



Измерение нейтральных мезонов и прямых фотонов в эксперименте ALICE на БАК



Дмитрий Аверьянов для коллаборации ALICE

НИЦ “Курчатовский институт”, Россия

**Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,
посвященная 70-летию В.А. Рубакова**

Москва, 17-21 февраля, 2025

Эксперимент ALICE

Электромагнитный калориметр (EMCal) + DCal

- Pb-сцинтилляционный «смпл»-калориметр
- Размер ячеек – $6 \times 6 \text{ см}^2$
- $|\eta| < 0.7, 80^\circ < \varphi < 187^\circ$ (большой акцептанс)

Метод фотонной конверсии (PCM)

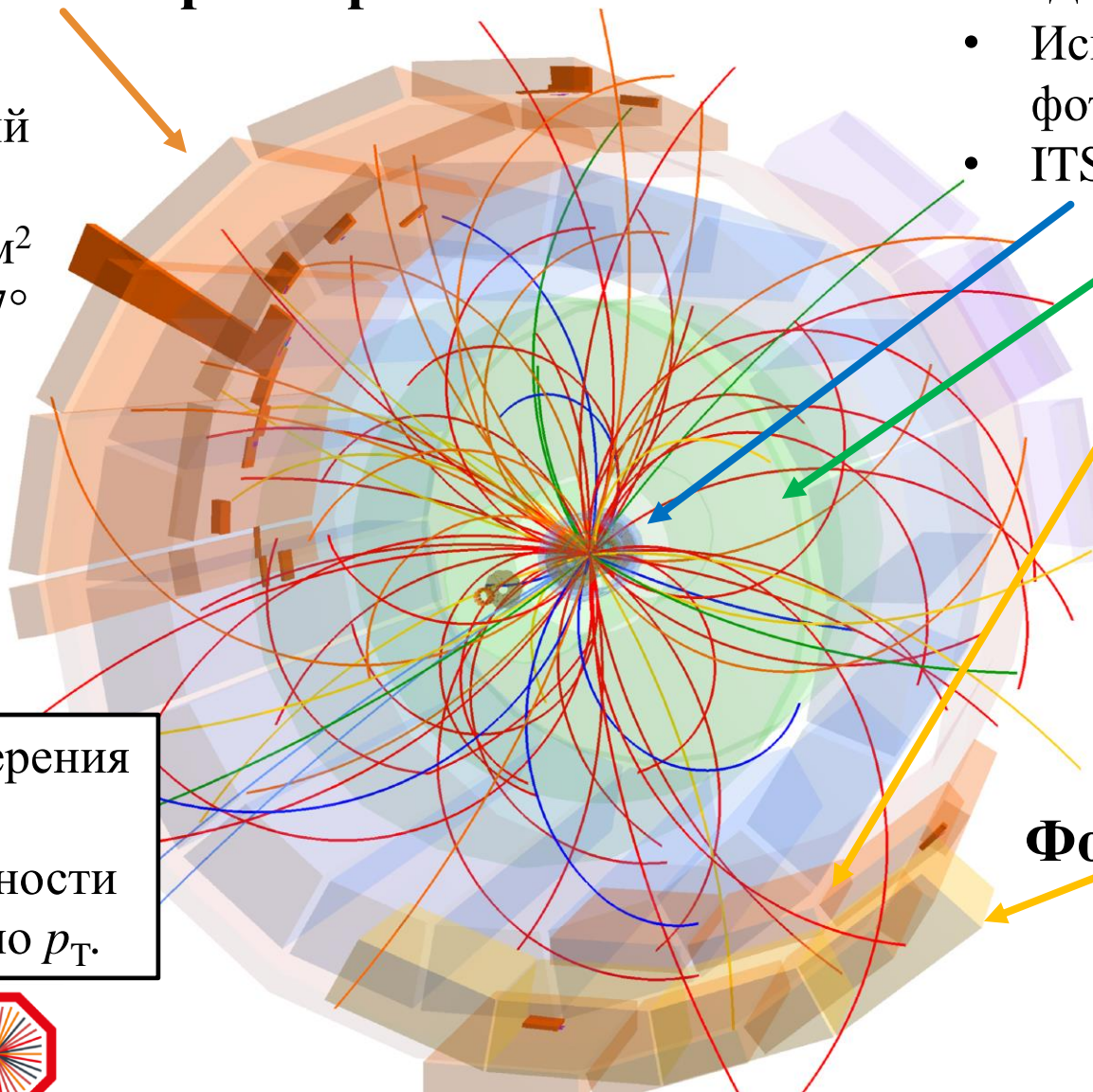
- Используется вероятность конверсии фотона ($\sim 8\%$) в материале детекторов
- ITS + TPC: $|\eta| < 0.9, 0^\circ < \varphi < 360^\circ$

Вето-детектор заряженных частиц (CPV)

- Используется для идентификации фотонов
- 2 дополнительных CPV модуля были установлены перед Run 3

Фотонный спектрометр PHOS

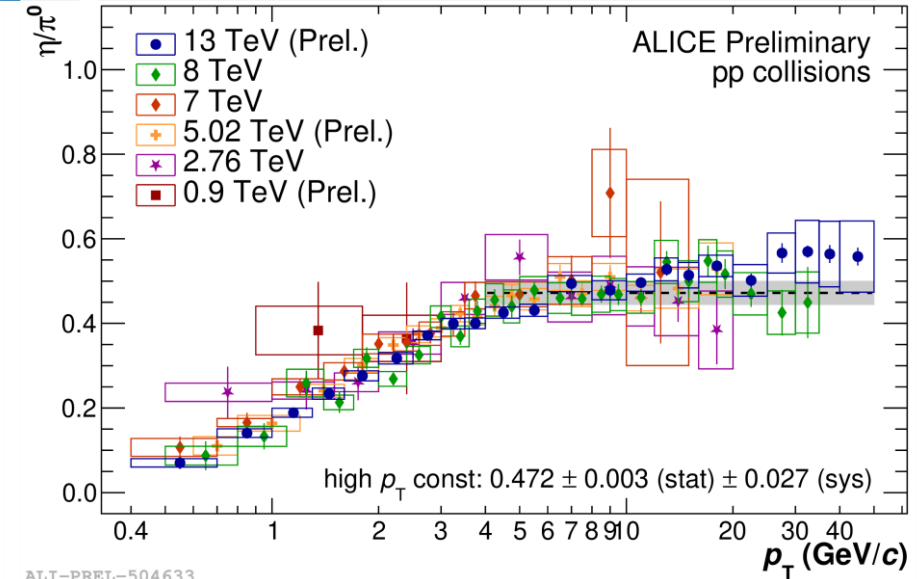
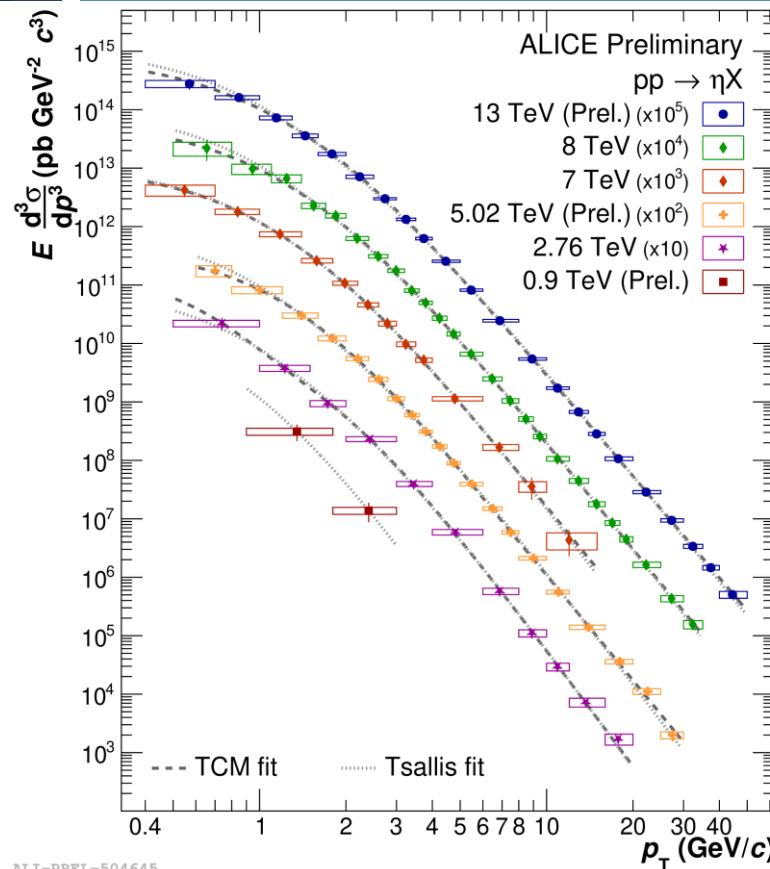
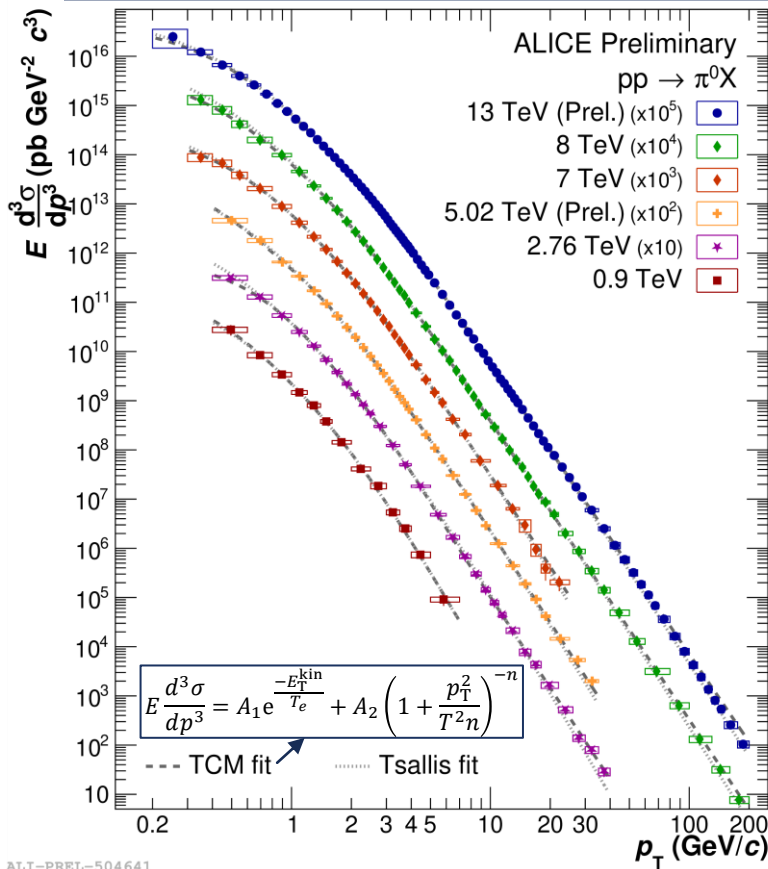
- Кристаллы PbWO_4
- Высокая гранулярность ($2.2 \times 2.2 \text{ см}^2$ cell size)
- $|\eta| < 0.12, 260^\circ < \varphi < 320^\circ$



Различные методы измерения комбинируются для получения высокой точности и широкого диапазона по p_T .

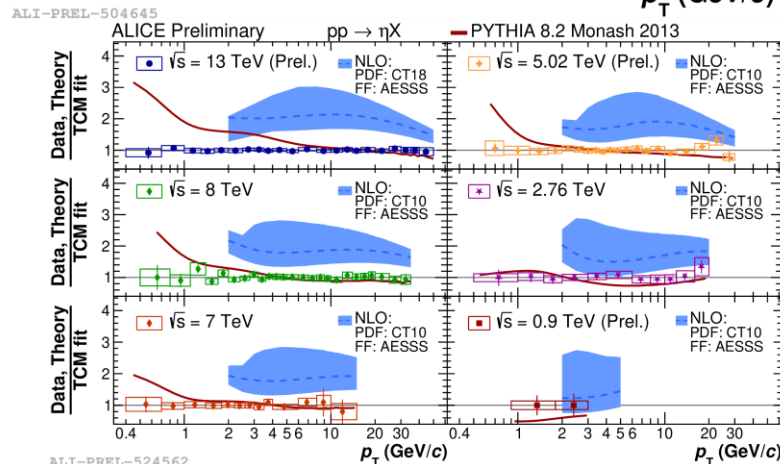
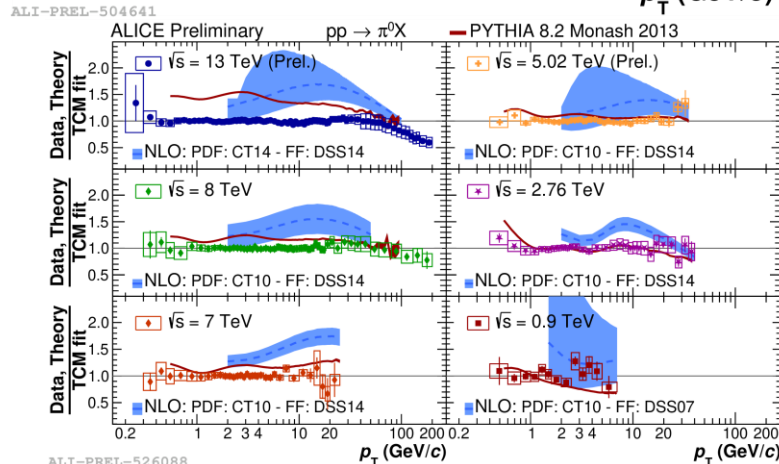


Измерения π^0 и η мезонов в pp столкновениях



ALI-PREL-504633

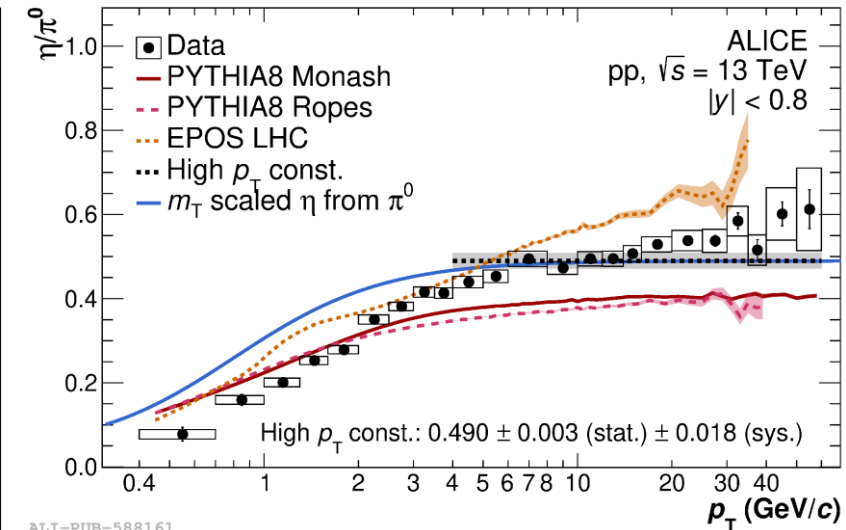
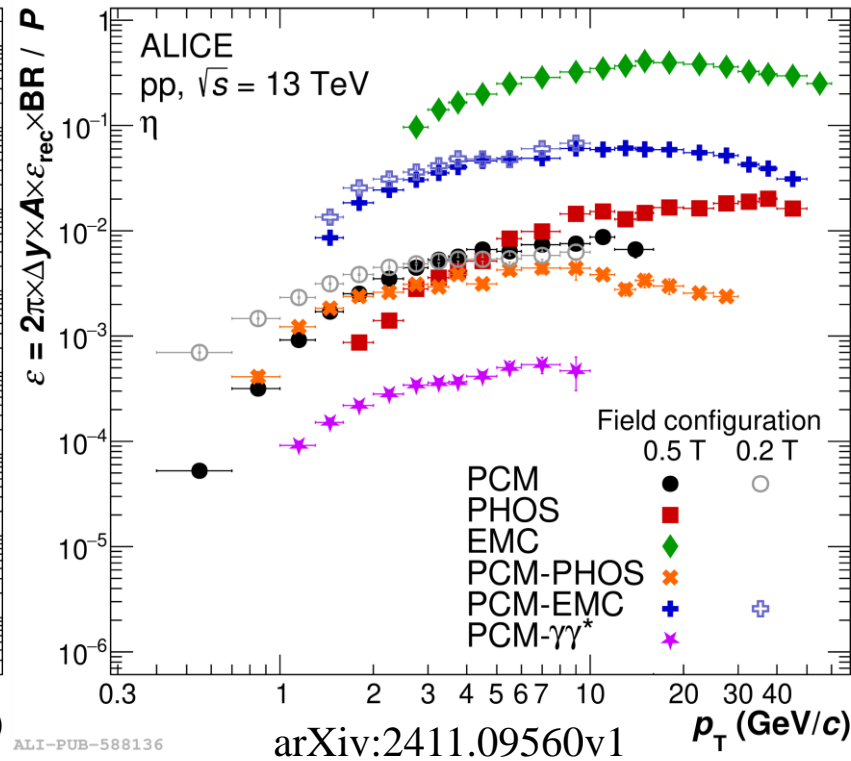
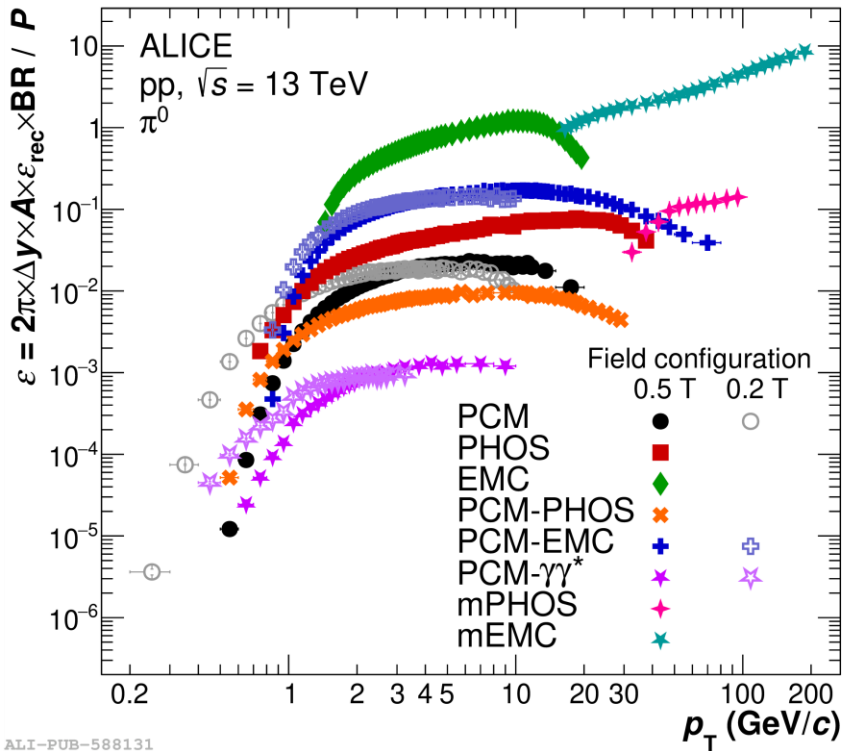
- Прецизионные измерения нейтральных мезонов в широком диапазоне по p_T помогают ограничить FF и PDF + важны для измерения прямых фотонов.



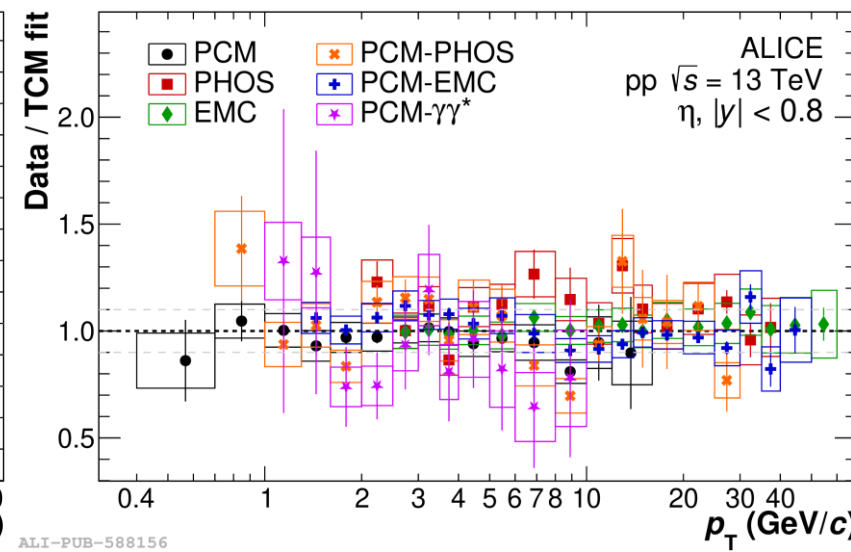
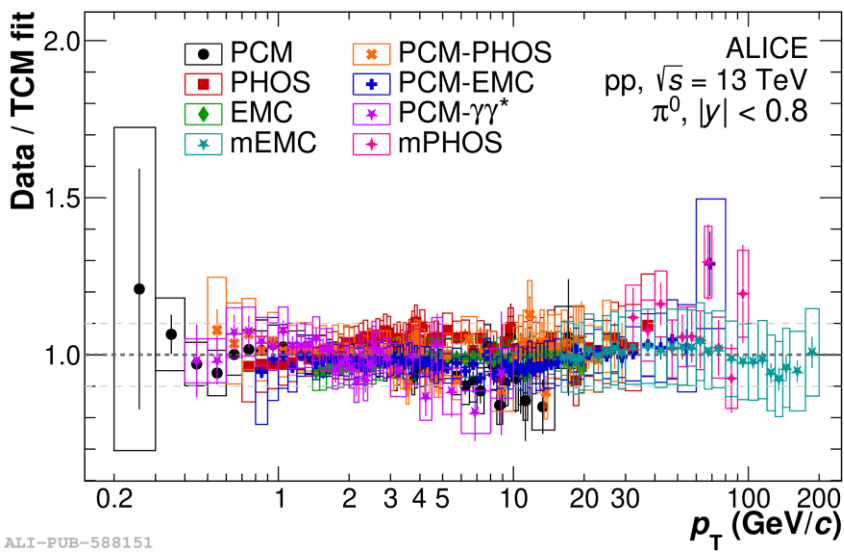
- Широкий диапазон энергий (0.9, 2.76, 5.02, 7, 8, and 13 TeV), комбинация различных методов реконструкции
- И теория (NLO), и расчеты PYTHIA 8 переоценивают данные

