

Измерение спектров анти- $\Sigma^\pm$ -гиперонов с помощью электромагнитного калориметра PHOS эксперимента ALICE

Гордеев Павел

Научный руководитель: Блау Д. С.



Москва 2025



Цель и задачи

Цель

- Измерение спектров анти- $\Sigma^{\pm}$ гиперонов в pp и p–Pb столкновениях при энергии 5.02 ТэВ

Задачи

- Разработать метод реконструкции и идентификации антинейтронов с помощью электромагнитного калориметра PHOS
- Получить спектры анти- $\Sigma^{\pm}$ гиперонов и сравнить с имеющимися Монте-Карло моделями

Актуальность исследования

- Изучение выходов странных частиц в различных столкновениях изучались через K , Λ , Ξ и Ω , но не Σ
- Σ гипероны несут существенную долю странности ($\sim 1/3$ от Λ) в событии и являются наглядным сигналом образования КГП
- Валидация Монте-Карло моделей и понимание механизмов образования Σ гиперонов
- Измерение корреляций N - Σ должно пролить свет на присутствие Σ гиперонов в нейтронных звездах и ограничение их Equation-of-State
- Однако, измерение - трудная задача, так как в распадах присутствует нейтральные частицы, что требует калориметров высокого разрешения или использования метода конверсии фотонов (PCM)
- Разработка метода реконструкции антинейтрона

$$\Sigma^+ = uus$$

$$m = 1189.37 \pm 0.07 \text{ MeV}/c^2$$

$$\Sigma^+ \rightarrow p\pi^0 (51.57 \pm 0.30) \%$$

$$\Sigma^+ \rightarrow n\pi^+ (48.31 \pm 0.30) \%$$

$$\bar{\Sigma}^- \rightarrow \bar{n}\pi^-$$

$$\Sigma^- = dds$$

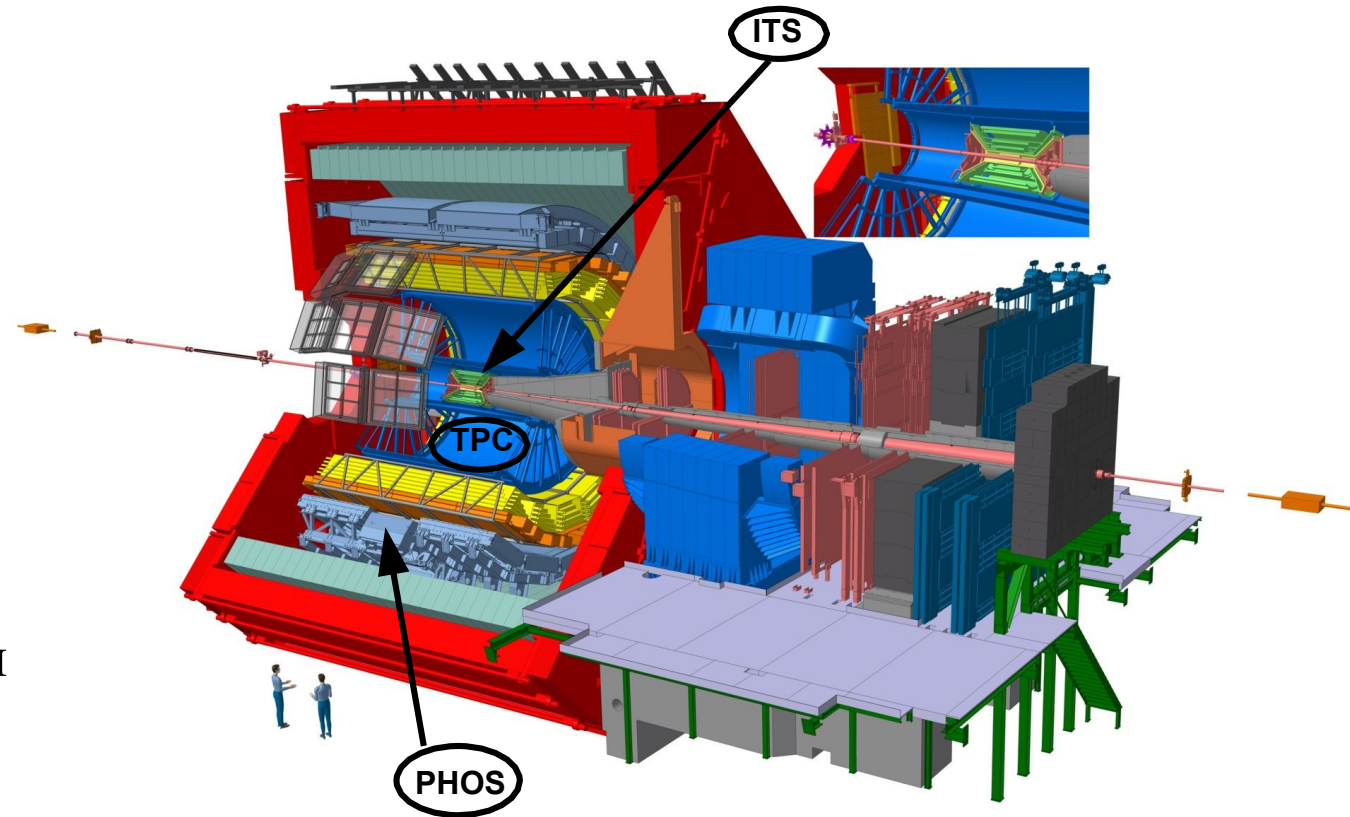
$$m = 1197.449 \pm 0.030 \text{ MeV}/c^2$$

