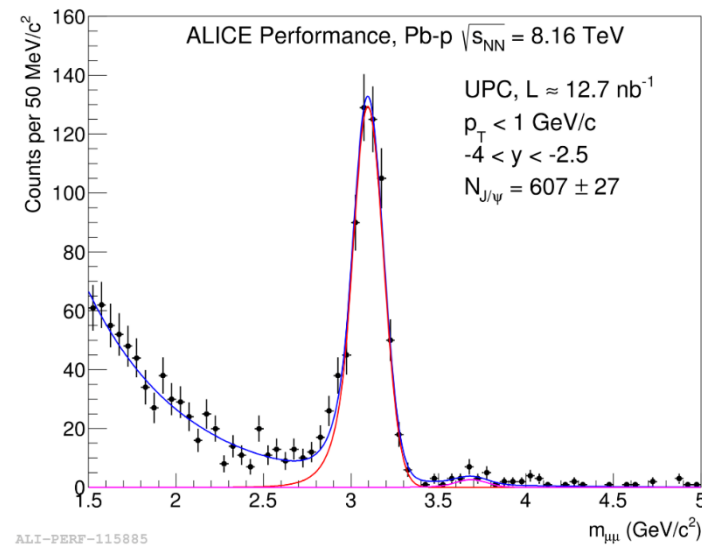


LHCb-CONF-2016-007

Эксклюзивное фоторождение J/ψ в p-Pb @ 5.02 ТэВ



Измерения димюонных распадов в J/ψ в новой топологии: один мюон в мюонном плече (триггер), второй – в центральном барреле => покрытие полуцентральной области быстрот ($1.2 < |y| < 2.7$)



- Непрерывное покрытие $20 < W_{\gamma p} < 700$ ГэВ (с данными при 8.16 TeV: $20 < W_{\gamma p} < 1400$ GeV!)
- Эффекты насыщения глюонной плотности пока не видны
- В ране 3-4 ожидается увеличение статистики на два порядка (arXiv:1812.06772)