- η/π^0 : Нет значительной зависимости от энергии столкновения

Измерения π^0 и η мезонов в pp столкновениях



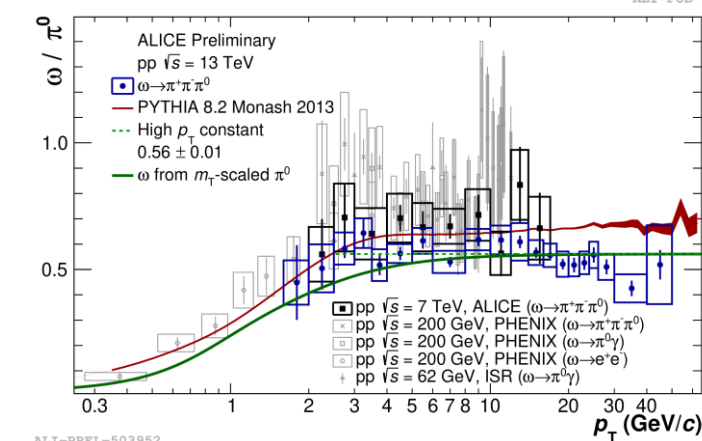
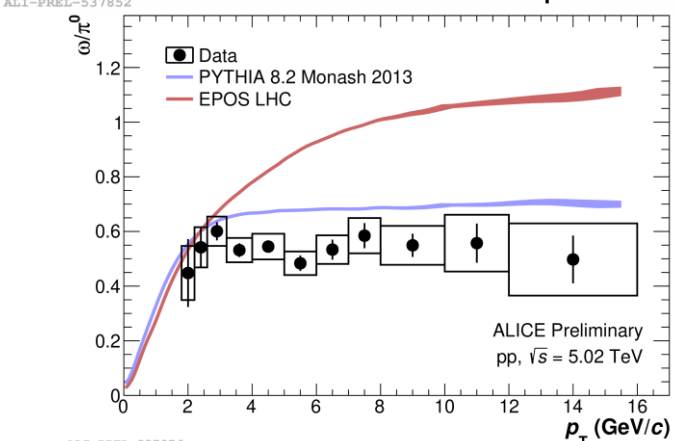
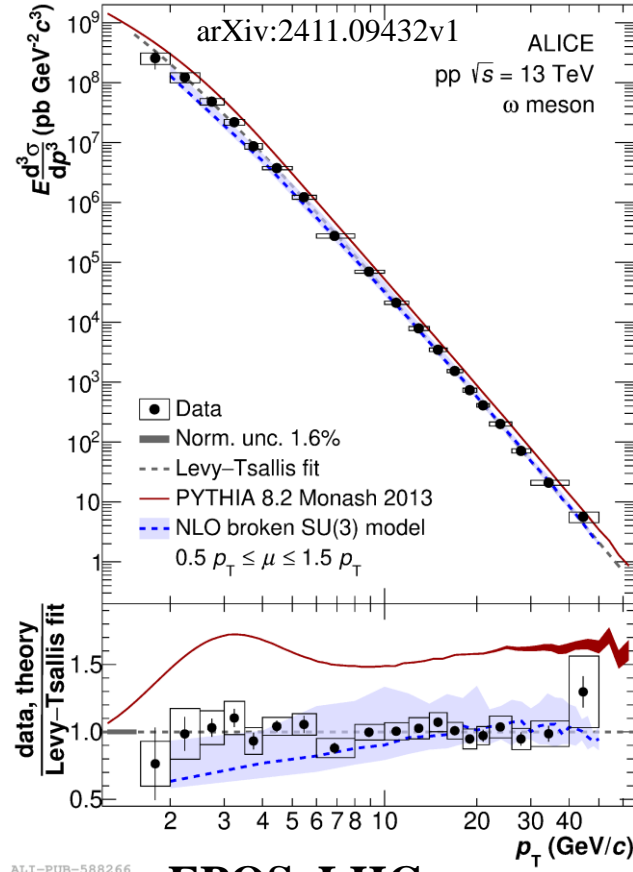
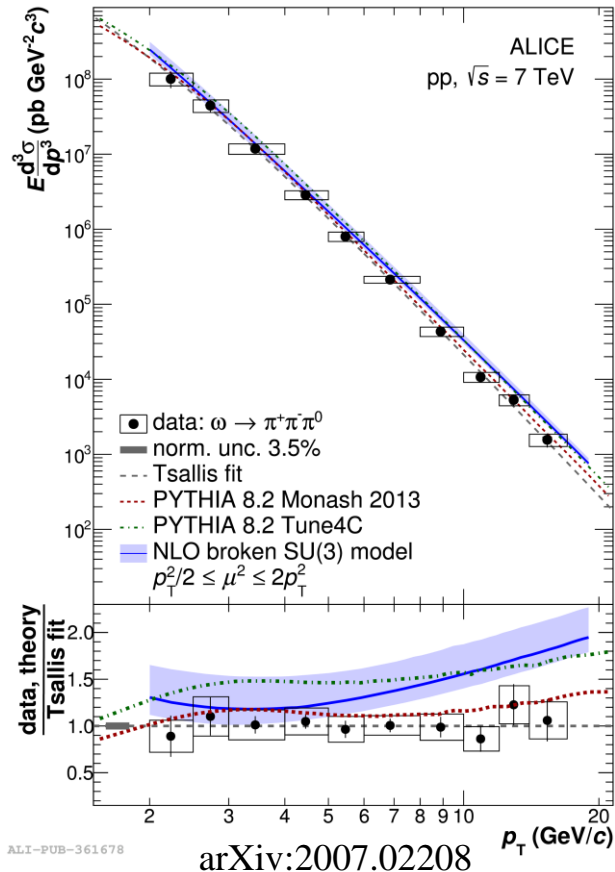
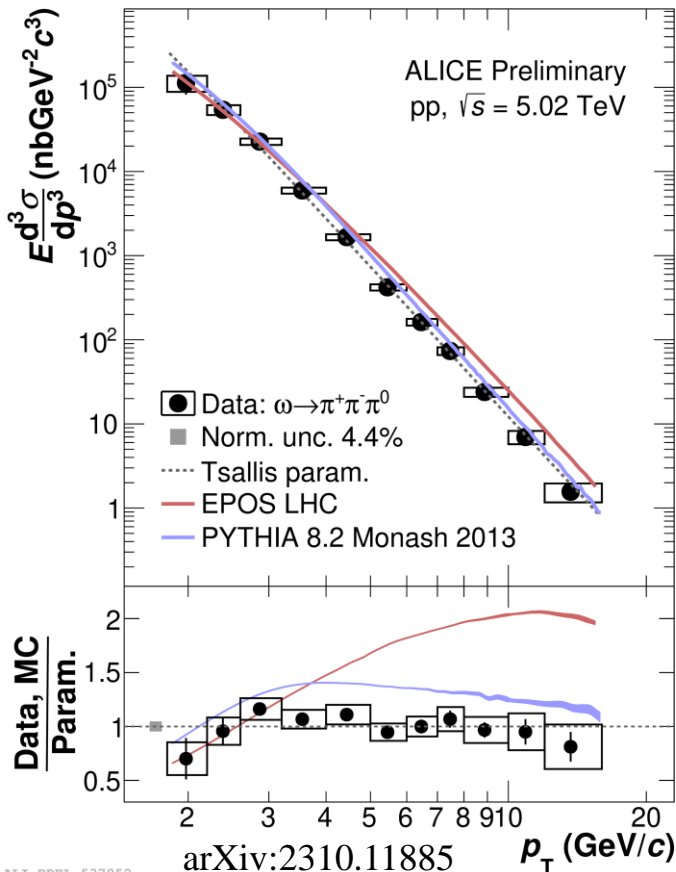
- Комбинированные поправки: p_T -зависимые, метод «слившихся» кластеров позволяет измерить спектры π^0 до 100 ГэВ/с в случае mPHOS и до 200 ГэВ/с в случае mEMC.



- Различные методы измерений (PCM, PHOS, EMC) статистически и систематически не скоррелированы и находятся в хорошем согласии.

$$E \frac{d^3 \sigma}{dp^3} = \frac{1}{\epsilon} \frac{1}{L_{int}} \frac{N^{\pi^0(\eta)} - N_{sec}^{\pi^0}}{TR p_T \Delta p_T}$$

Измерения ω мезонов в pp столкновениях



• Измерения ω мезонов необходимы для измерения прямых фотонов (3-й по величине вклад в фон)

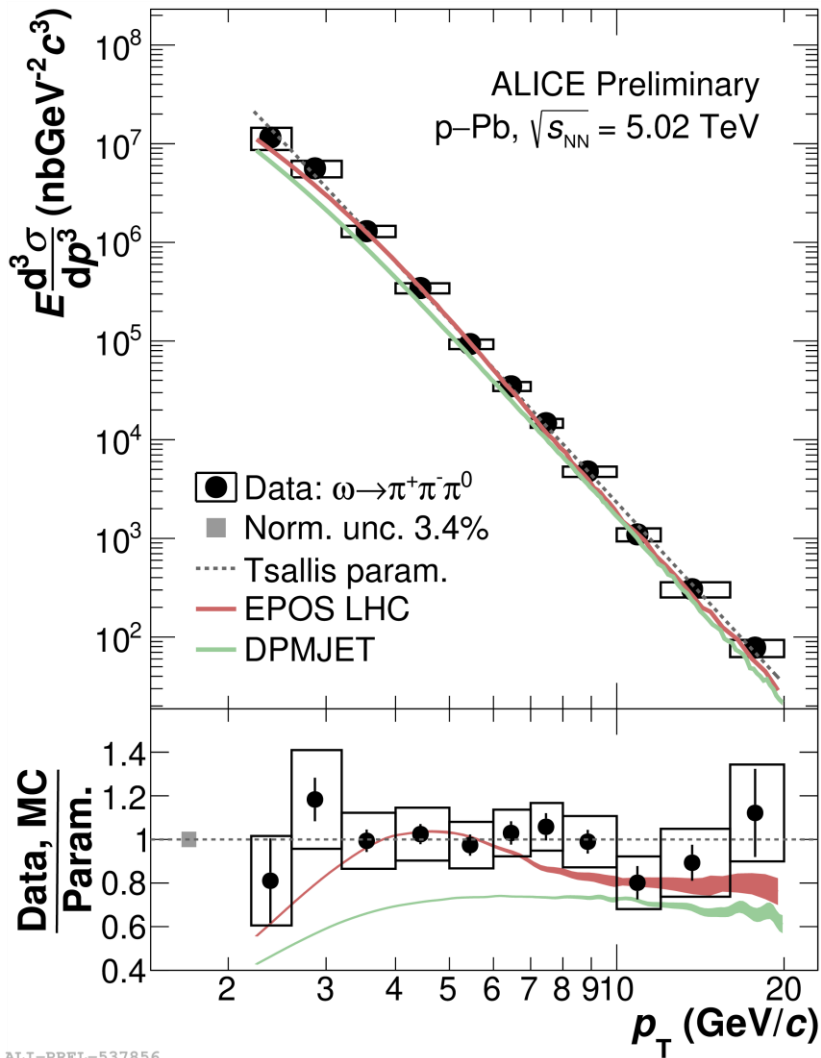
• Измерены при 5.02, 7, и 13 ТэВ

• $\omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$, BR ≈ 89.2 %
 • $\omega \rightarrow \pi^0 \gamma$, BR ≈ 8.3 %

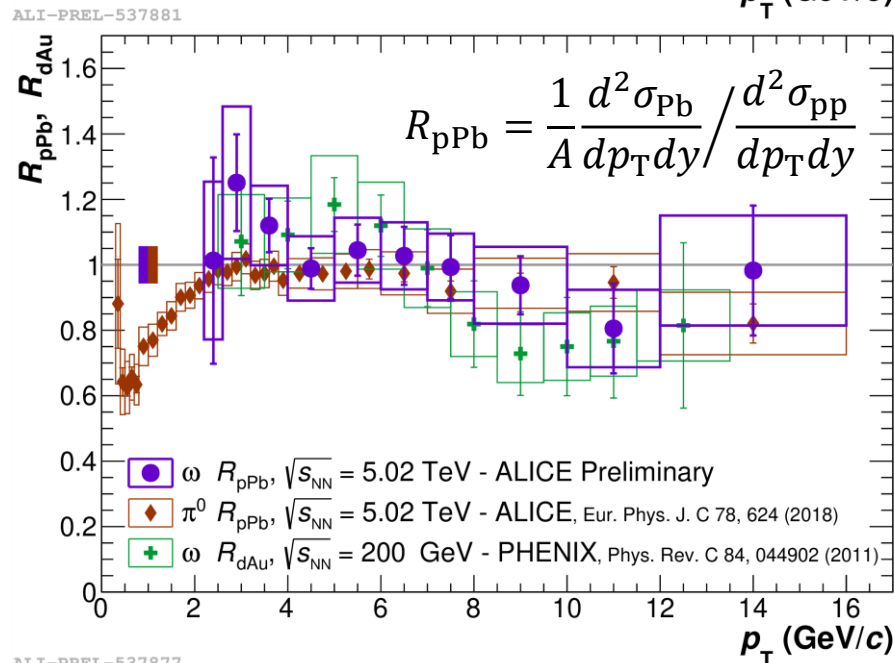
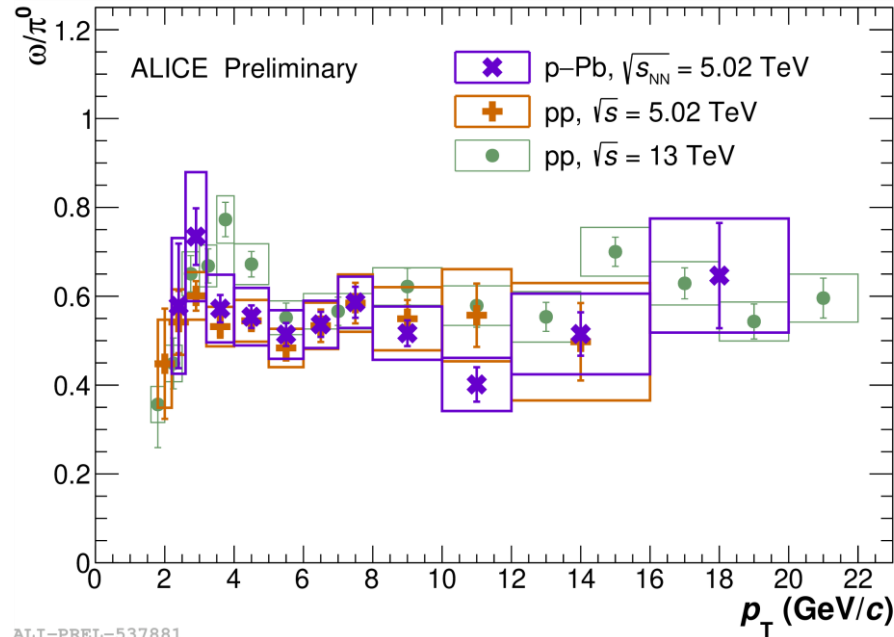
• EPOS LHC переоценивает pp данные почти на 100% при $\sqrt{s} = 5.02$ TeV, в то время как расчеты PYTHIA 8 переоценивают данные при $\sqrt{s} = 5.02$ и 13 ТэВ и хорошо описывают данные при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ

• ω/π^0 : Константа при высоких p_T при $\sqrt{s} = 13$ ТэВ ниже, чем при $\sqrt{s} = 0.2$ и 7 ТэВ. Однако, она находится в согласии с константой при $\sqrt{s} = 5.02$ ТэВ. 5

Измерения ω мезонов в p-Pb столкновениях



arXiv:2310.11885



- **EPOS LHC** хорошо описывает p-Pb данные, в то время как расчеты **DPMJET** недооценивают данные на 30–40%, но в общем хорошо описывают форму спектра.

- ω/π^0 : согласие между pp данными при $\sqrt{s} = 5.02$ ТэВ и 13 ТэВ и p-Pb данными при $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ → не зависит от сталкивающейся системы.

- R_{pPb} : согласие с единицей, ядерная модификация не наблюдается при $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ.

Измерения прямых фотонов

- **Прямые фотоны** – фотоны, рожденные в ЭМ-взаимодействиях в течение столкновения (распадные фотоны – из распадов конечных адронов).

- В отличие от адронов фотоны взаимодействуют с горячей материей только ЭМ-образом, покидая горячую область практически без перерассеяния и потому предоставляют информацию обо всех стадиях столкновения.

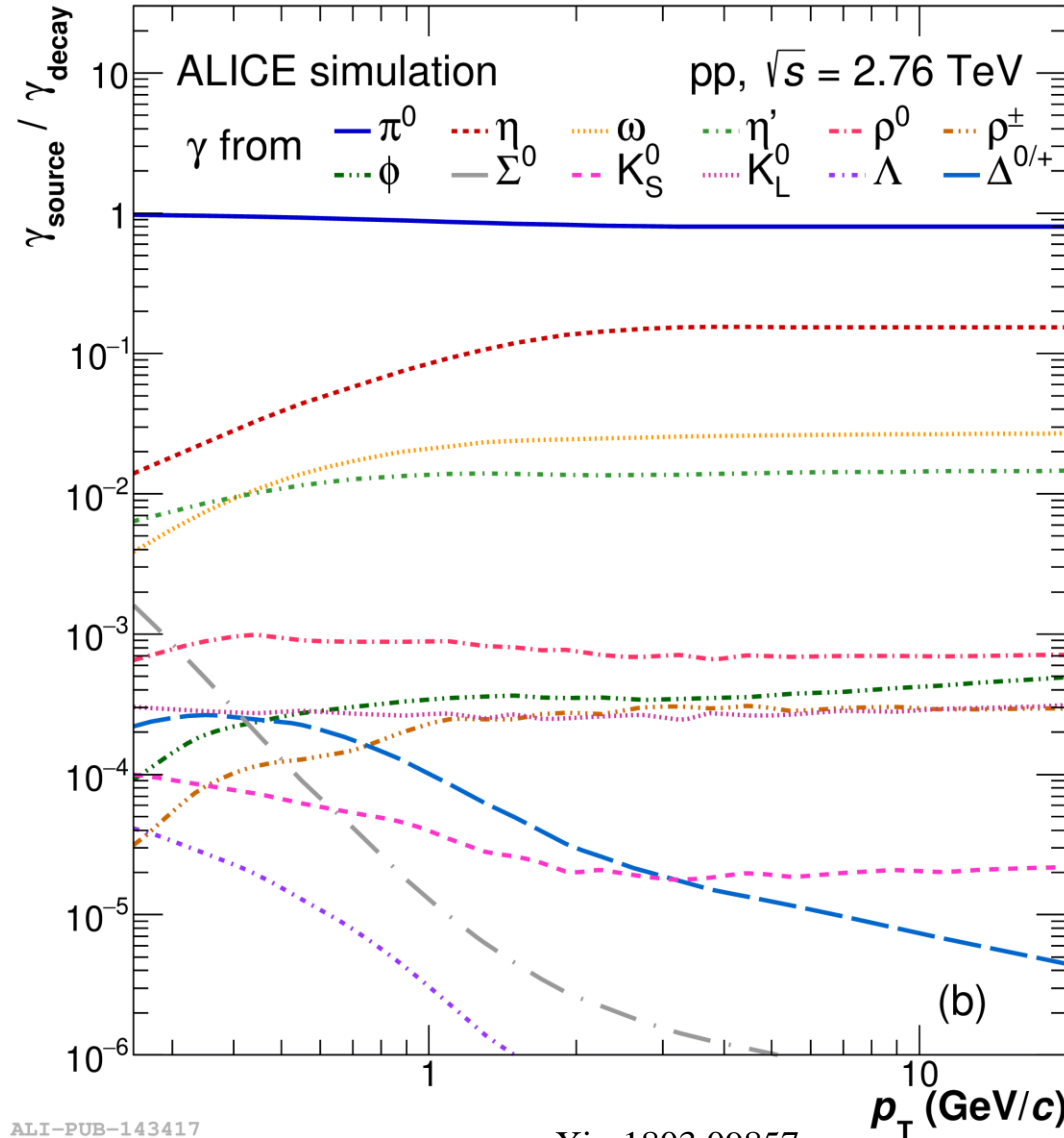
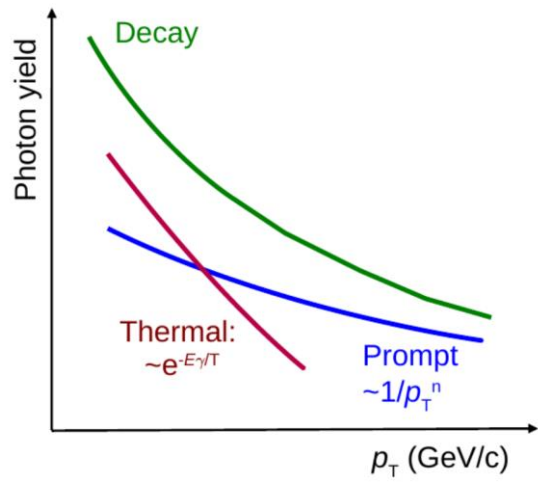
- Низкие p_T = термальные прямые фотоны – тест эволюции КГП:
 - Спектр → температура и коллективные потоки

- Высокие p_T = мгновенные прямые фотоны – тест нач. условий:
 - N_{coll} скейлинг и модификация PDF

- **Метод вычитания:** $Y_{\gamma direct} = Y_{\gamma incl} - Y_{\gamma decay} = \left(1 - \frac{1}{R_\gamma}\right) Y_{\gamma incl}$

$$R_\gamma = \frac{Y_{\gamma incl}}{Y_{\gamma decay}} \approx \left(\frac{Y_{\gamma incl}}{Y_{\gamma \pi^0}}\right)_{measured} / \left(\frac{Y_{\gamma decay}}{Y_{\gamma \pi^0}}\right)_{simulated}$$

- **Инклюзивные фотоны** = все рожденные фотоны (распадные + прямые)
- Распадные фотоны – из моделирования распадов от измеренных или m_T скейленных адронных спектров (**коктейль**)
- Двойное отношение (R_γ) – для сокращения некоторых систематических ошибок



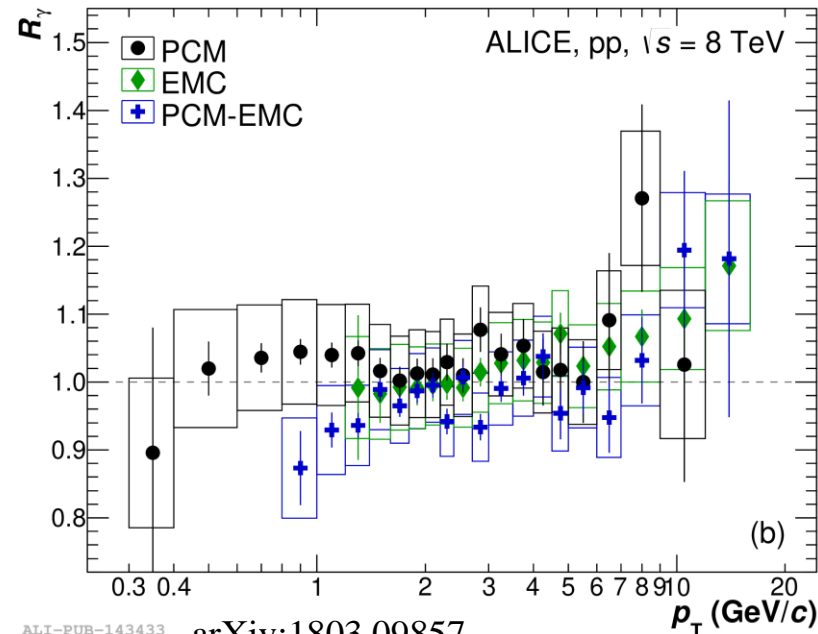
ALI-PUB-143417

arXiv:1803.09857

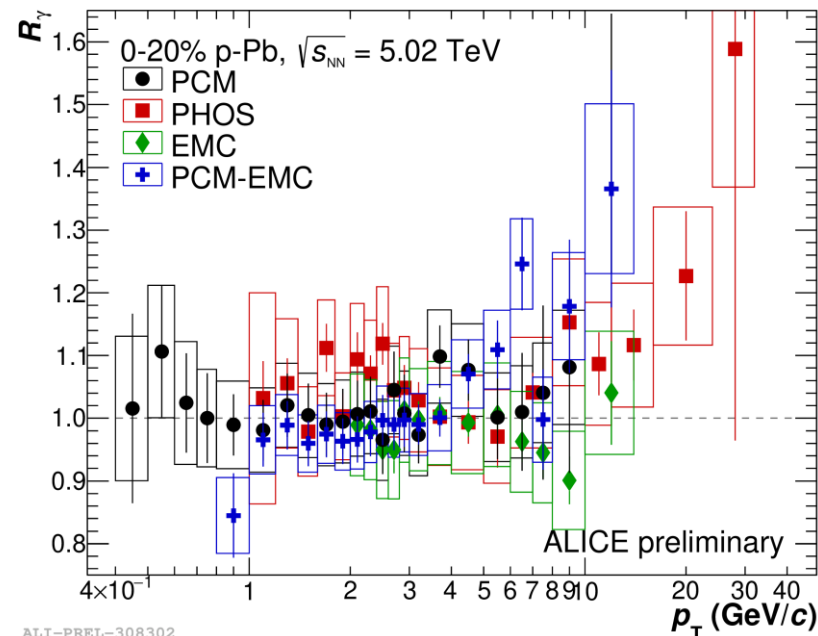
Измерения прямых фотонов

- Как и в случае измерения нейтральных мезонов, разные методы измерений (PCM, PHOS и EMC) статистически и систематически **не скоррелированы** и находятся в **хорошем согласии**.

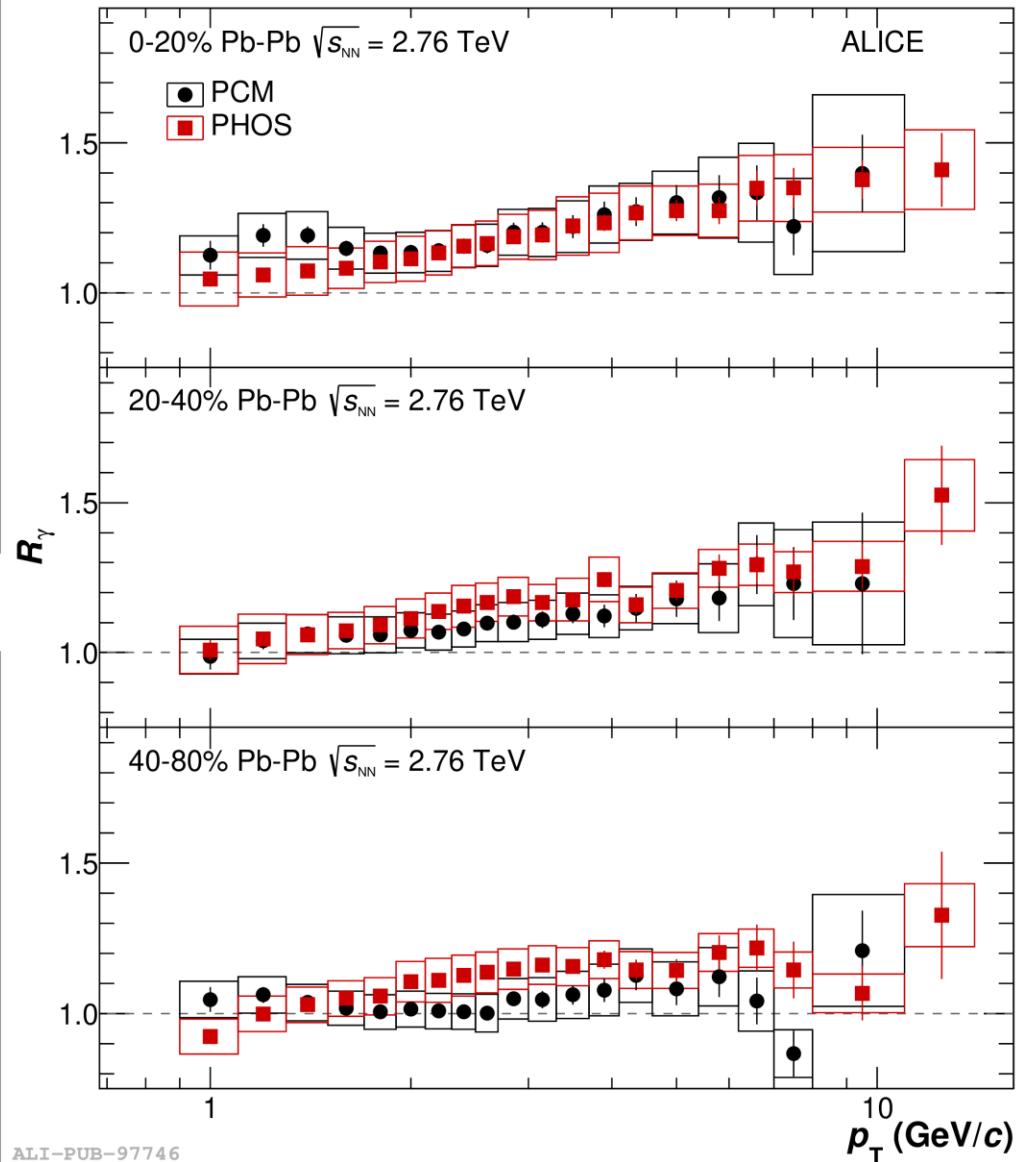
- Систематические ошибки индивидуальных измерений – в основном **p_T -независимые**.