$$\Sigma^- \rightarrow n\pi^- (98.848 \pm 0.005) \%$$

$$\bar{\Sigma}^+ \rightarrow \bar{n}\pi^+$$

Детектор ALICE

- ITS, TPC основные детекторы, которые используются для реконструкции треков и идентификации заряженных частиц
- ITS (Inner Tracking System) - центральный детектор, окружающий ионопровод
- TPC (Time-Projection Chamber) - основной детектор в центральном барреле ALICE, предназначенный для трекинга и идентификации заряженных частиц
- PHOS (PHOton Spectrometer) - электромагнитный калориметр



Отбор событий

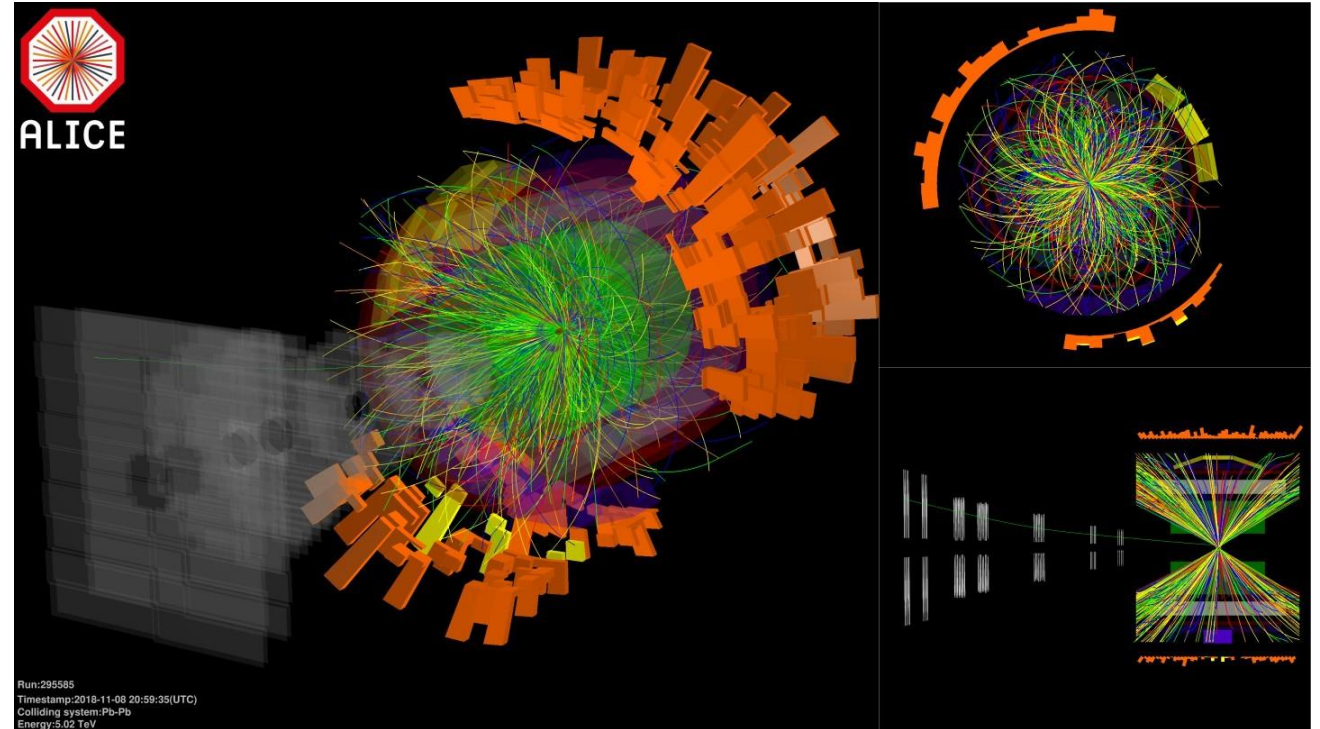
- p-Pb и pp столкновения $\sqrt{s} = 5.02$ TeV
- Minimum Bias триггер (V0A & V0C)
- $|Z_{\text{vtx}}| \leq 10$ см
- Исключение pile-up
- INEL и NSD события
- MC и Data были проанализированы
- Отобранные события:

p-Pb Data: $2.7 \cdot 10^8$

p-Pb MC: $2.0 \cdot 10^8$

pp Data: $3.2 \cdot 10^8$

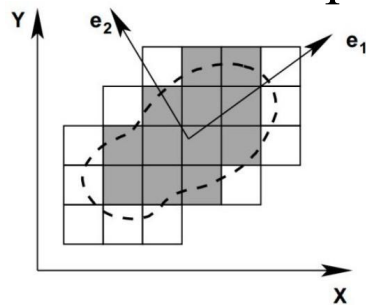
pp MC: $4.0 \cdot 10^8$



Идентификация антинейтронов в PHOS

Идентификация $\bar{n}$:

- Выделенная энергия при аннигиляции
- Нейтральность (CPV, Charged Particle Veto)
- Дисперсия кластера (M_{20} , M_{02} – собственные значения матрицы S)

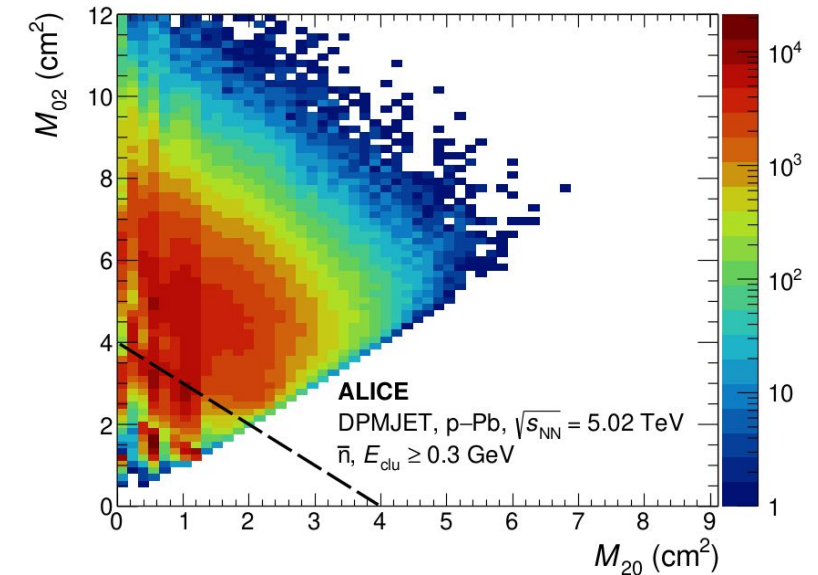
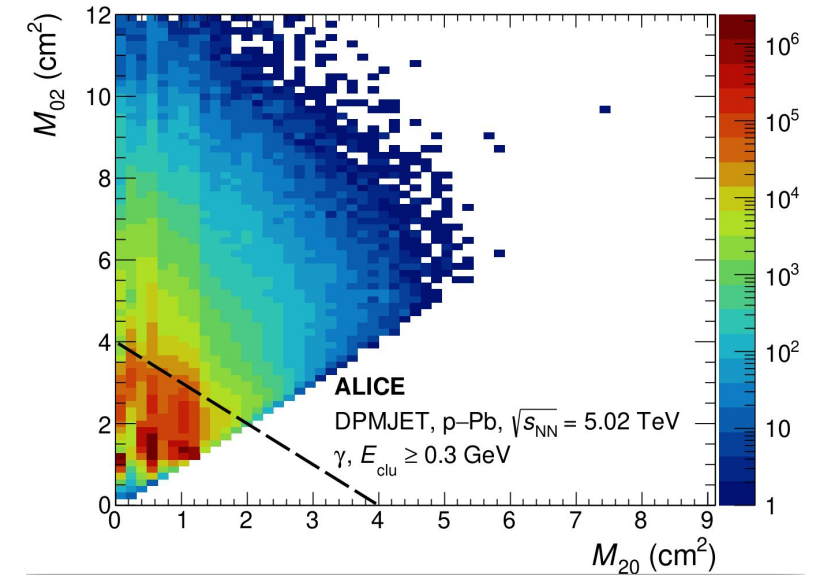