ALI-PUB-143433 arXiv:1803.09857



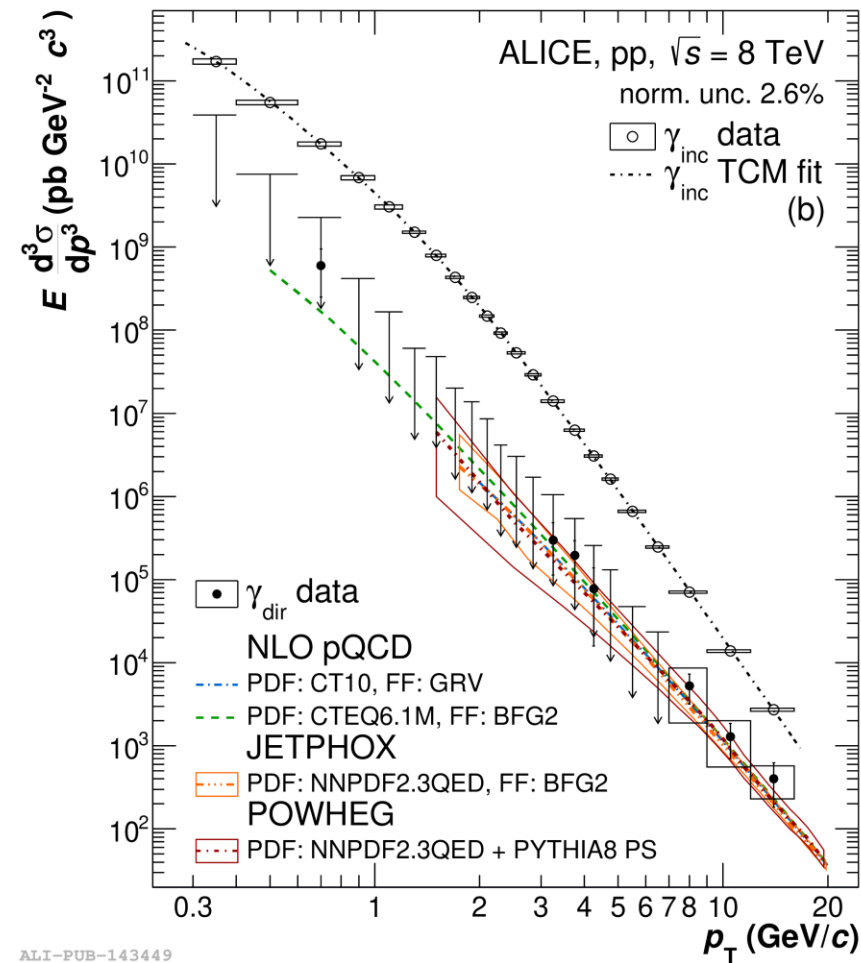
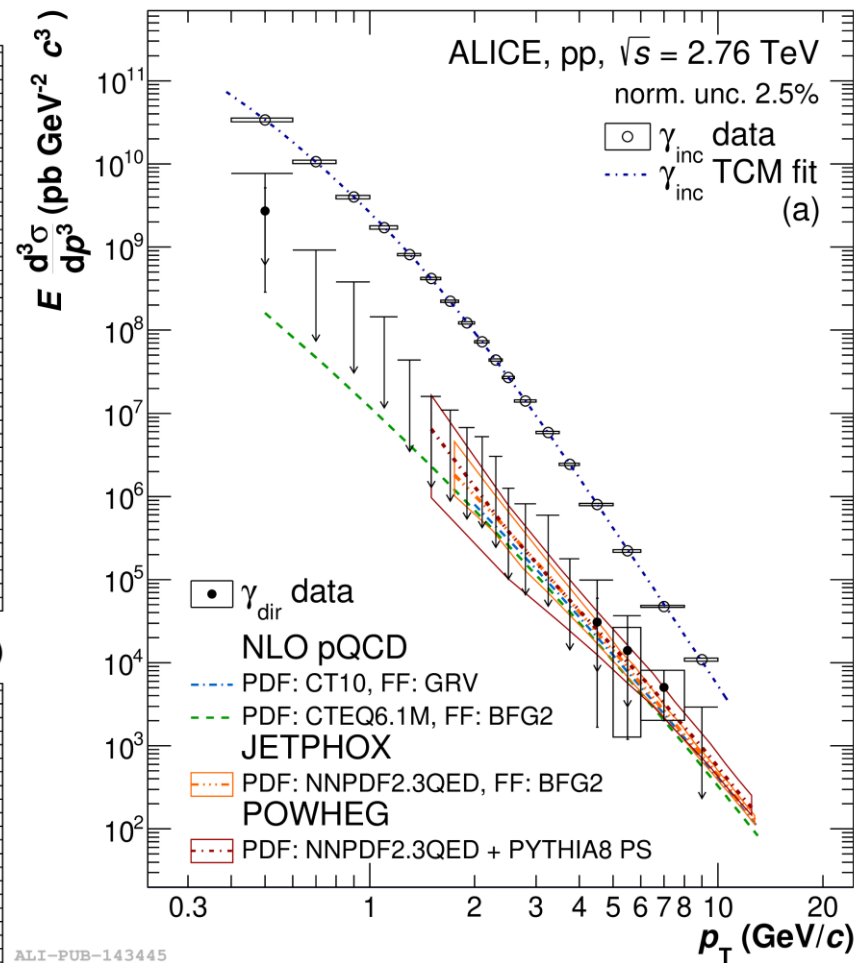
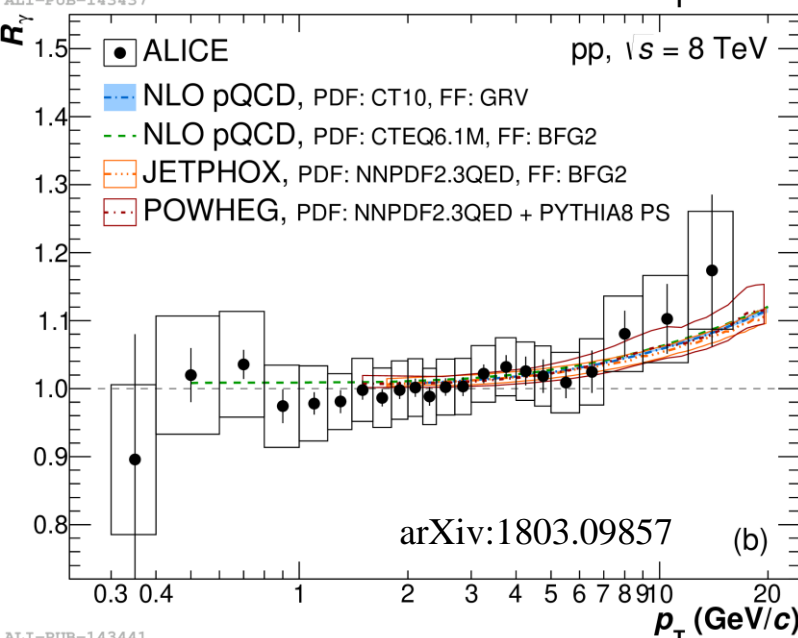
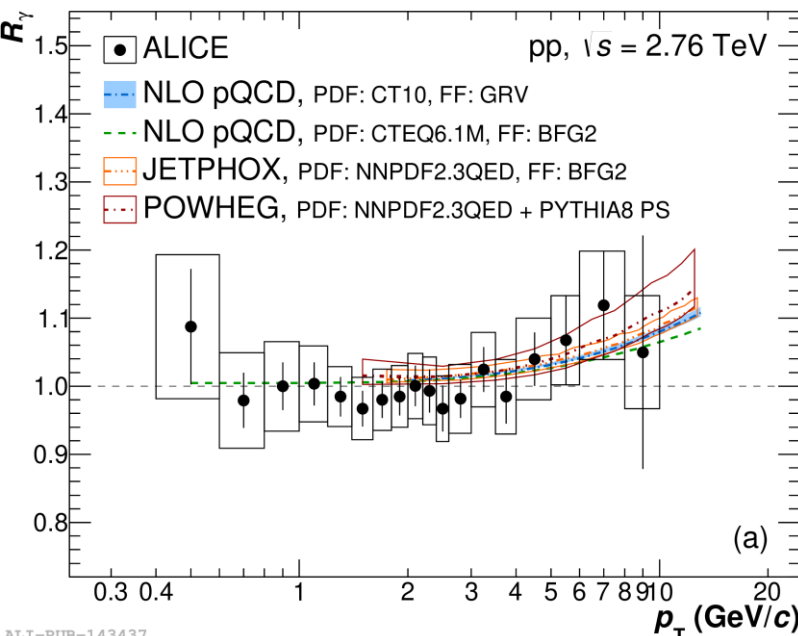
ALI-PREL-308302



ALI-PUB-97746

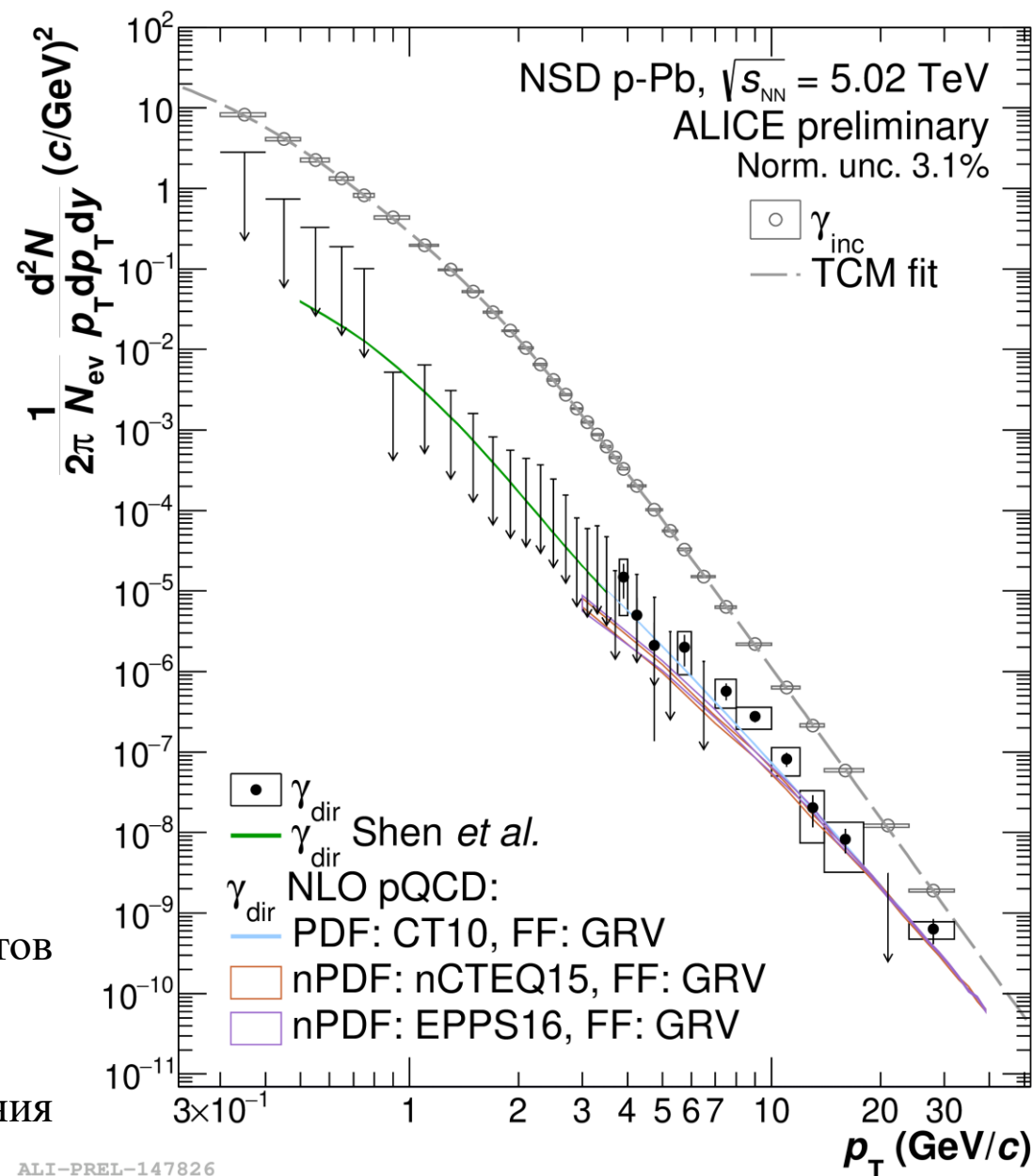
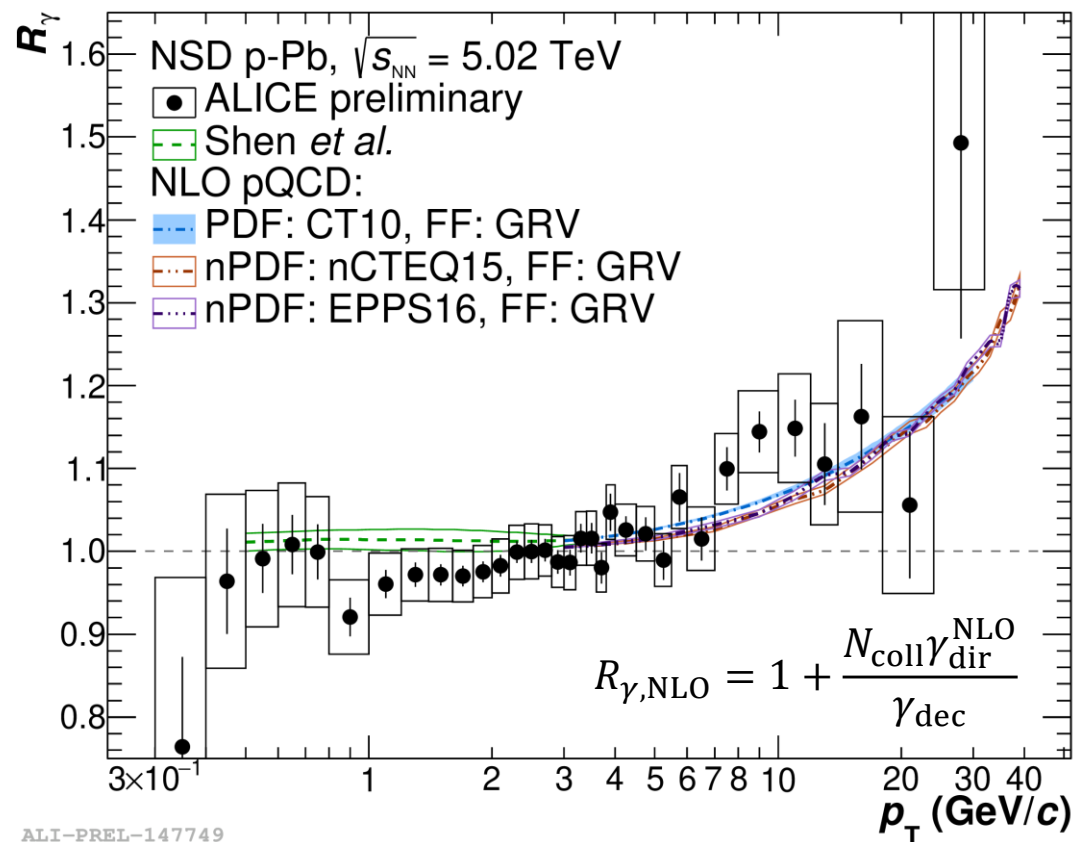
arXiv:1509.07324

Измерения прямых фотонов в pp столкновениях



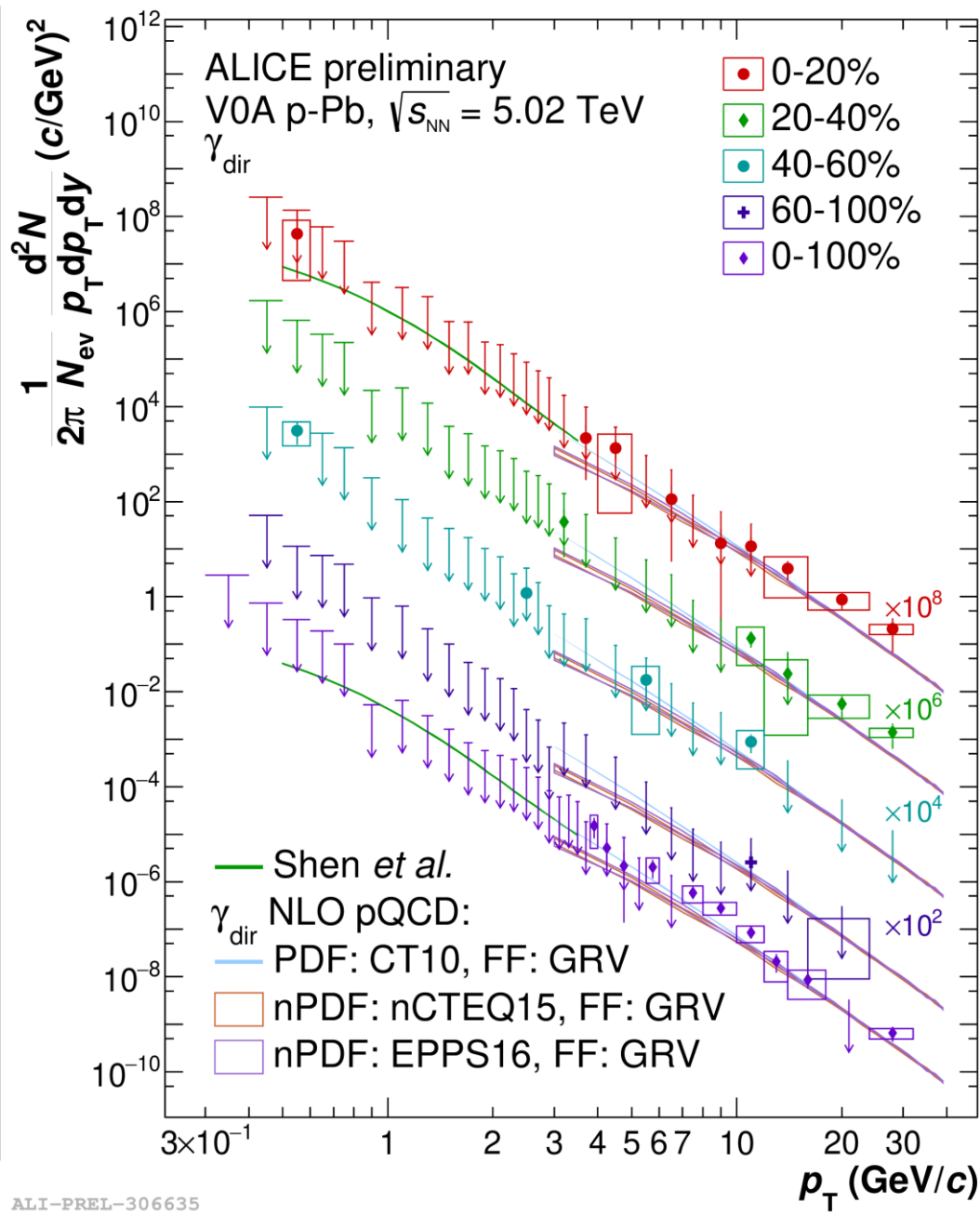
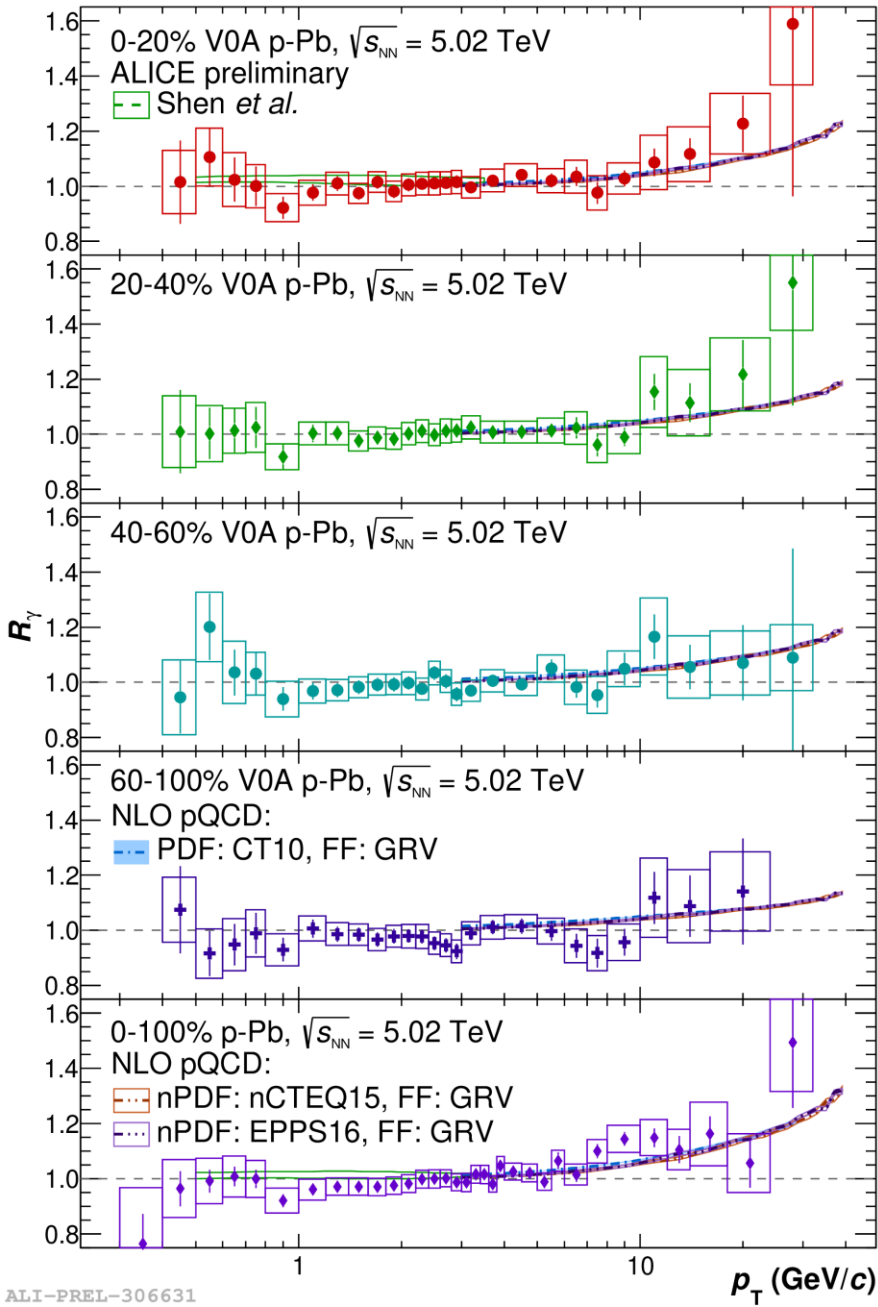
- Измерены при $\sqrt{s} = 2.76$ и 8 ТэВ.
- Низкие p_T ($< 2-3$ ГэВ/с) – не наблюдается значительный избыток термальных прямых фотонов
- Высокие p_T (> 7 ГэВ/с) – около 1-2 σ отклонение от единицы (избыток мгновенных фотонов), в согласии с pQCD

Измерения прямых фотонов в p-Pb столкновениях



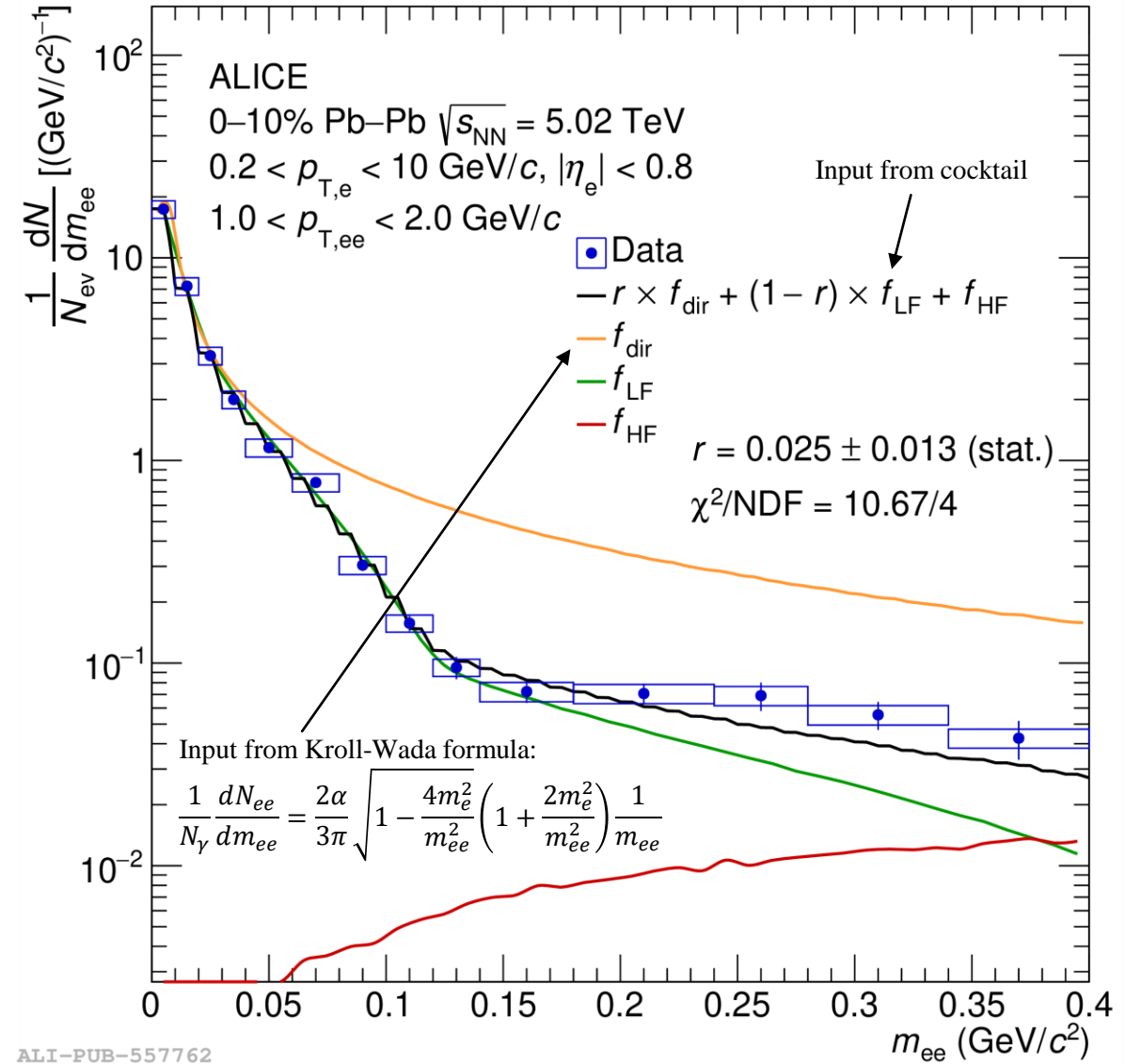
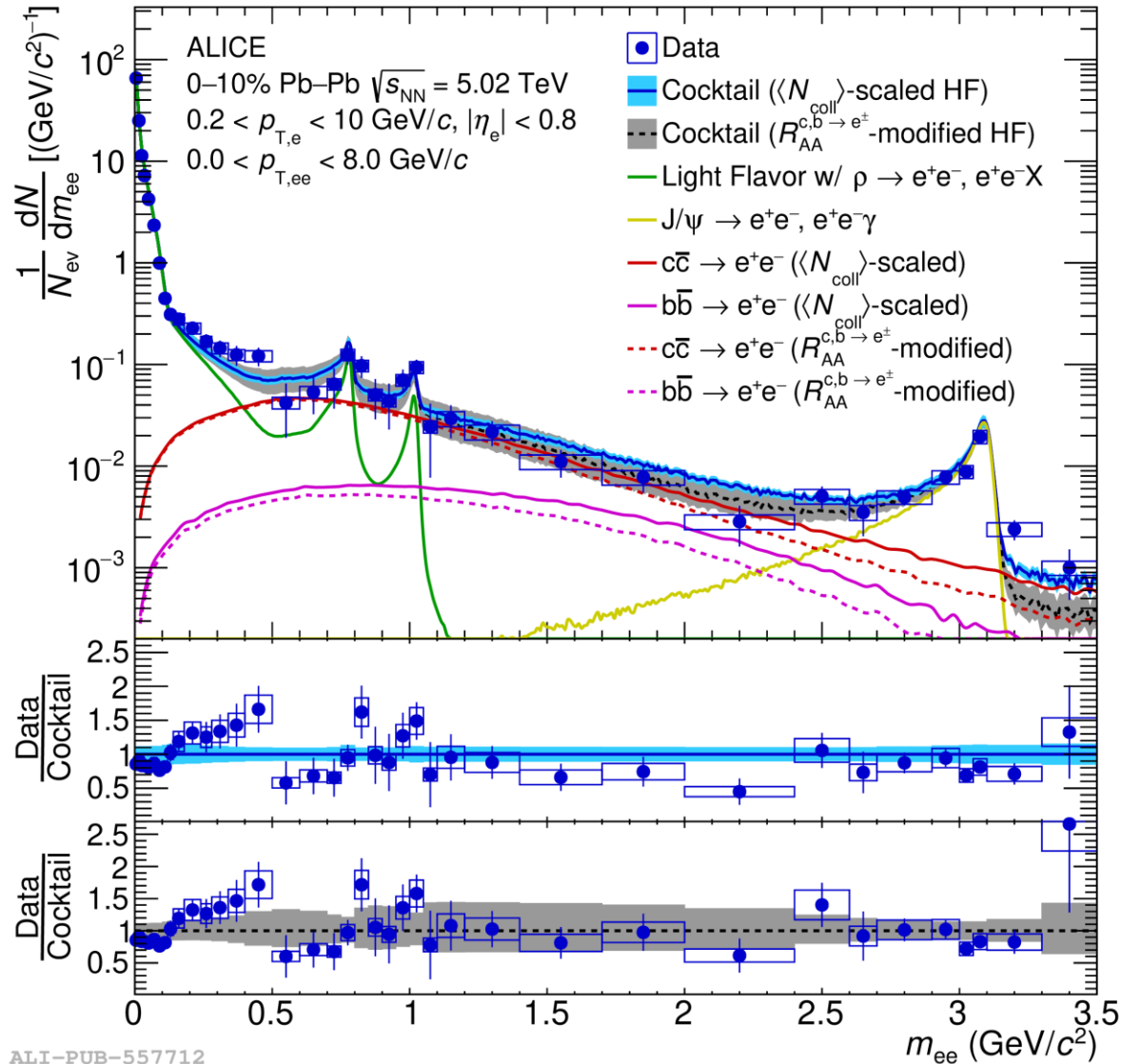
- Измерены только при $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ
- Возможна модификация выхода прямых фотонов из-за эффектов холодной ядерной материи
- **Низкие p_T** – в пределах ошибок не наблюдается излучения термальных фотонов
- **Высокие p_T** – избыток мгновенных фотонов, в согласии с различными расчетами NLO pQCD

Измерения прямых фотонов в p-Pb столкновениях



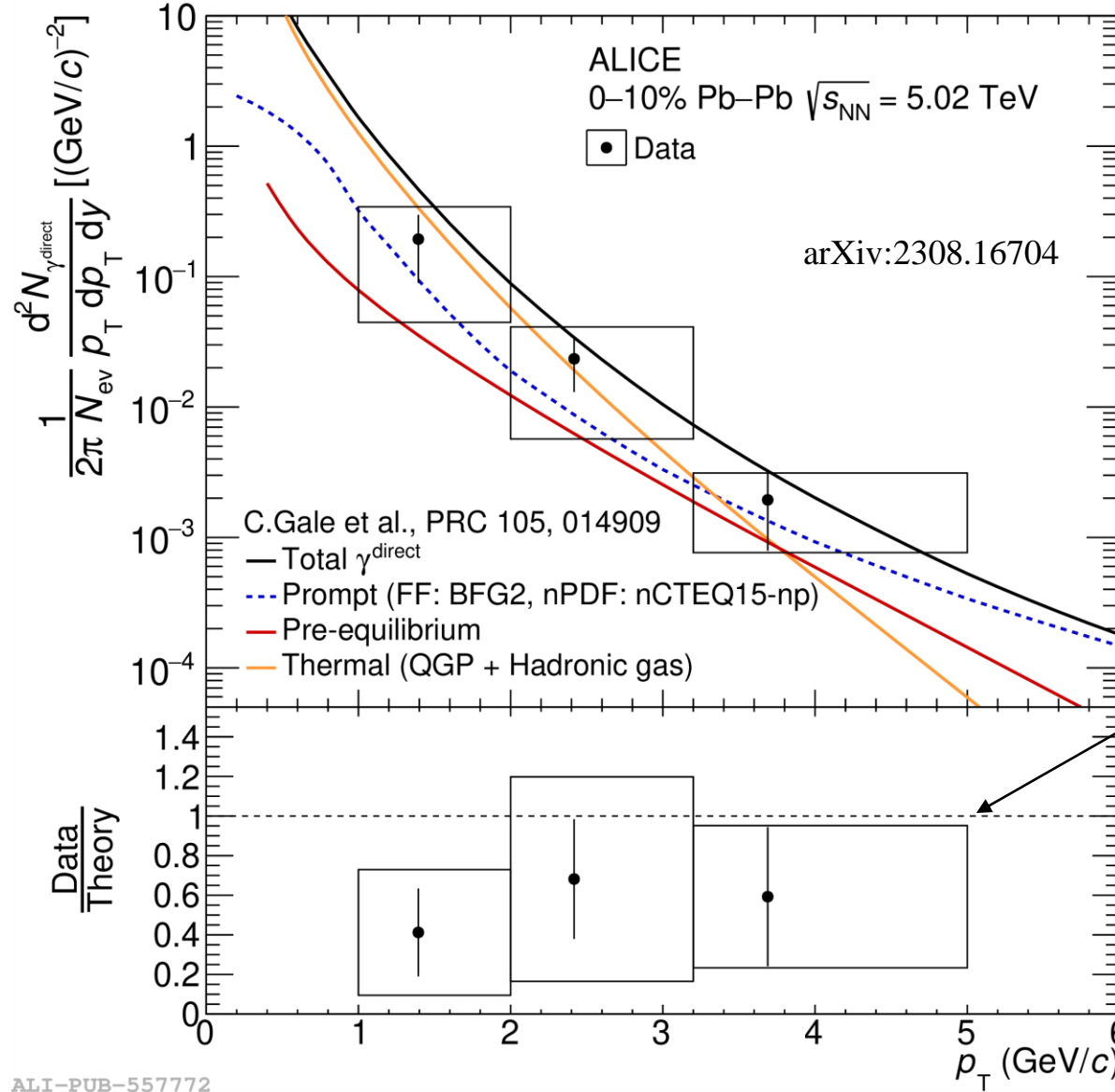
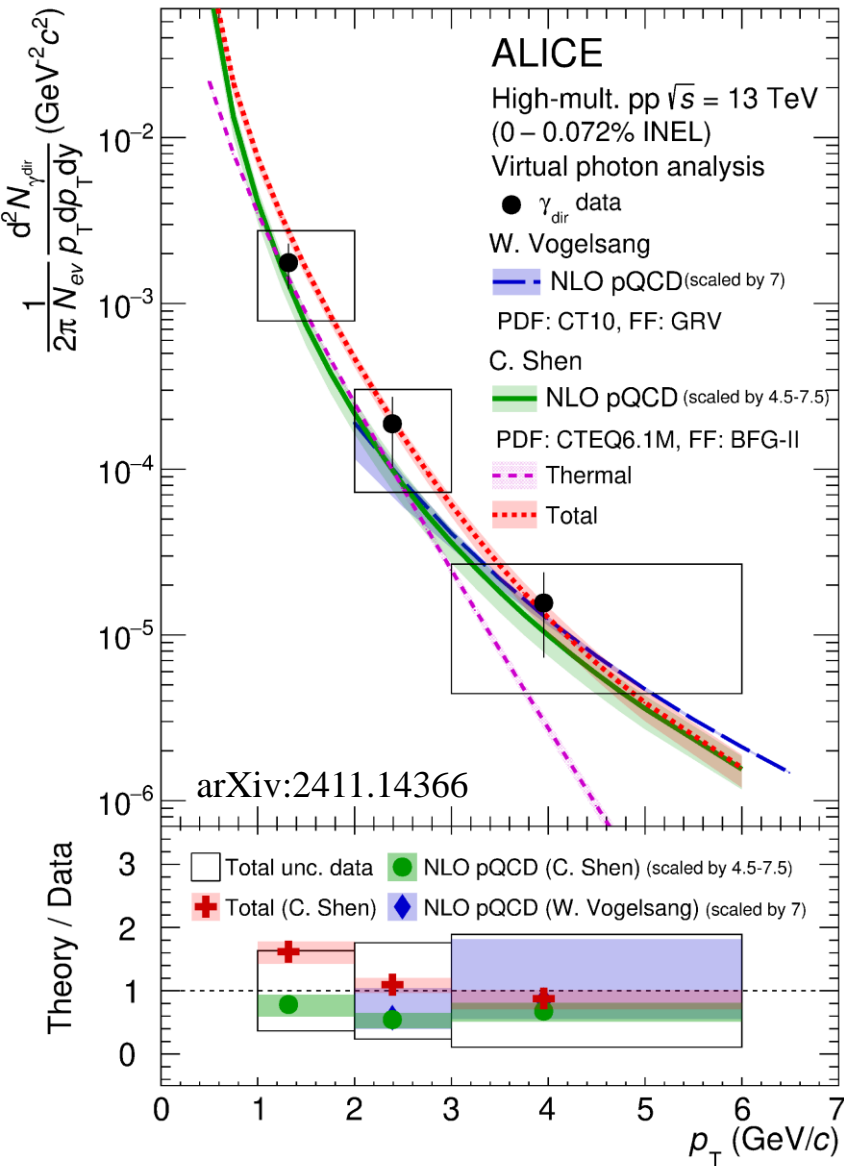
- Измерены при $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ в 4 классах множественности
- Верхние пределы – если R_γ совпадает с единицей
- Даже в классе 0–20% с самой высокой множественностью **не наблюдается избытка** прямых фотонов при низких p_T .
- Необходимо проводить более точные измерения, чтобы подтвердить или опровергнуть наличие термального излучения в p-Pb столкновениях.

Измерения прямых фотонов с помощью дилептонов



- Намек на избыток при низких m_{ee} (< 0.5 ГэВ/c²), нет избытка при средних m_{ee} (1.1 ГэВ/c² $< m_{ee} < 2.5$ ГэВ/c²)
- Необходимо контролировать фон от тяжелых ароматов (DCA анализ)
- Доля прямых фотонов извлекается путем подгонки the m_{ee} спектров ($m_{ee} < 0.4$ ГэВ/c²)

Измерения прямых фотонов с помощью дилептонов в pp и $Pb-Pb$ столкновениях



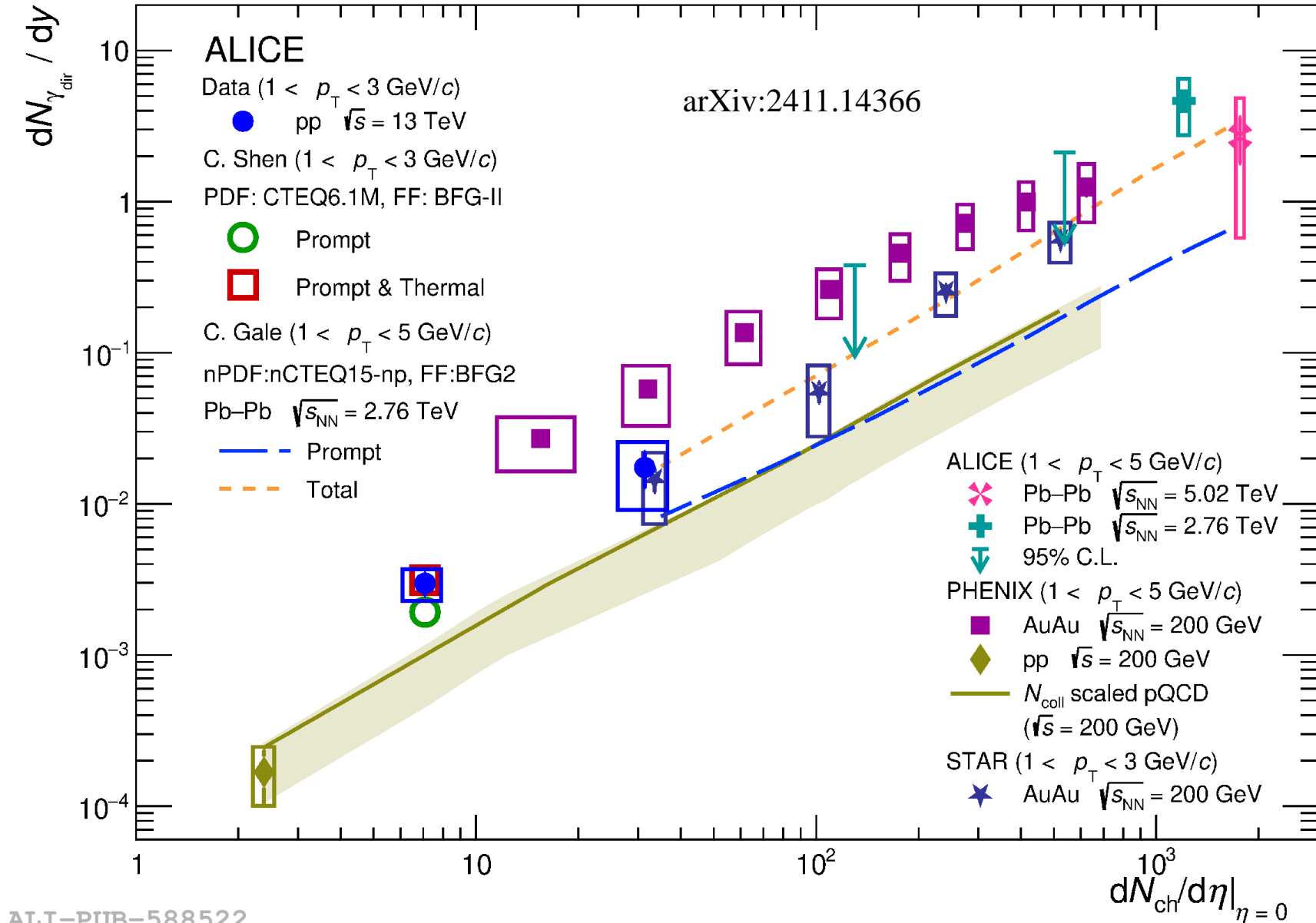
Данные переоценены на $\sim 1\sigma$

ALI-PUB-588517

ALI-PUB-557772

- Спектр прямых фотонов измерен в pp столкновениях при $\sqrt{s} = 7$ ТэВ и 13 ТэВ и в $Pb-Pb$ – при $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ
- Данные (и pp , и $Pb-Pb$) воспроизводятся **полной моделью** (с вкладом от мгновенных и термальных фотонов)

Обобщение измерений прямых фотонов



- **Степенная зависимость** выхода прямых фотонов ($dN_{\gamma_{dir}}/dy$) от множественности заряженных частиц ($dN_{ch}/d\eta|_{\eta=0}$) → **нет зависимости от энергии или центральности**

- Улучшенные результаты в Pb-Pb столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76 \text{ ТэВ}$ (реальные фотоны) и **5.02 ТэВ** (виртуальные фотоны)

- Недавние pp результаты при $\sqrt{s} = 13 \text{ ТэВ}$ (виртуальные фотоны)

- Все три измерения в ALICE **согласуются** с измерениями STAR и PHENIX и с предсказаниями моделей

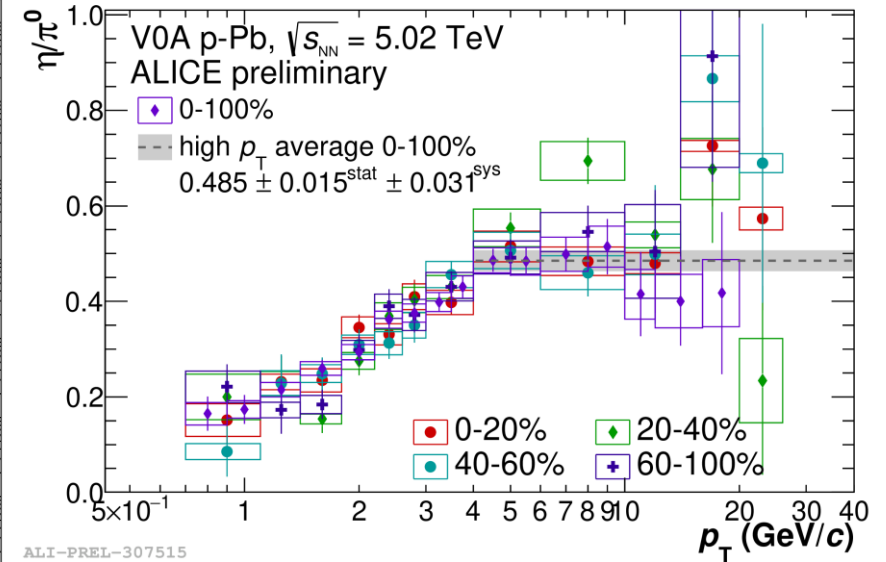
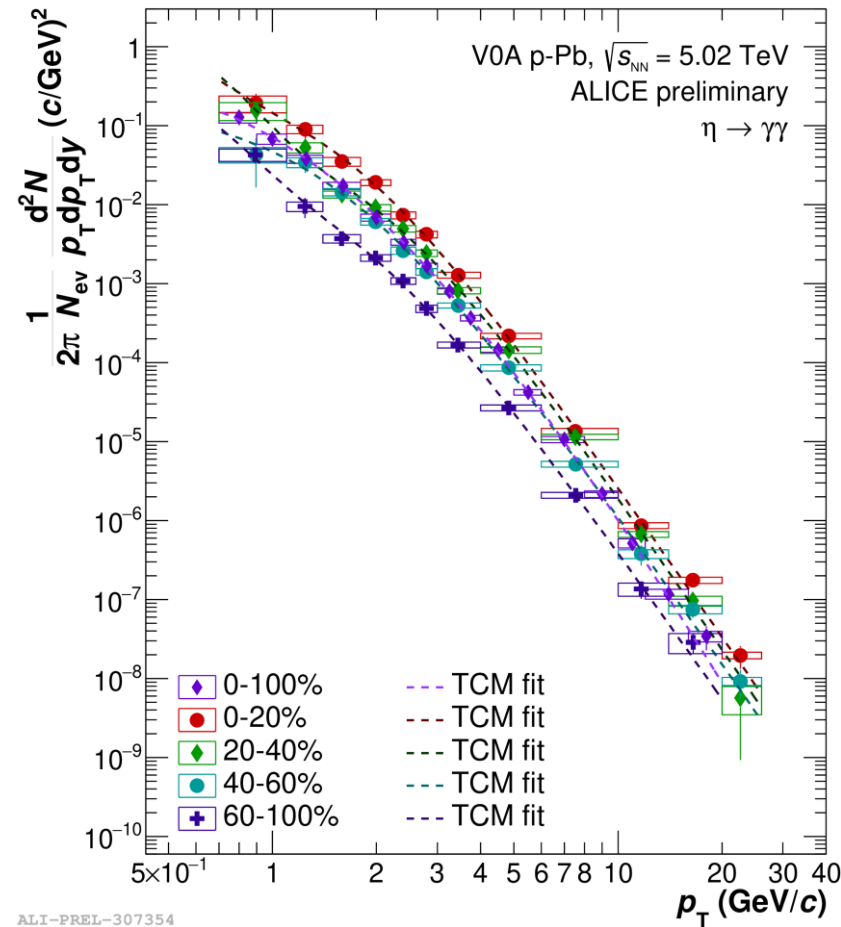
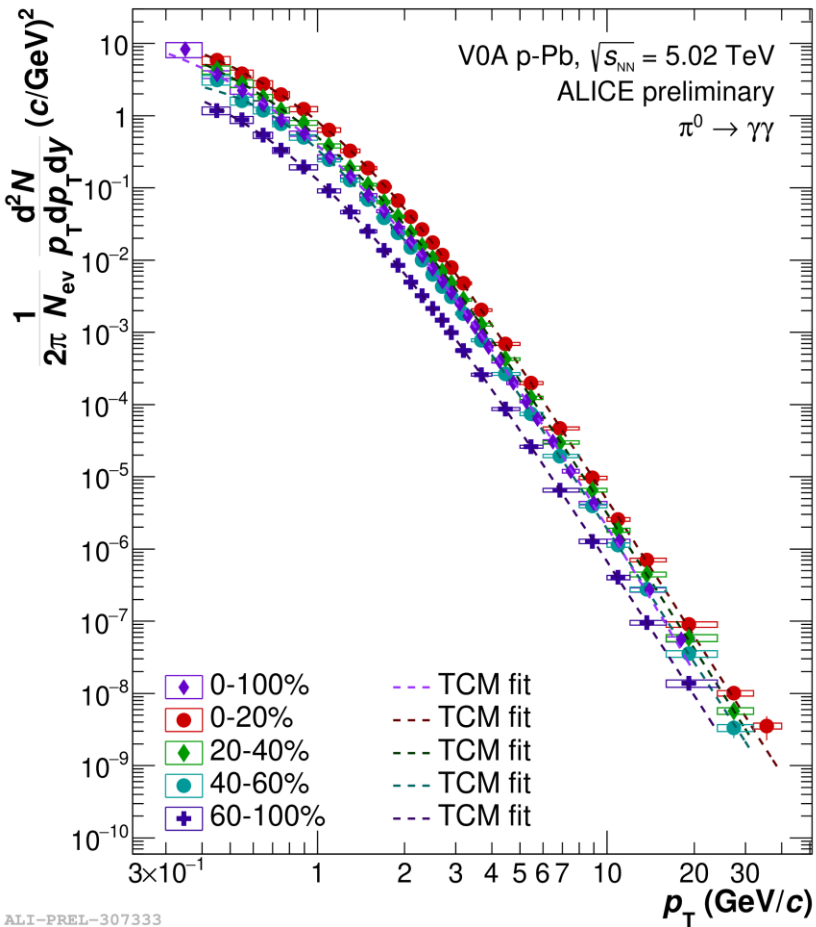
Заключение

- **Спектры нейтральных мезонов** были измерены в **pp, p–Pb и Pb–Pb** столкновениях в эксперименте ALICE в Run 1+2 от 200 MeV до 200 GeV разными методами в различных классах центральности.
- Данные хорошо описываются параметризациями Tsallis и TCM, в то время как предсказания MC генераторов и теории как правило **переоценивают** экспериментальные данные.
- **Спектры прямых фотонов** были измерены в **pp, p–Pb и Pb–Pb** столкновениях в эксперименте ALICE в Run 1+2 от 400 MeV до 100 GeV разными методами (прямые фотоны в PHOS, EMC, PCM, изолированные фотоны и виртуальные фотоны при изучении диэлектронов) в различных классах центральности.
- В **pp** и **p–Pb** столкновениях не наблюдается **значительного избытка прямых фотонов** ($p_T < 2\text{-}3$ ГэВ/с), а в **Pb–Pb** столкновениях есть **избыток около 2.6σ в классе 0–20% и 1.5σ в классе 20–40%** при $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ и **нет избытка** при $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ ТэВ.
- **Скейлинг с N_{ch}** при низких p_T наблюдается для всех энергий и систем.



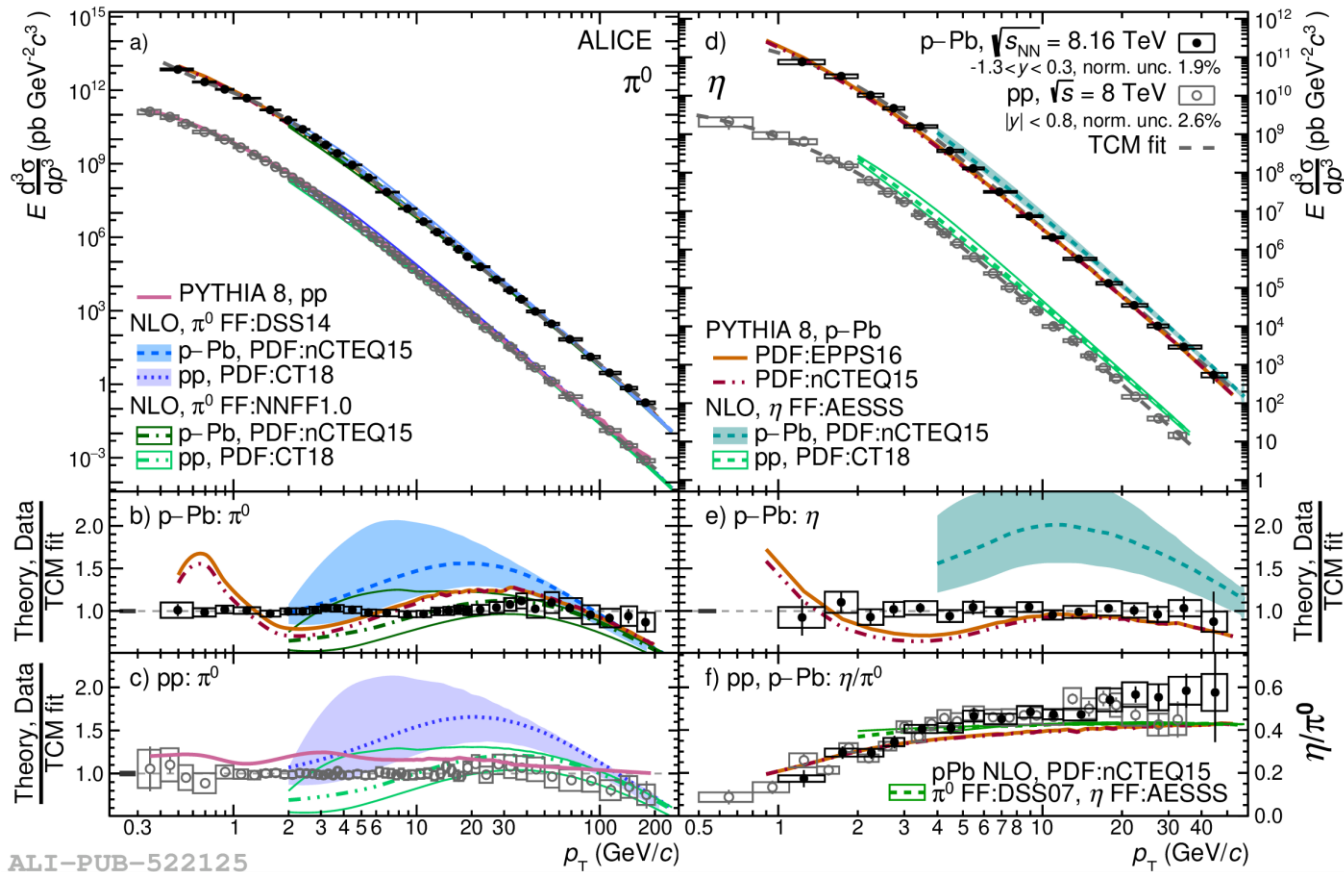
Дополнительные слайды

π^0 and η meson measurements in p-Pb



- π^0 and η spectra measured in **4 centrality classes** at $\sqrt{s} = 5.02$ TeV in p-Pb: 0–20%, 20–40%, 40–60% and 60–100%.
- η/π^0 : No significant centrality dependence.

π^0 and η meson measurements in p-Pb

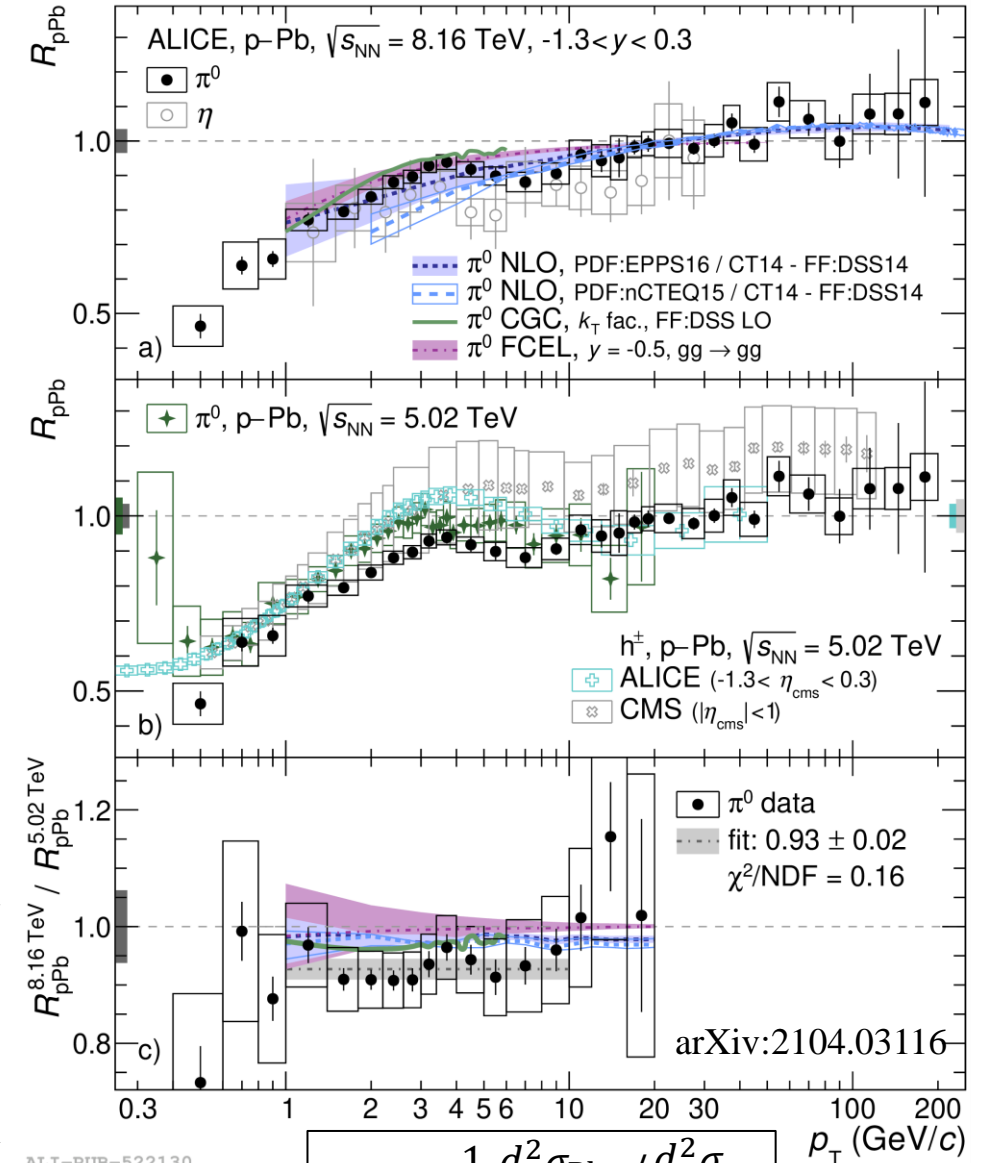


ALI-PUB-522125

- **NLO pQCD (FF:NNFF1.0)** calculations are in good agreement with the data above 2 GeV/c. **PYTHIA 8** generally reproduces π^0 and η spectra, but has problems describing the shape (low p_T , high p_T regions).

- η/π^0 : universal and independent of the colliding system – pp or p-Pb (high p_T constant is 0.48 ± 0.01 for pp and 0.47 ± 0.01 for p-Pb).

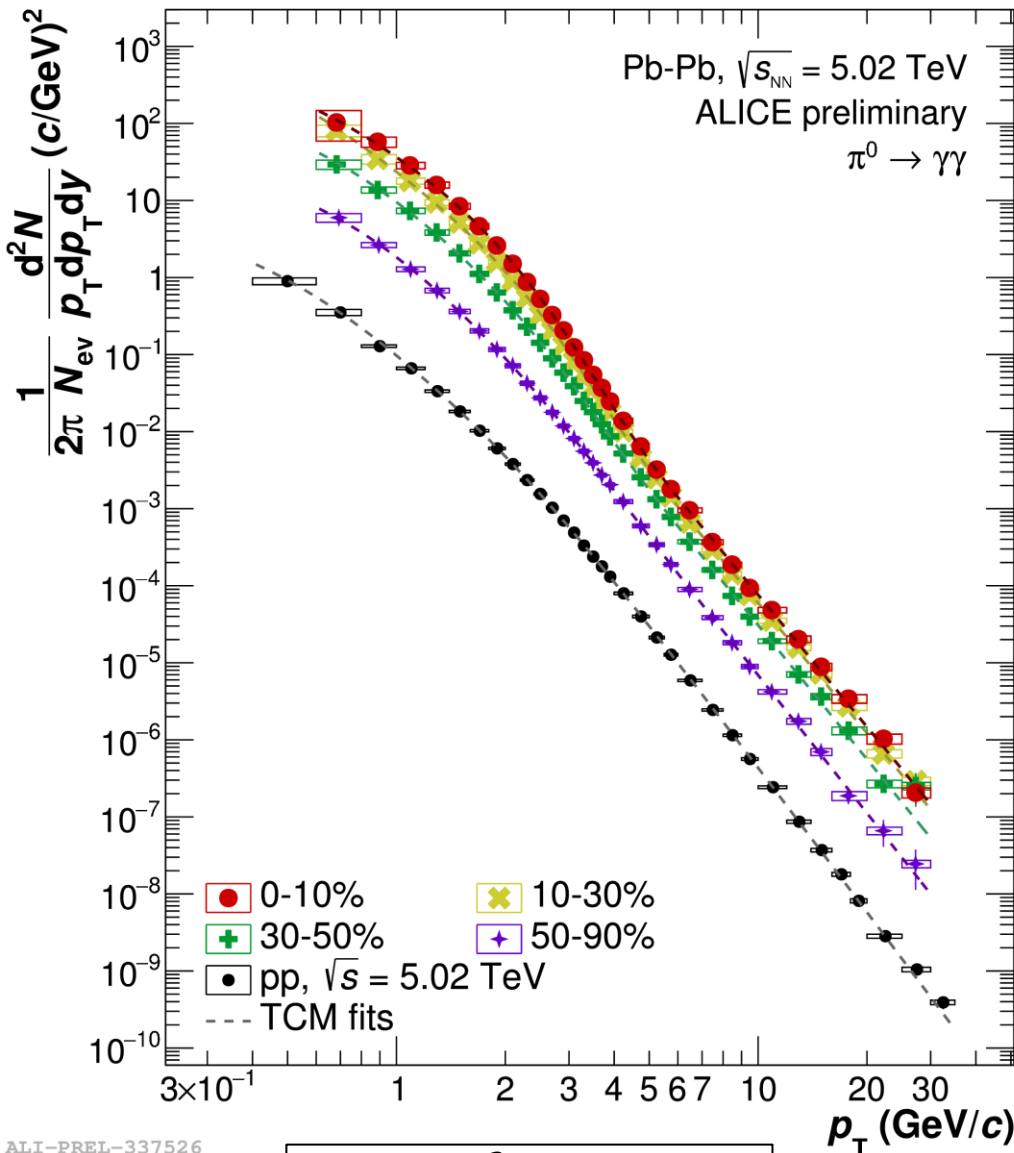
- R_{pPb} : above 10 GeV/c – compatible with unity, at low p_T – strong suppression (CNM effects – CGC/FCEL calculations).



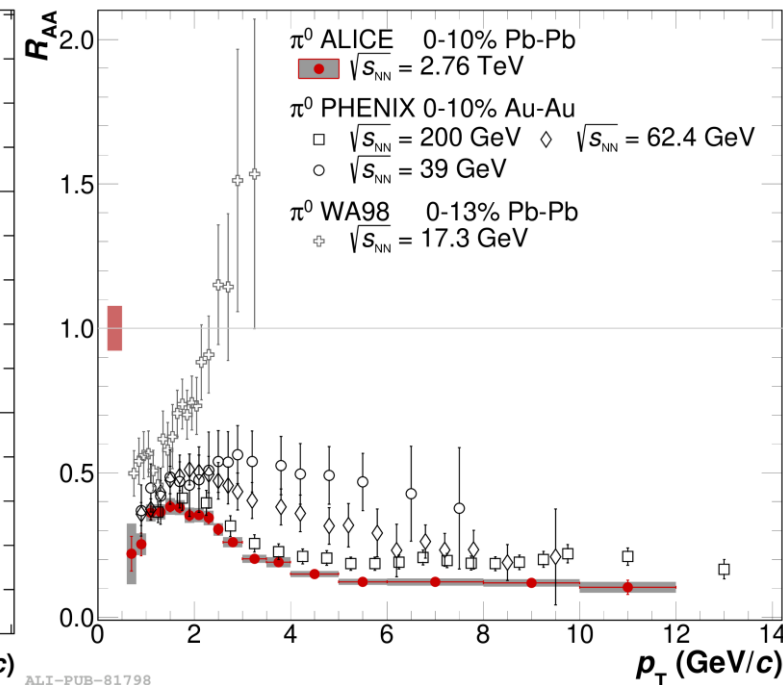
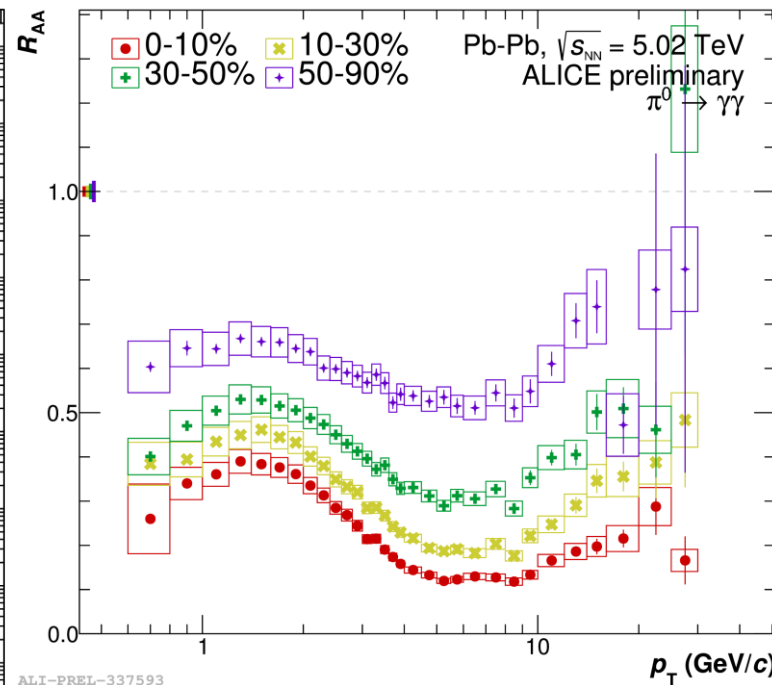
ALI-PUB-522130

$$R_{pPb} = \frac{1}{A} \frac{d^2\sigma_{Pb}}{dp_T dy} / \frac{d^2\sigma_{pp}}{dp_T dy}$$

π^0 meson measurements in Pb–Pb



$$R_{AA} = \frac{d^2 N_{AA} / dp_T dy}{\langle T_{AA} \rangle d^2 \sigma_{pp} / dp_T dy}$$

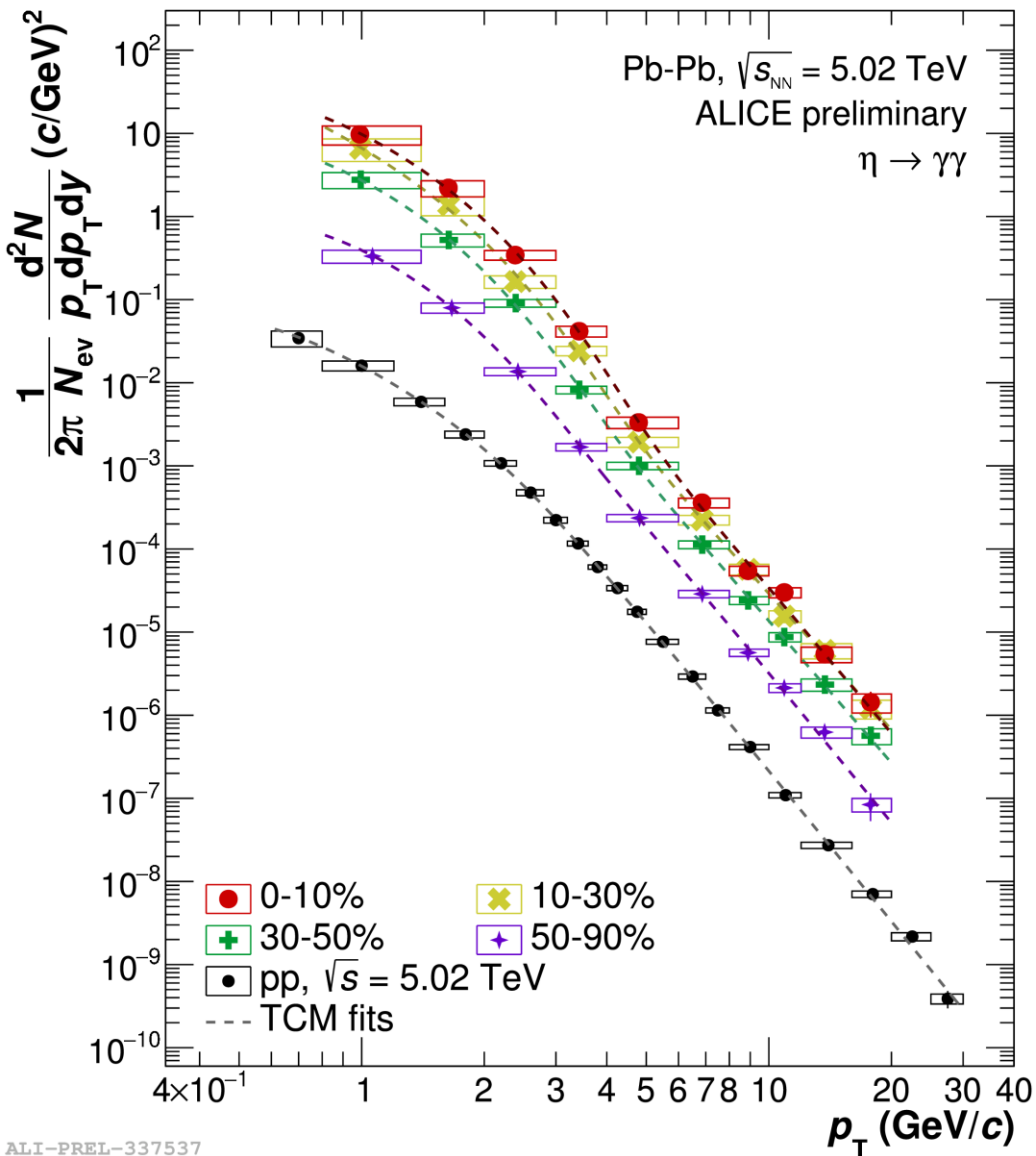


- π^0 spectra measured in 4 centrality classes at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV in Pb–Pb: 0–10%, 10–30%, 30–50% and 50–90%.

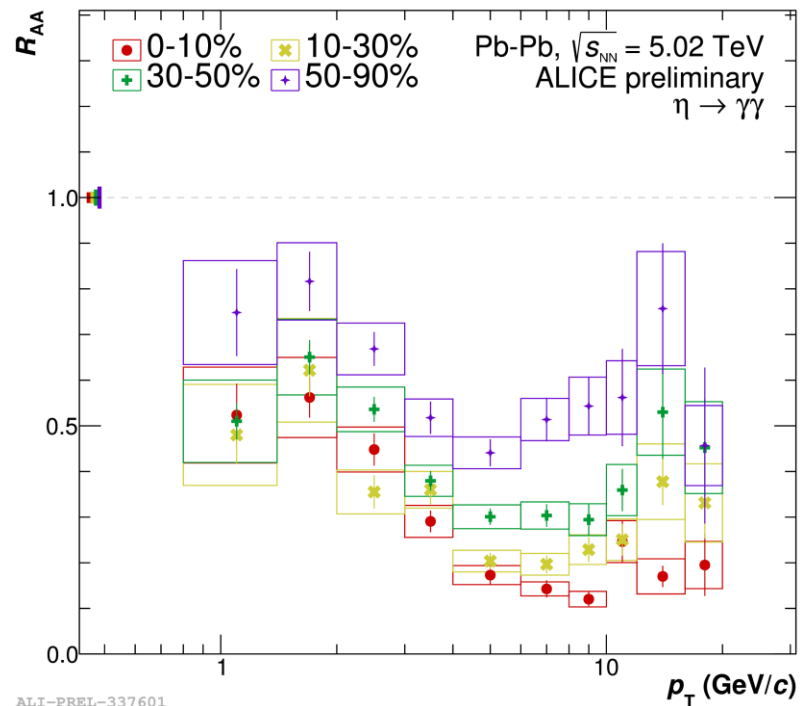
- R_{AA} : suppression is present in all centrality classes reaching the minimum value of ~ 0.1 at $p_T \sim 7$ GeV/c in the most central collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. The effect decreases in peripheral collisions.

- R_{AA} : The same magnitude of suppression at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ and 5.02 TeV. The suppression effect becomes less expressed at lower collision energies (for example, at $\sqrt{s_{NN}} = 17.3$ GeV).

η meson measurements in Pb–Pb

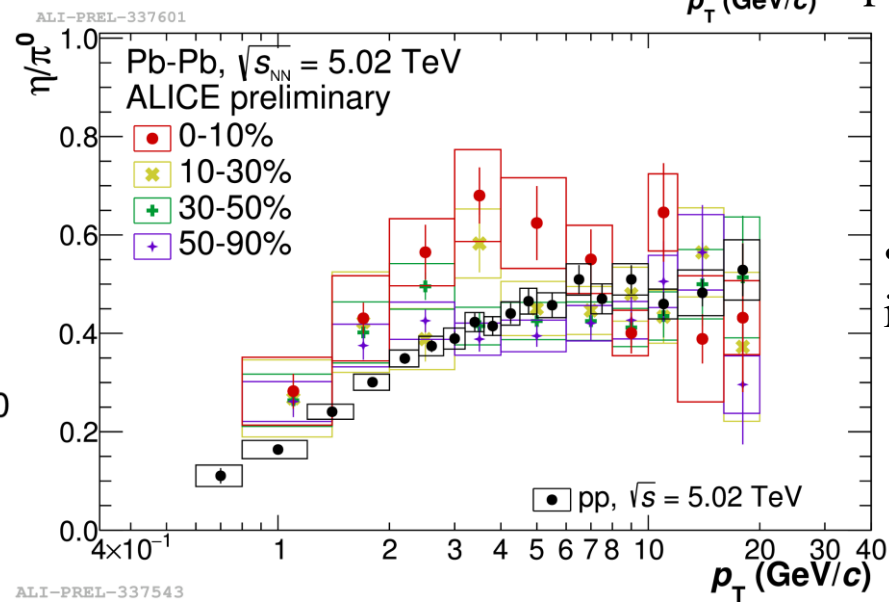


ALI-PREL-337537



- η spectra measured in 4 centrality classes at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV in Pb–Pb: 0–10%, 10–30%, 30–50% and 50–90%.

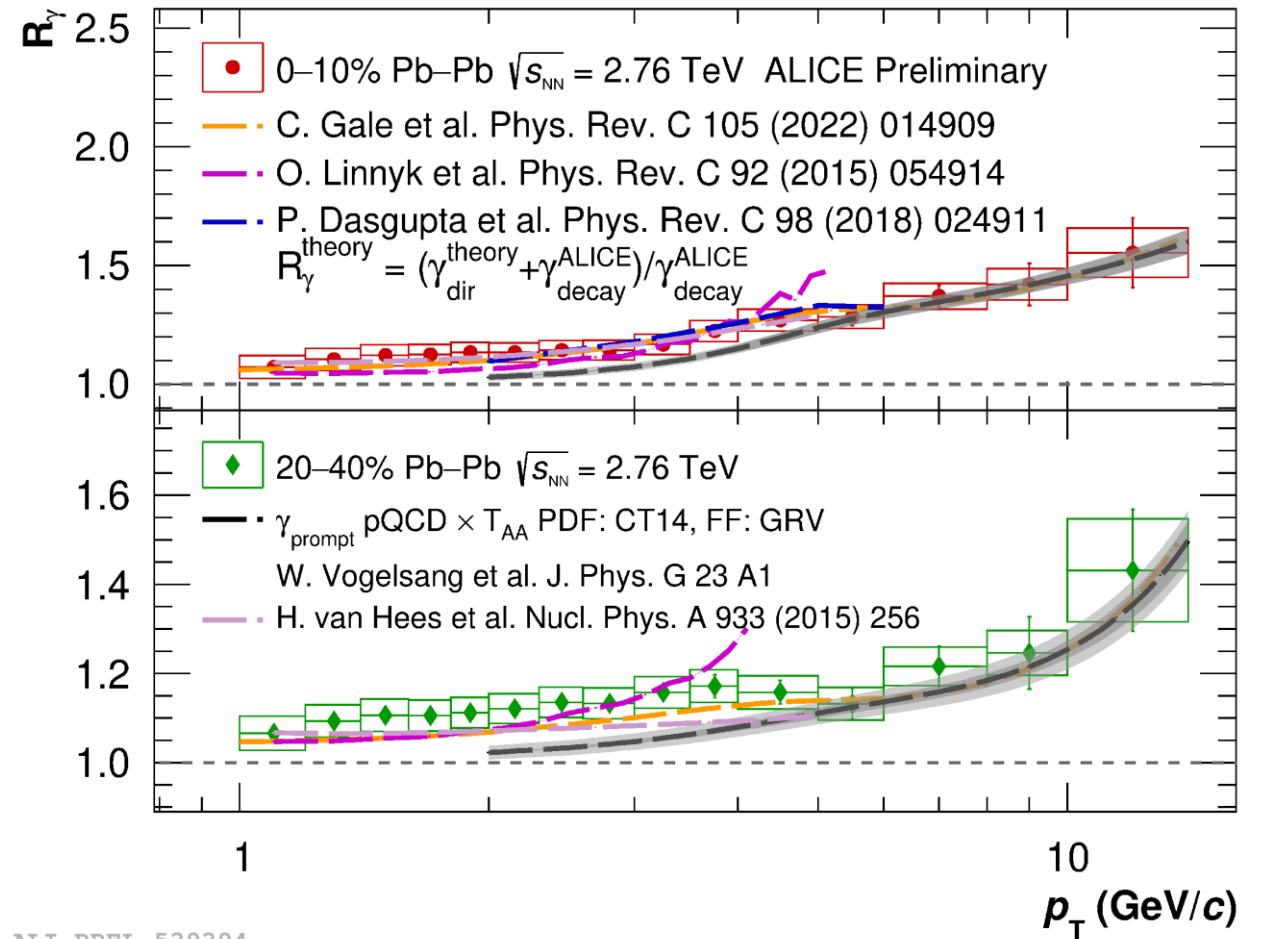
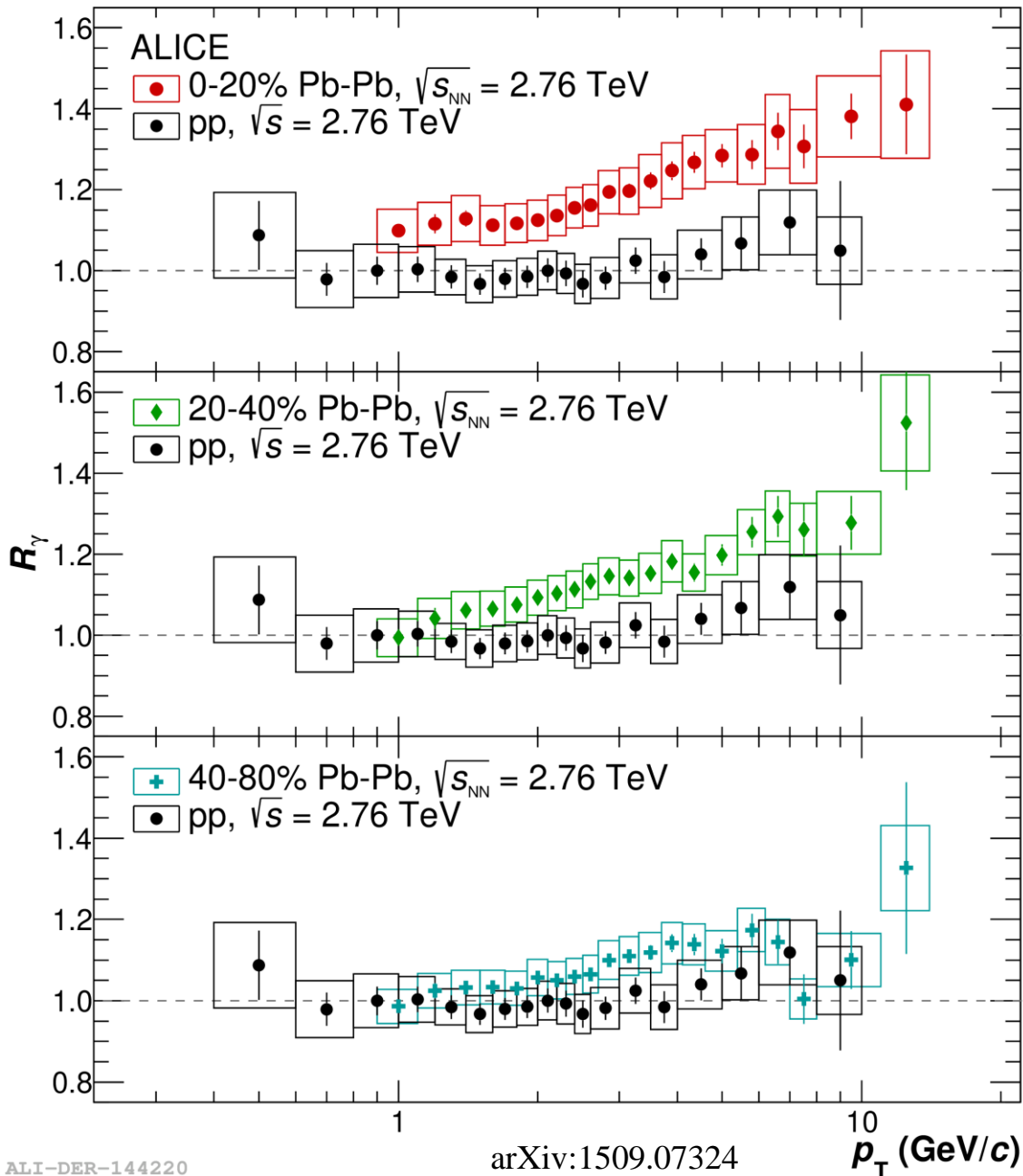
- R_{AA} : suppression is present in all centrality classes reaching the minimum value of ~ 0.1 at $p_T \sim 9$ GeV/c in the most central collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. The effect decreases in peripheral collisions.



- η/π^0 : significant modification in central collisions is observed.

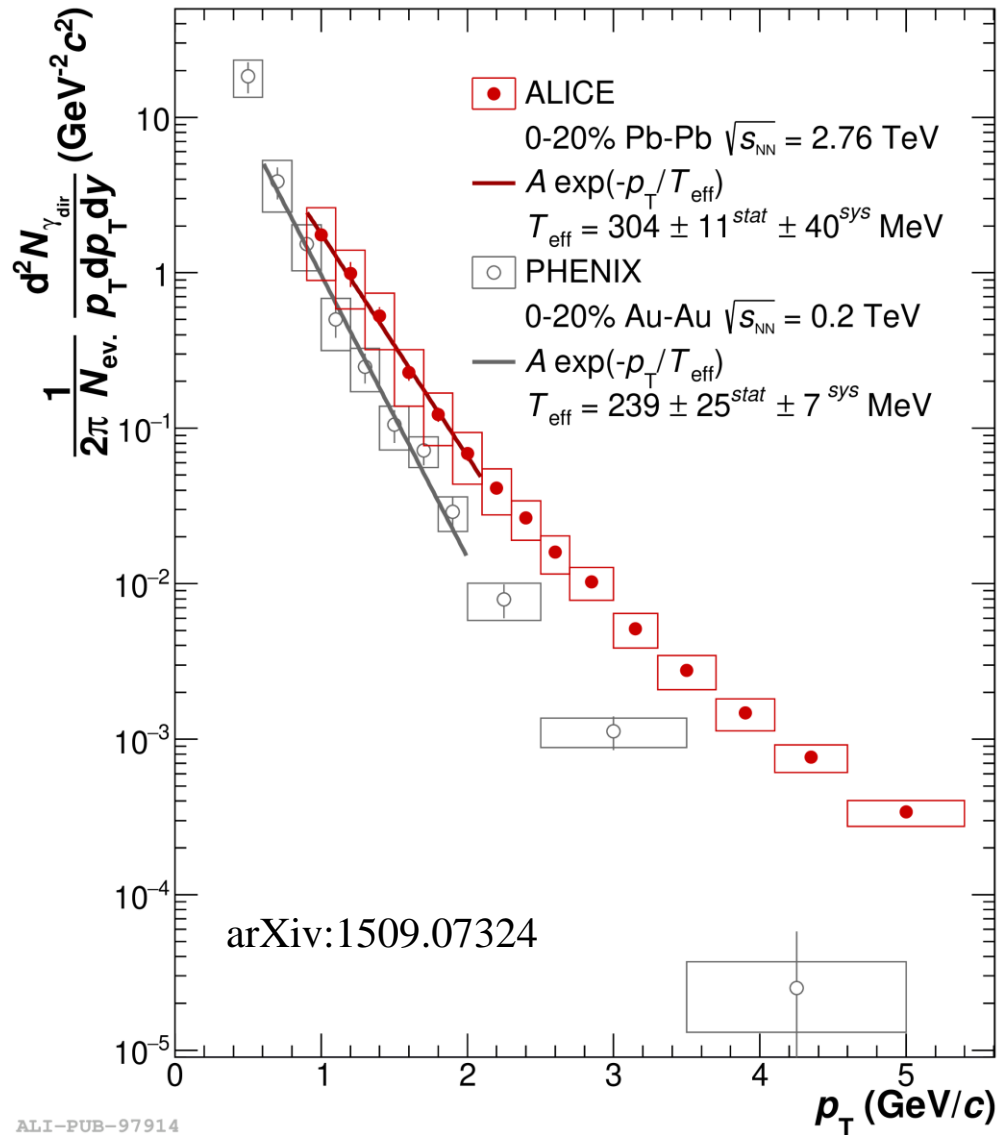
ALI-PREL-337543

Direct photon measurements in Pb–Pb

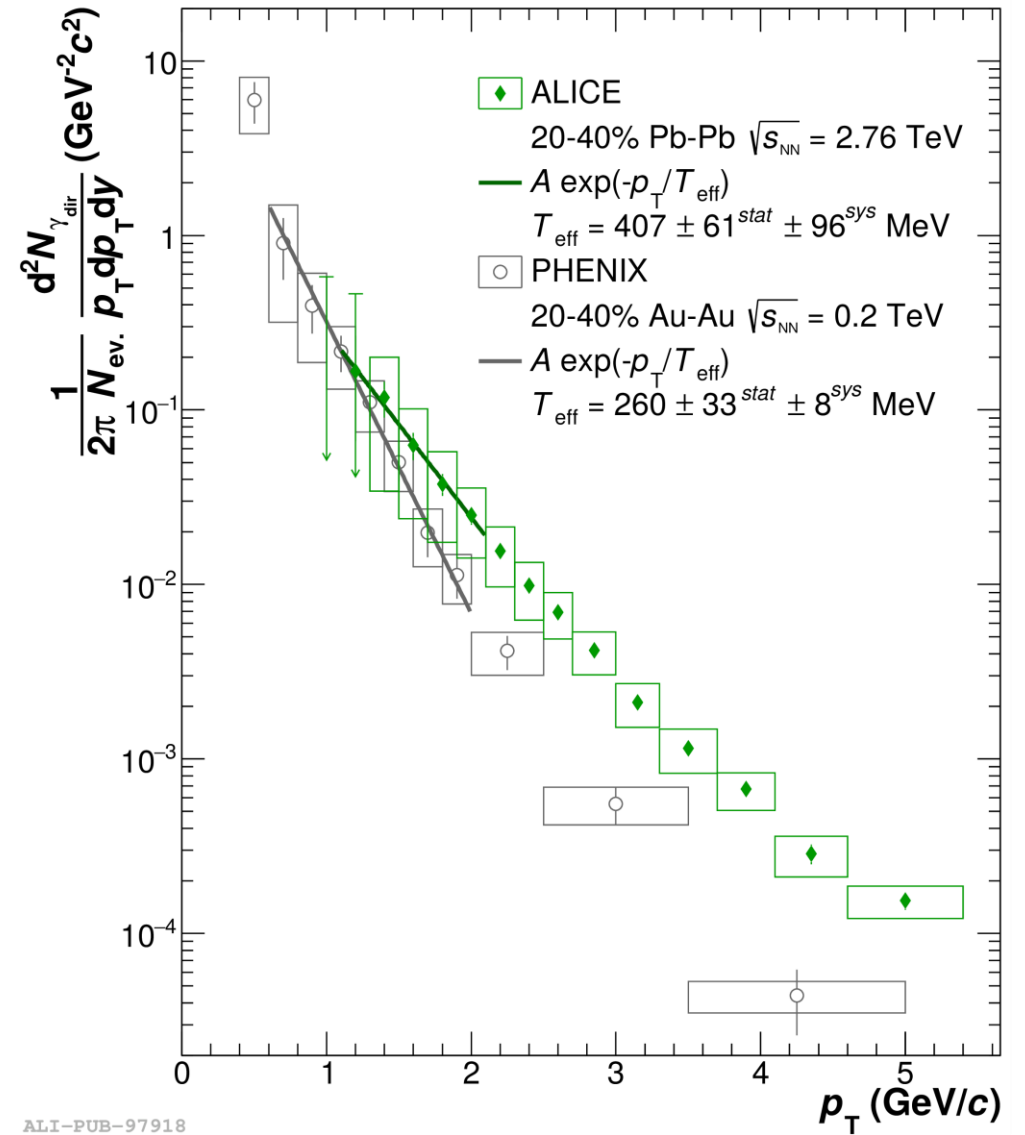


- ALI-PREL-539394
- Measured at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV in 3 centrality classes
 - Low p_T (< 3 GeV/c) – ~8-15% excess in 0-20%, ~9% in 20-40%, underpredicted by hydrodynamical models
 - High p_T (> 4 GeV/c) – in agreement with NLO pQCD

Direct photon measurements in Pb–Pb



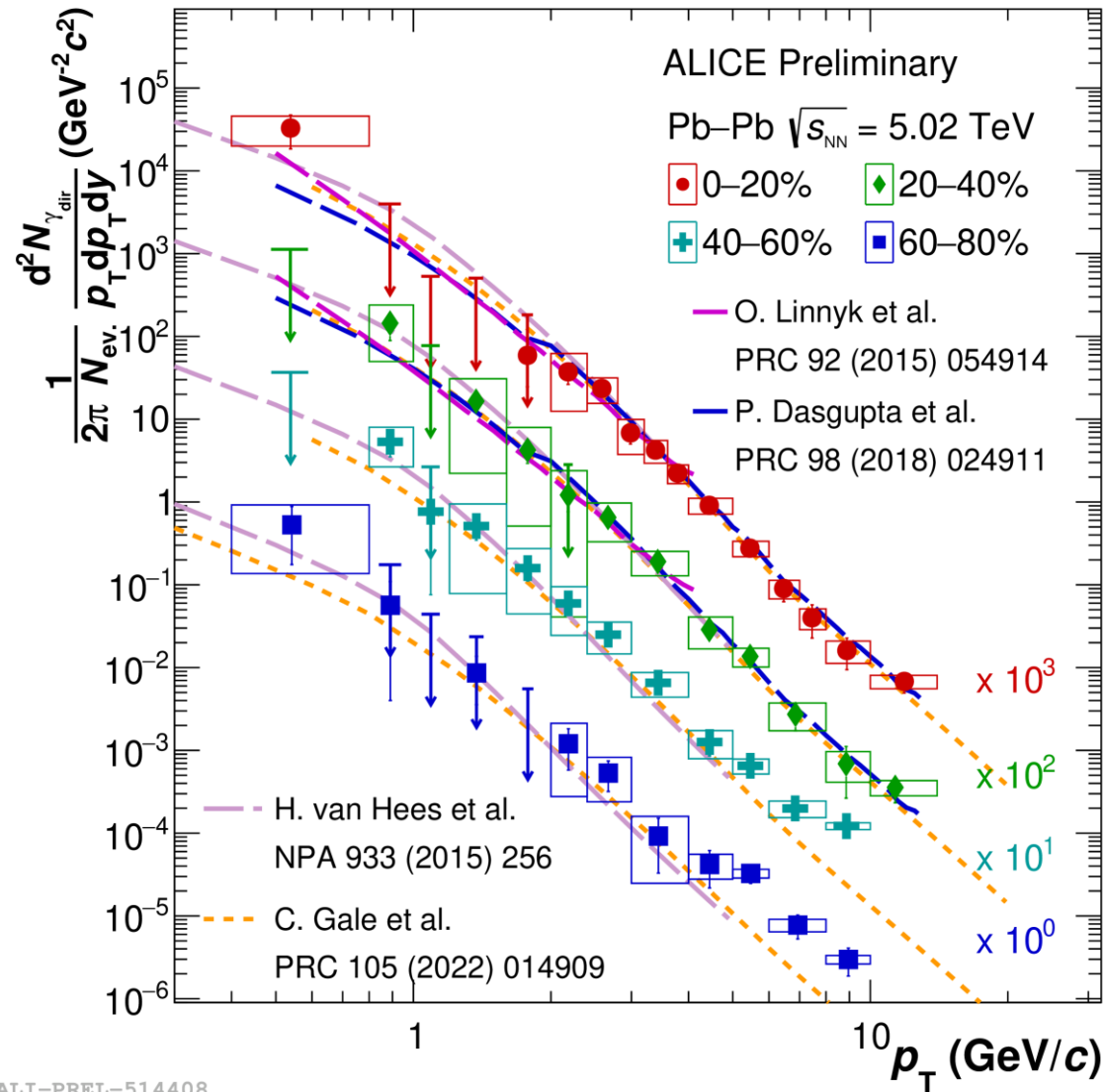
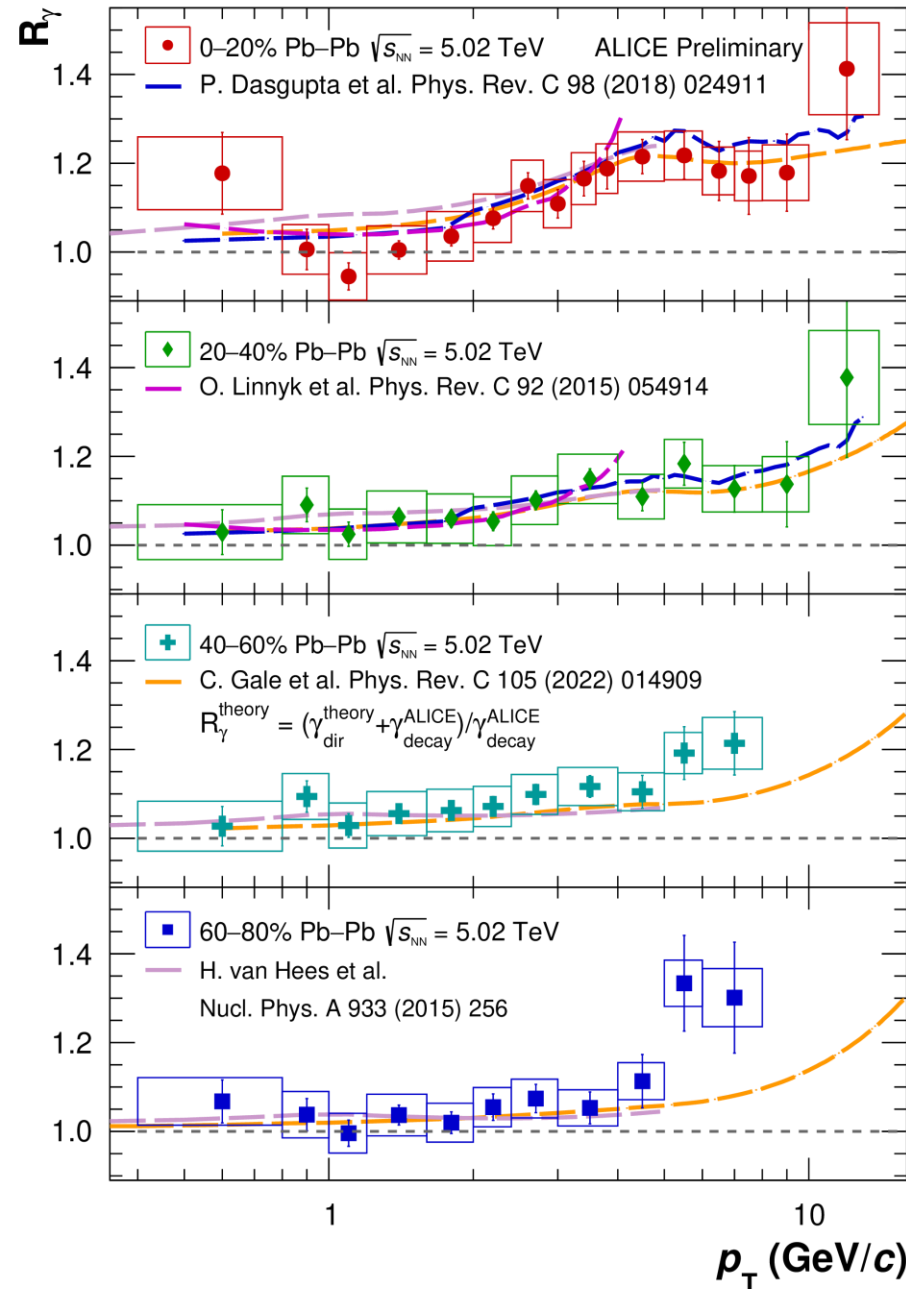
ALI-PUB-97914



ALI-PUB-97918

- **Effective temperature** can be extracted from the low- p_T part of the spectrum
- Both **absolute yield** of direct photons and **effective slope increase** with increasing of the collision energy

Direct photon measurements in Pb–Pb

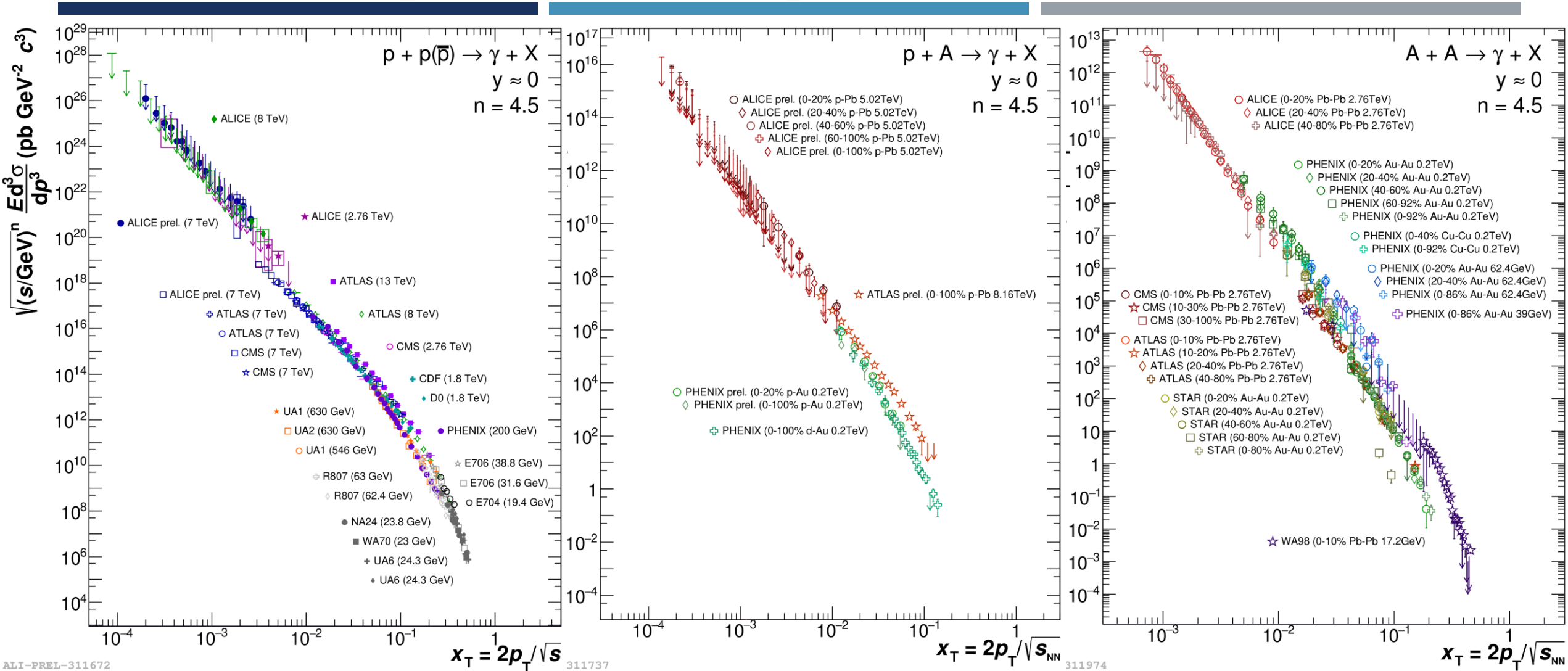


ALI-PREL-514408

- Measured at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV in 4 centrality classes**
- Low p_T (< 2 GeV/c)** – compatible with 1, **no excess** is visible (at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV it was obtained).
- High p_T (> 3 GeV/c)** – excess of prompt photons

- Hydrodynamic calculations** containing prompt and thermal photons are **consistent with data** in both low and high p_T regions.

Compilation of direct photon measurements



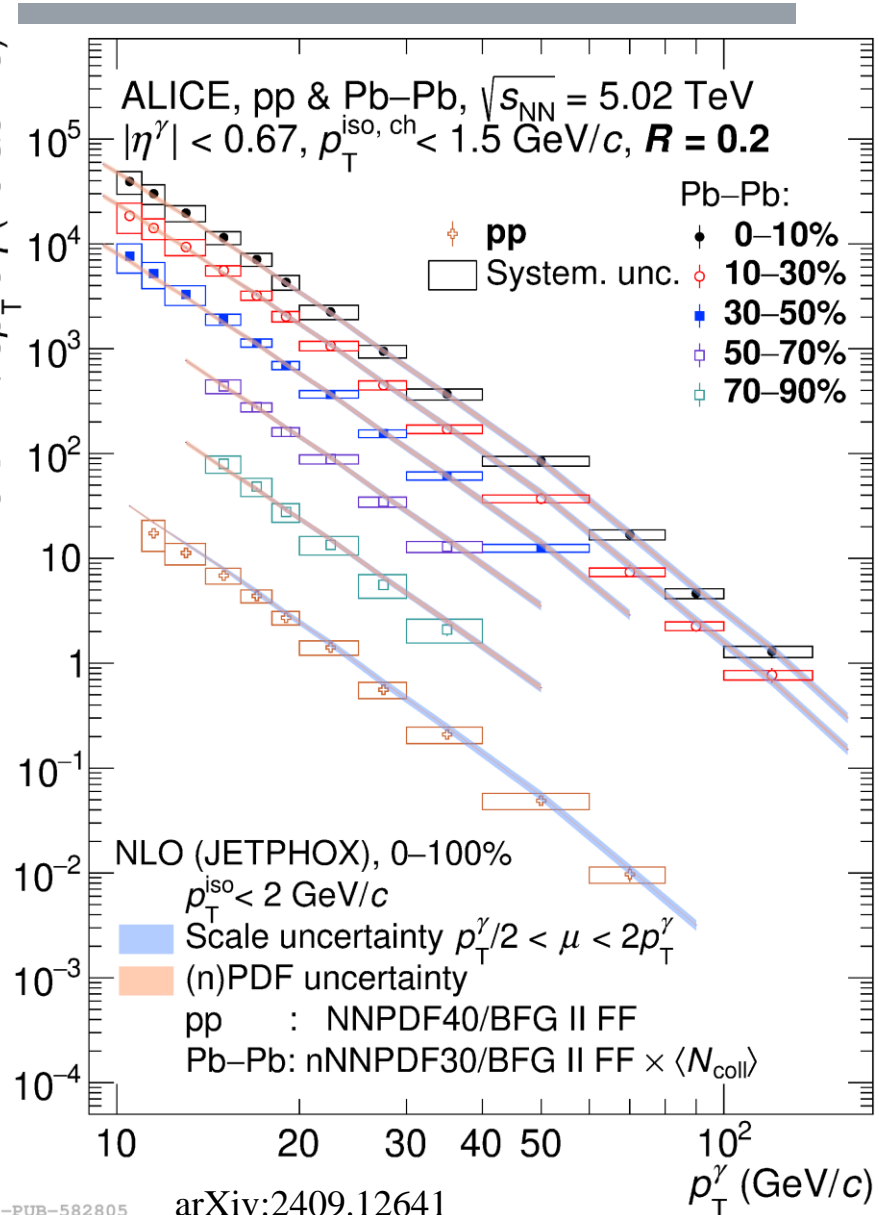
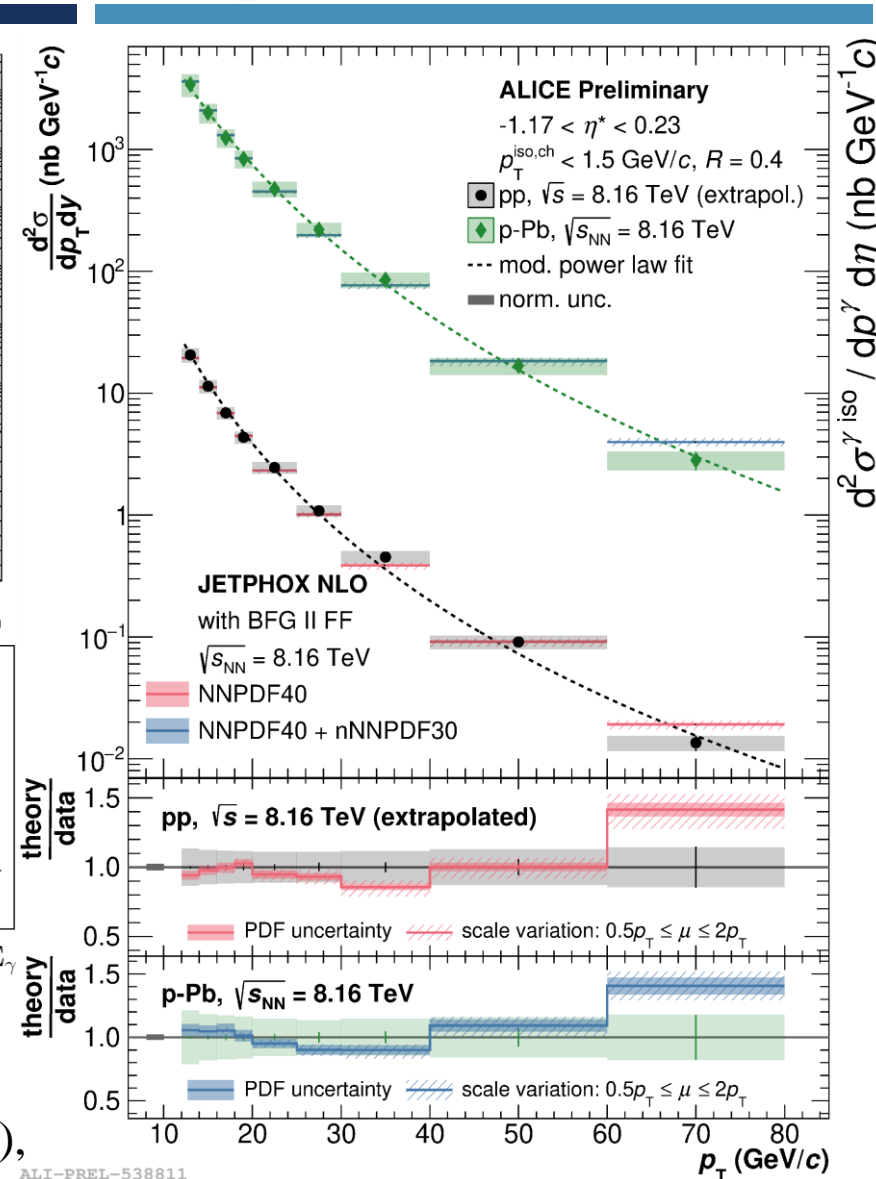
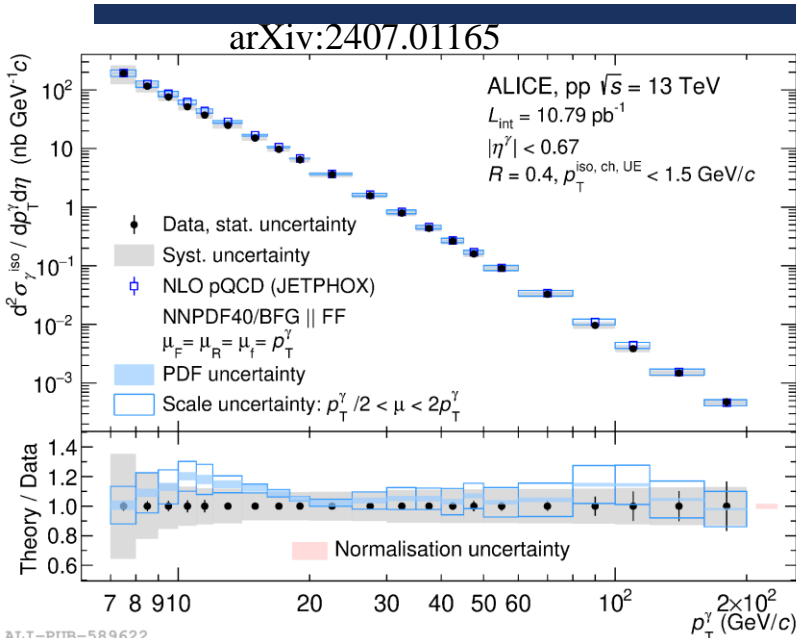
ALI-PREL-311672

311737

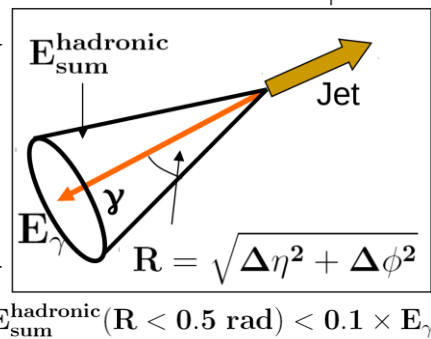
311974

- **Universal scaling** with x_T if scaled by $\sqrt[n]{s}$ ($\sqrt[n]{s_{NN}}$) with $n = 4.5$
- **Direct and isolated photon** results are included (both published and preliminary)
- In **pp** collisions – large variety of results available from $\sqrt{s} = 19.4 \text{ GeV}$ to $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ for isolated direct photons, data are aligned on a **common x_T curve**; in **p–Pb** and **Pb–Pb** collisions – **not as clear scaling** as in pp collisions

Isolated photon measurements



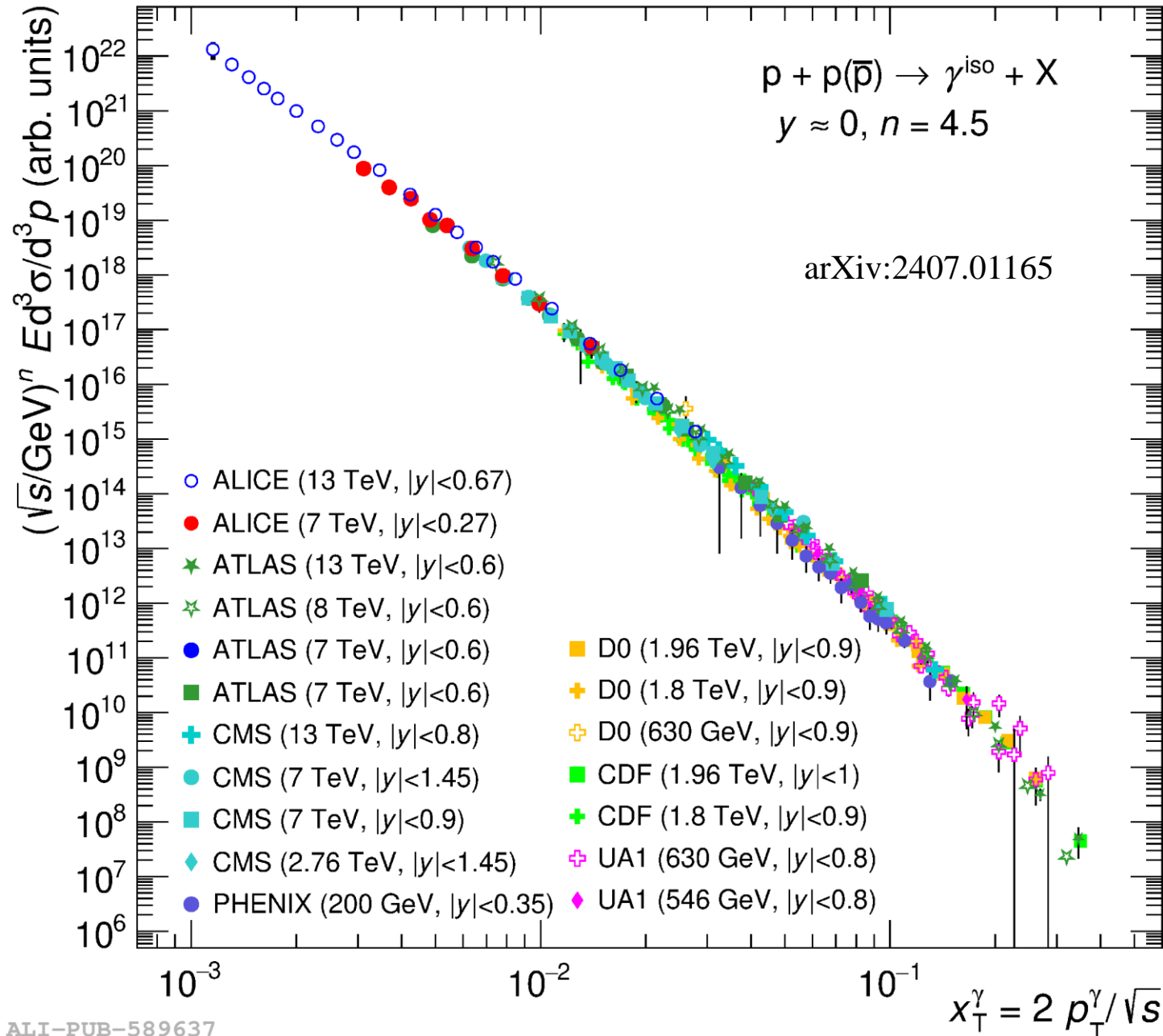
- Another method of studying direct photons is the measurement of **isolated photons** — photons with no hadron activity in cone with radius R .



- Systems — **pp (5.02, 7, 8, and 13 TeV)**, **p-Pb (5.02 and 8.16 TeV)** and **Pb-Pb (5.02 TeV)**

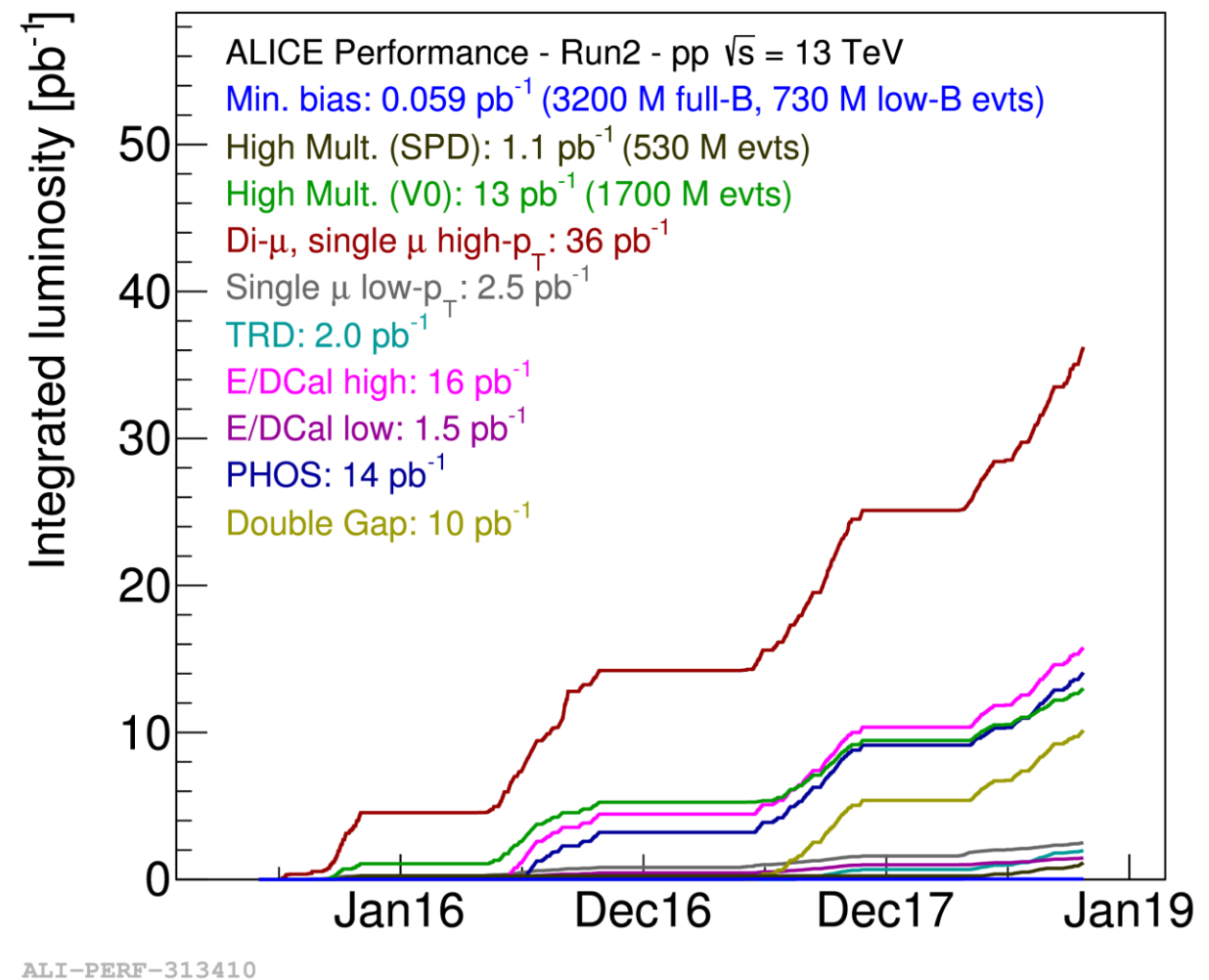
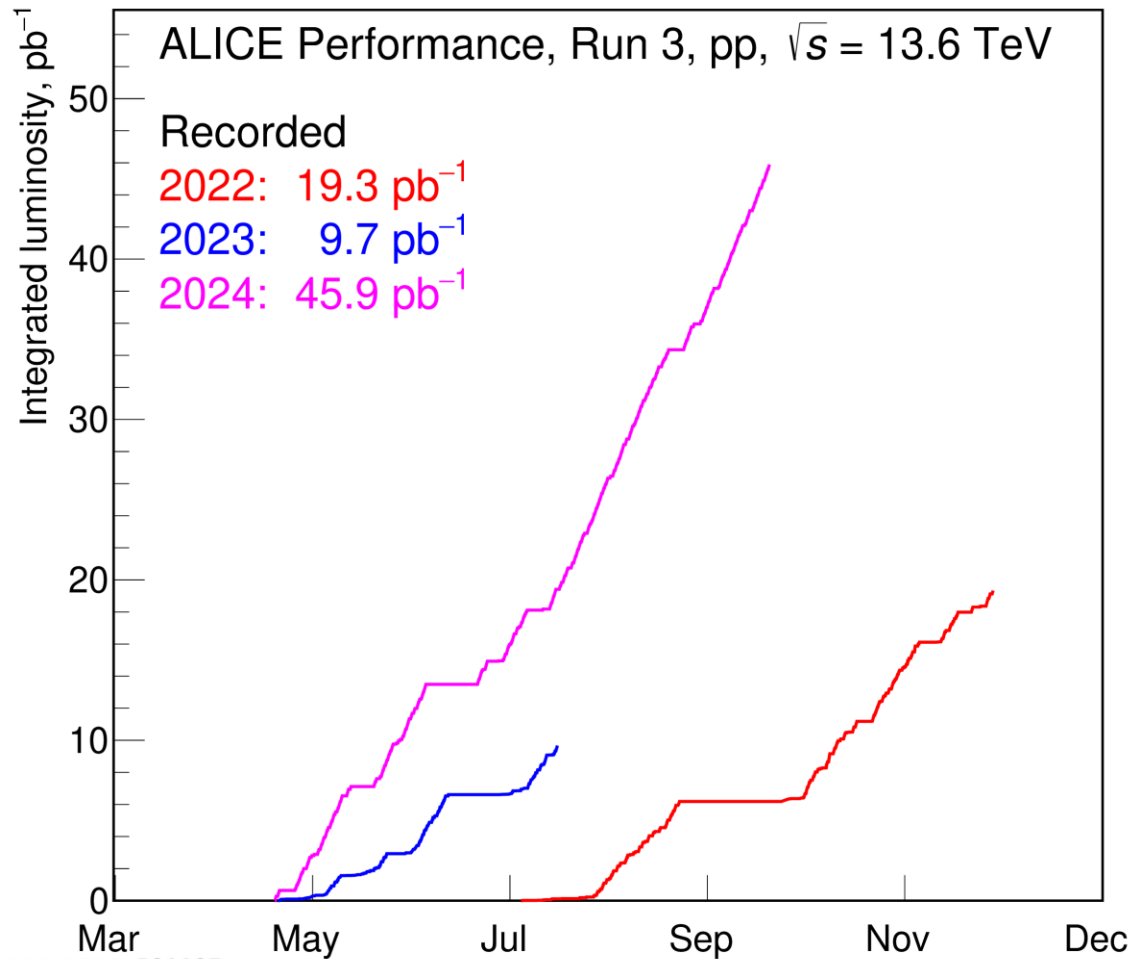
- ALICE measurements **extend the p_T range** to lower values in comparison with previous CMS and ATLAS measurements
- The measurements are consistent with NLO pQCD predictions

Compilation of isolated photon measurements in pp



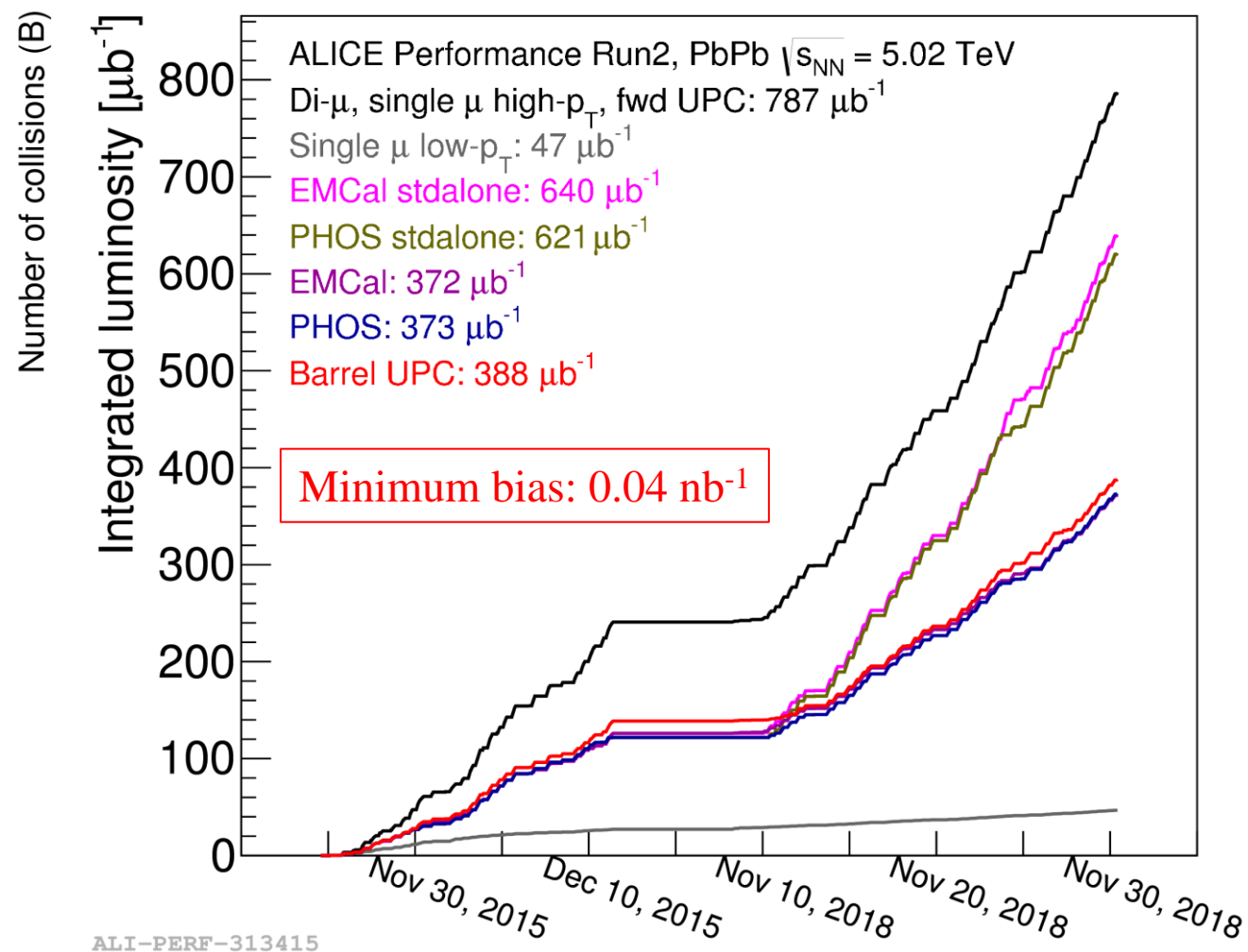
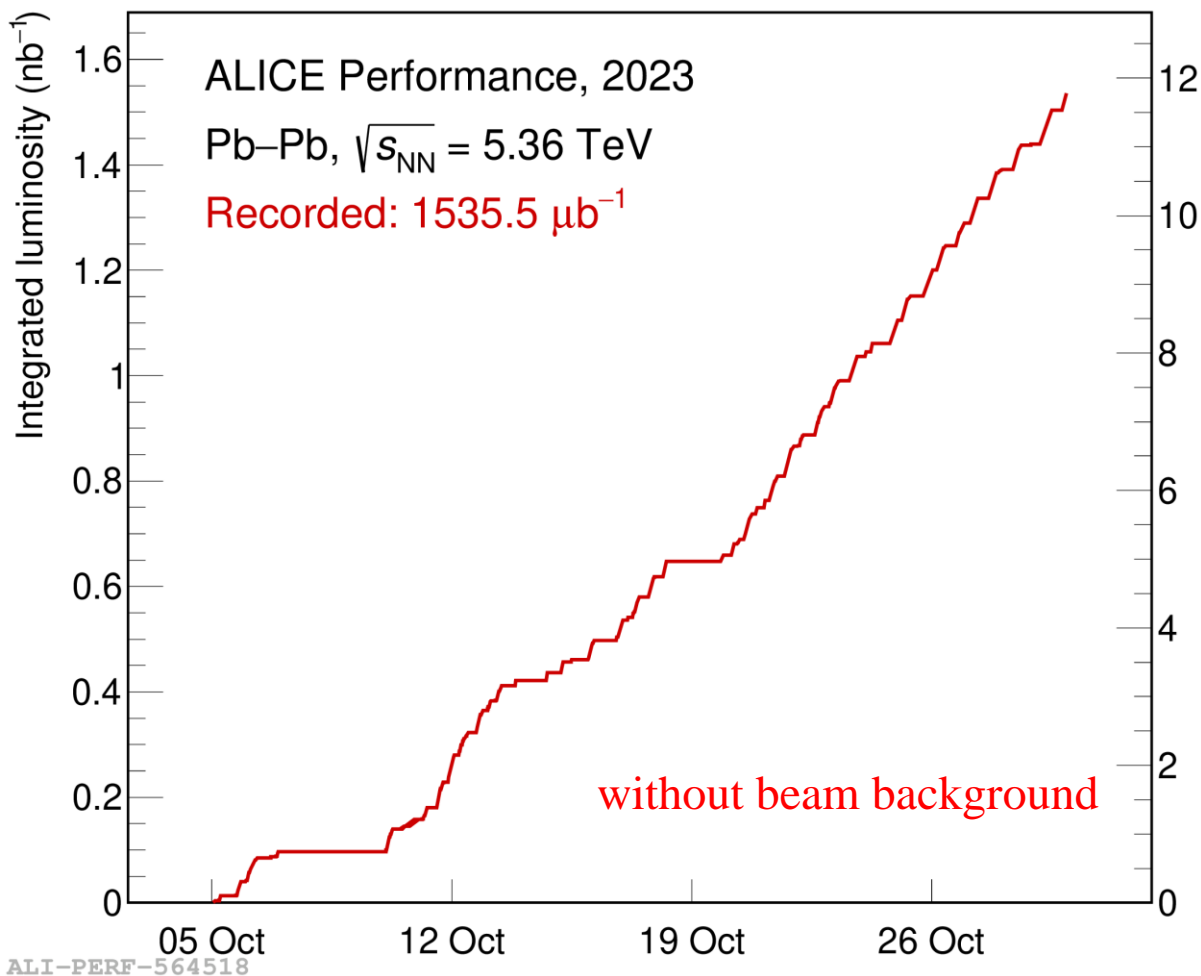
- ALICE data compared to previous measurements of isolated-photon spectra in pp and p \bar{p} collisions as a function of x_T where the invariant cross sections have been scaled by $\sqrt[n]{s}$ with $n = 4.5$
- **Lowest x_T** at midrapidity is obtained with the recent ALICE 13 TeV pp measurements – from $\sim 10^{-3}$ to 10^{-1} .
- Helps to put additional constraints to the gluon PDF at low Bjorken- x

ALICE pp statistics in Run 3



As of 19.09.24 the collected integrated luminosity exceeded **75 pb⁻¹**, which is equal to more than **5·10¹²** minimum bias collisions. It is more than the total collected pp data during Run 1+2. In 2024 **about 55 pb⁻¹** pp collisions are expected.

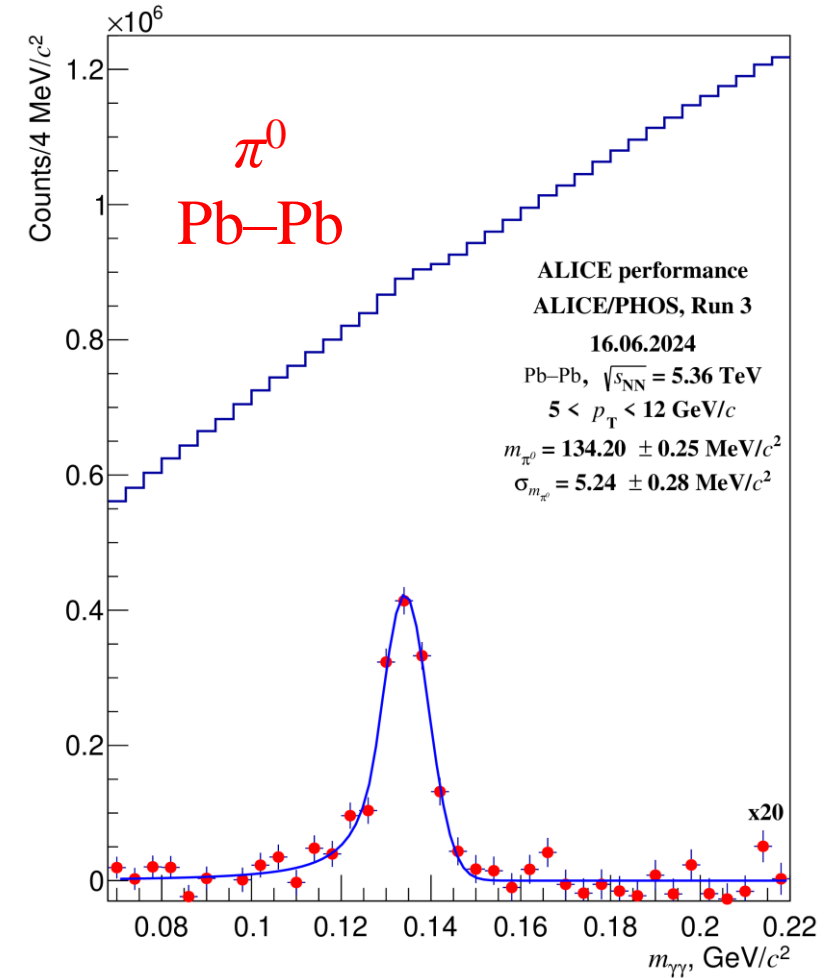
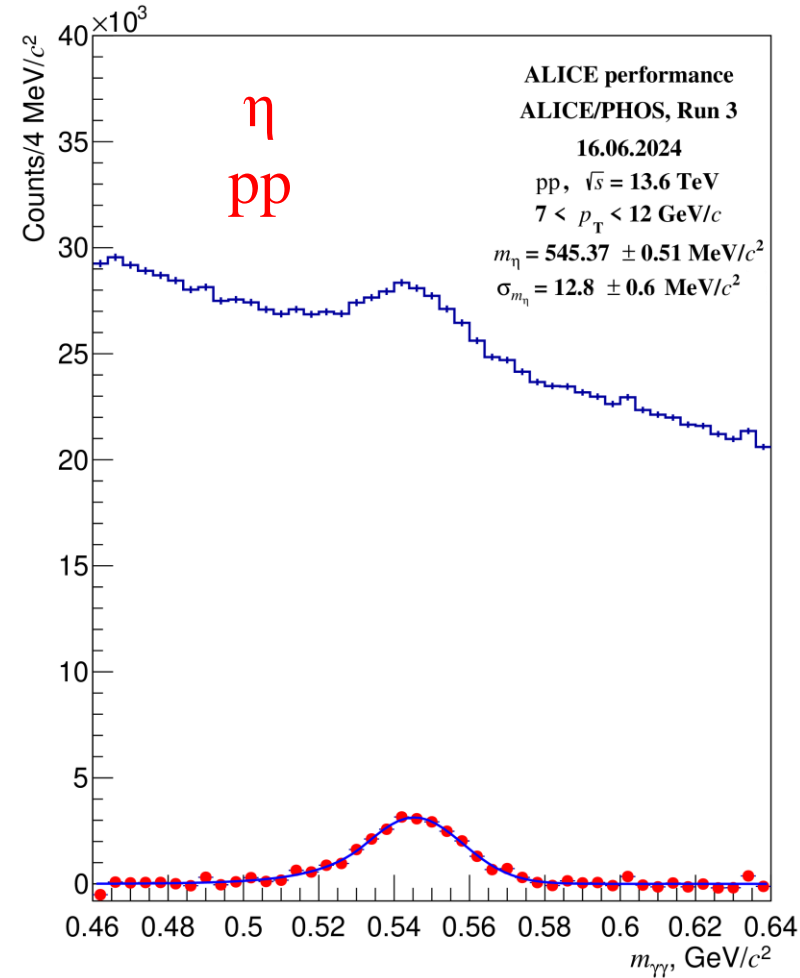
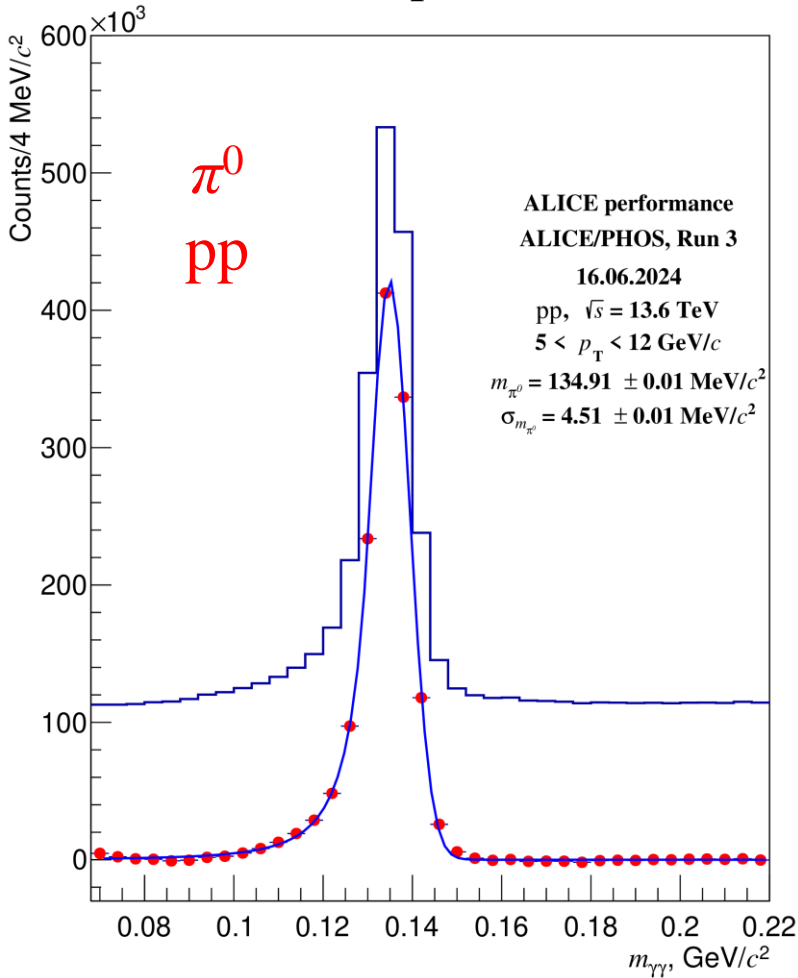
ALICE Pb–Pb statistics in Run 3



At the end of 2023 1.54nb^{-1} of the Pb–Pb collisions were recorded, which is equal to more than $12 \cdot 10^9$ minimum bias collisions. It is **40 times** more than the total collected Pb–Pb data during Run 1+2. In 2024 **about 1.2–1.9 nb^{-1}** Pb–Pb collisions are expected.

PHOS performance in Run 3

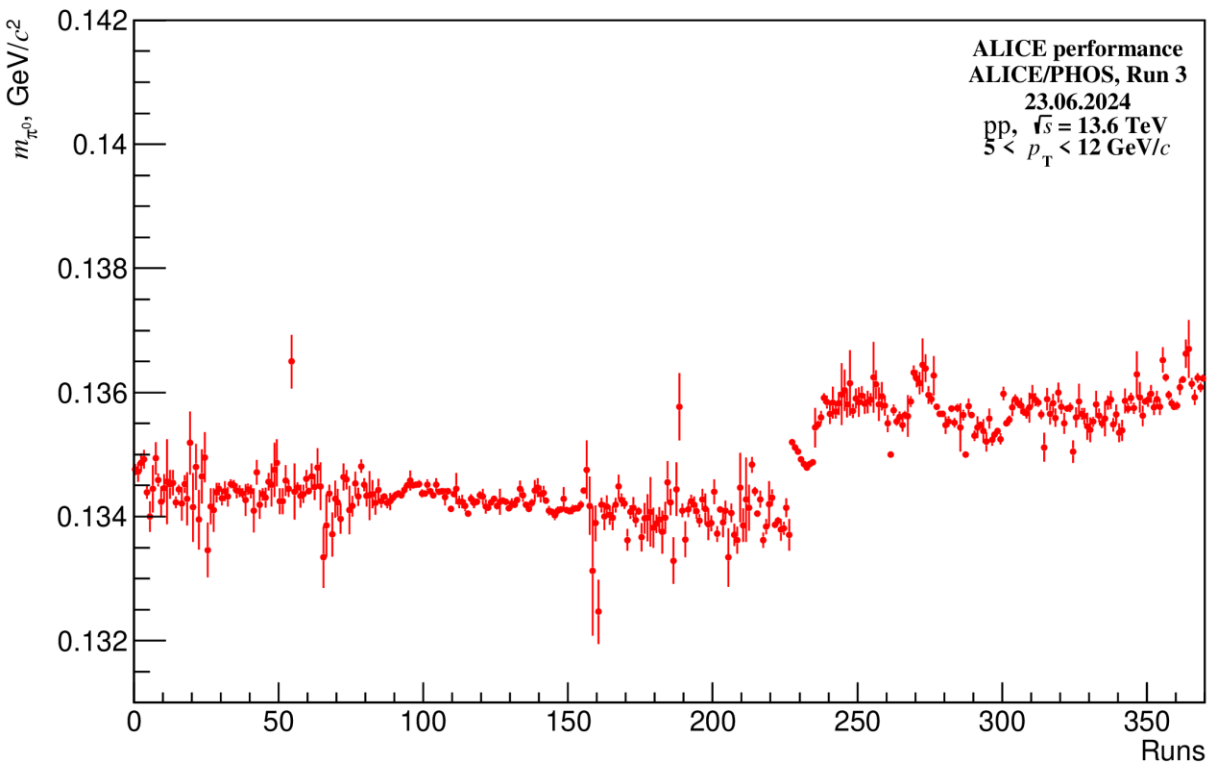
The best example invariant mass distributions



- Cluster selection is: $E_{clu} > 0.3 \text{ GeV}$, $t_{clu} \in [-50, 100] \text{ ns}$, $p_T \in [5, 12] \text{ GeV}/c$.
- **Clear π^0 and η peaks are observed in pp and Pb–Pb collisions.**
- π^0 peak is at its PDG position ($134.9 \text{ MeV}/c^2$) with good mass resolution ($\sigma_m^{\pi^0} = 4.51 \pm 0.01 \text{ MeV}/c^2$).

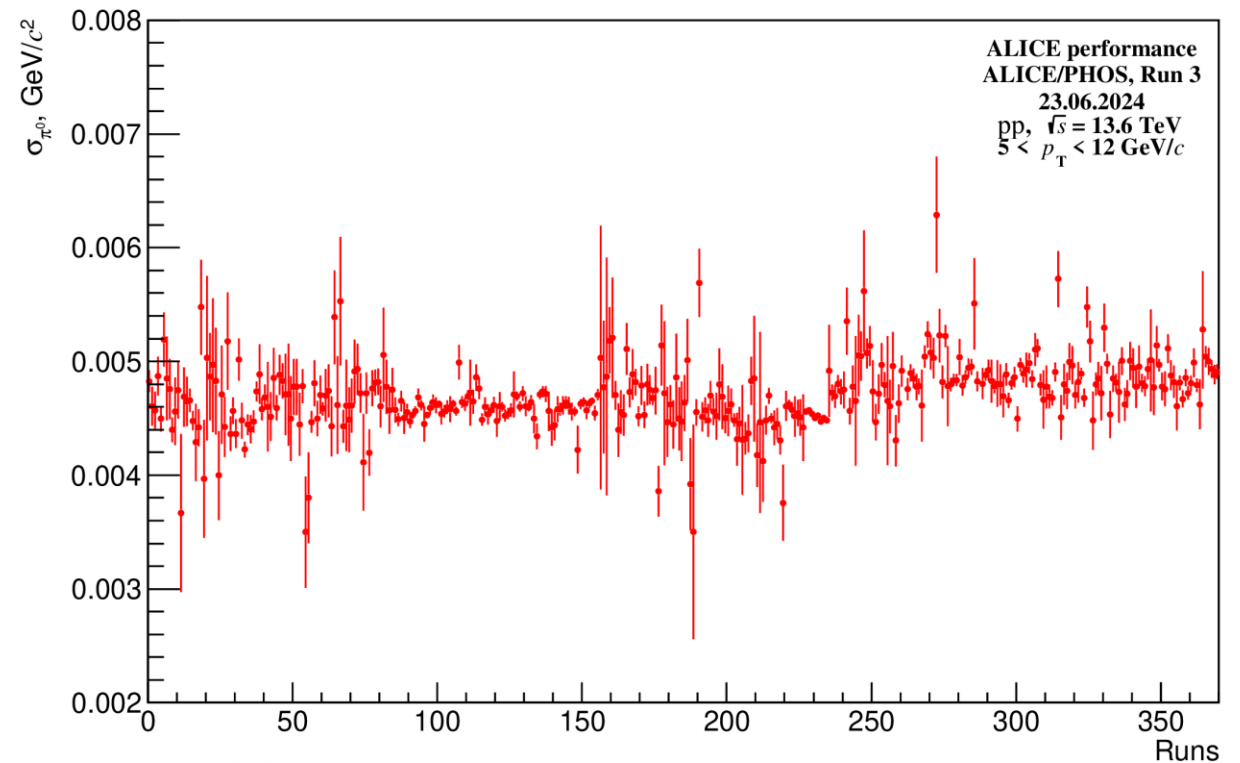
PHOS performance in Run 3

π^0 peak position per run



ALI-PERF-575675

π^0 width per run

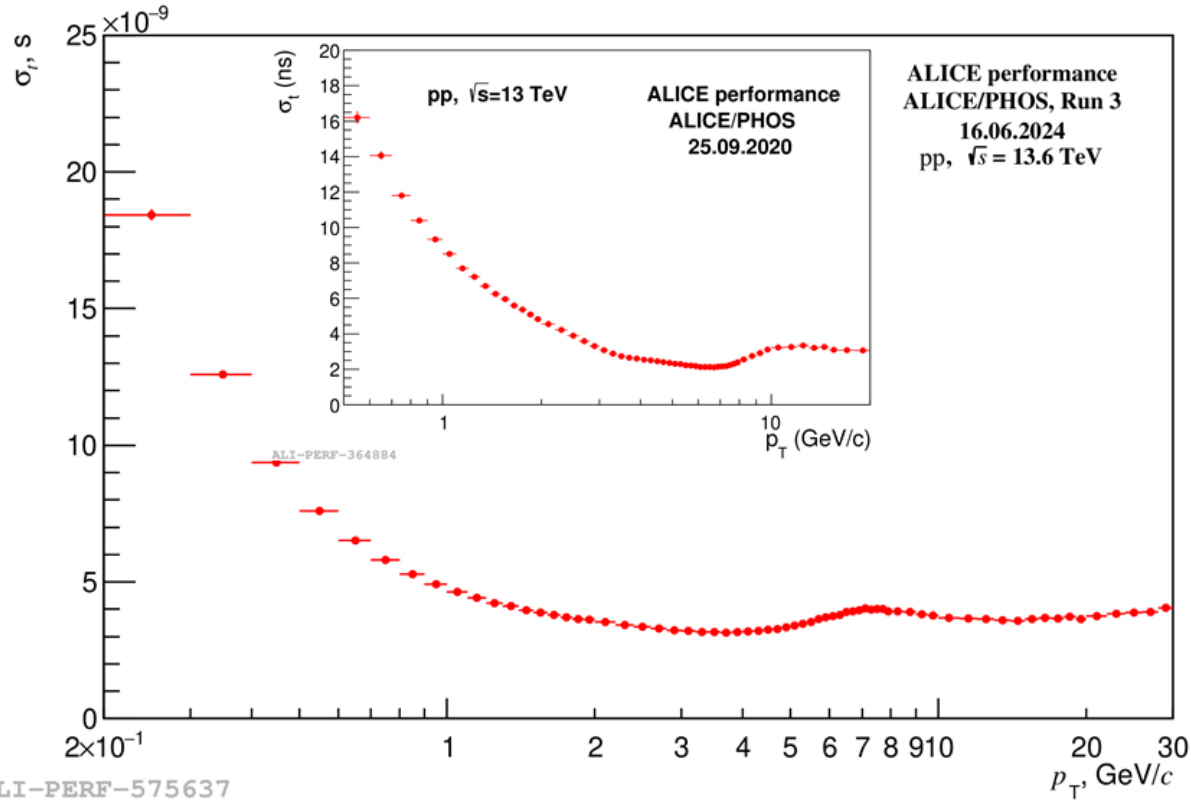


ALI-PERF-575679

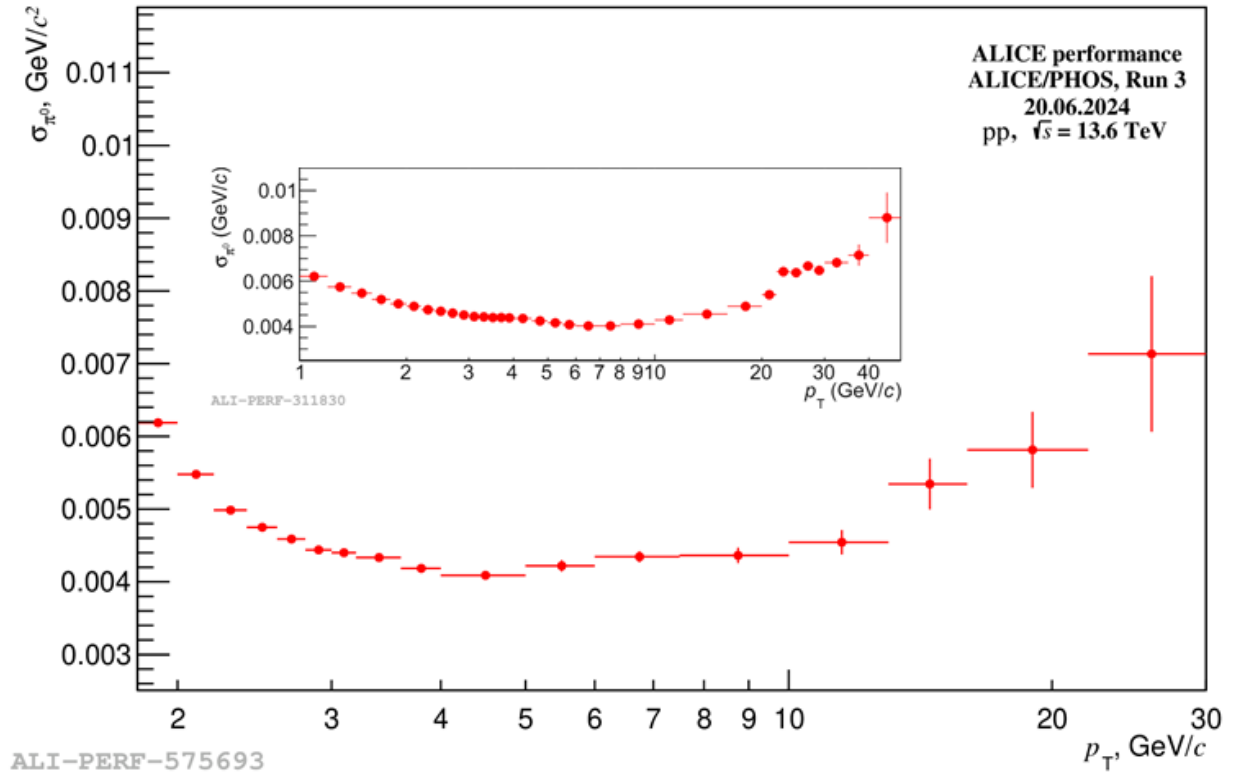
In order to check the long-term stability of the π^0 peak, its position and width were calculated in all available runs from 2023-2024. On average the π^0 peak position is stable (within $\sim 0.5 \text{ MeV}/c^2$), which is also true for its width ($\sim 4.6 \text{ MeV}/c^2$).

PHOS performance in Run 3

Time resolution



π^0 width vs. p_T



- **Time resolution** remains modest in Run 3 (only suitable for pileup rejection from subsequent bunch crossings)
- It improved below 2 GeV/c due to better signal fitting techniques: $\sigma_t^{\text{Run 2}} = 8.5$ ns, $\sigma_t^{\text{Run 3}} = 4.5$ ns at $p_T = 1$ GeV/c.

- The minimum value $\sigma \approx 4$ MeV/c² of the π^0 peak is reached at $p_T = 3.5 - 6$ GeV/c.
- The achieved mass resolution in Run 3 for $p_T > 1.7$ GeV/c is currently $\sigma_m^{\pi^0} = 5.34 \pm 0.01$ MeV/c², while in Run 2 it was $\sigma_m^{\pi^0} = 4.56 \pm 0.03$ MeV/c².