$$S = \begin{pmatrix} s_{xx} & s_{xz} \\ s_{zx} & s_{zz} \end{pmatrix}$$

$$s_{xx} = \langle (x - \bar{x})^2 \rangle$$

$$s_{xz} = \langle (x - \bar{x})(z - \bar{z}) \rangle$$

- Использование Time-of-Flight информации PHOS для восстановления импульса антинейтрона



Отбор треков и кластеров

$\bar{\Sigma}$

$\bar{n}$

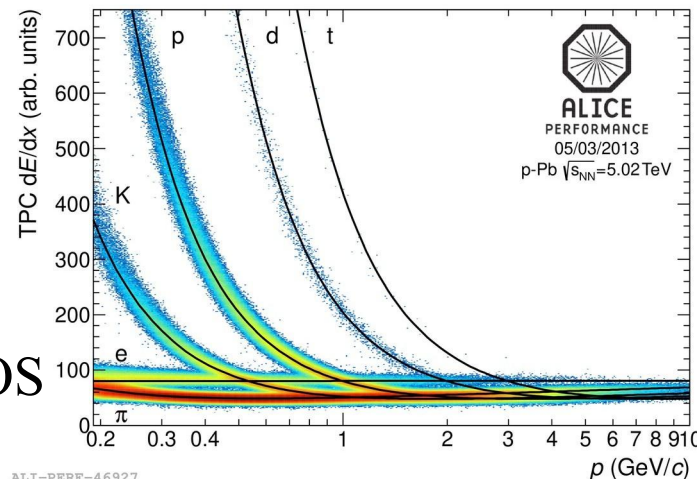
Кластер:

π

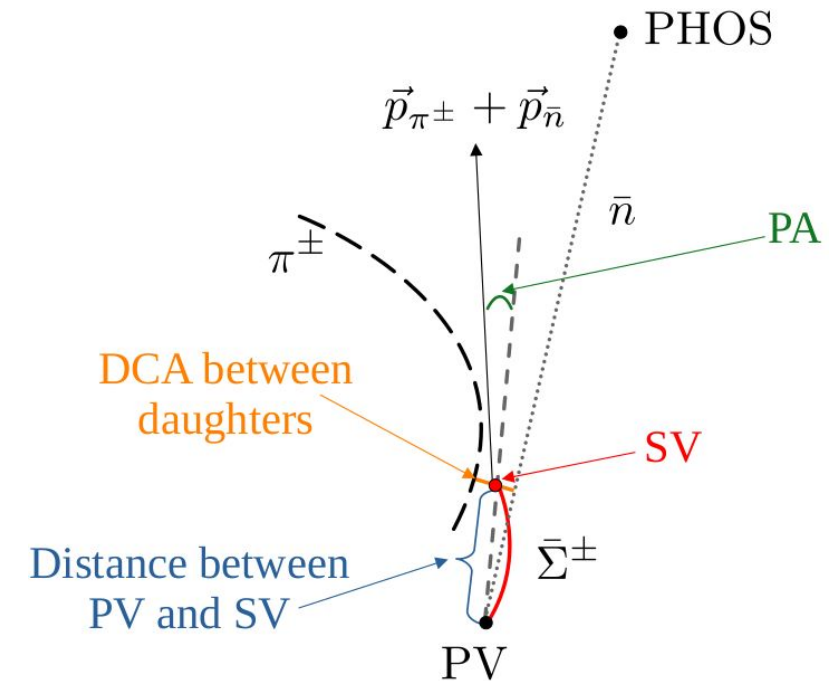
Трек:

- $E_{clu} \geq 0.6 \text{ GeV}$
- $M02 > 0.2 \text{ cm}^2$
- $N_{cells} \geq 7$
- $CPV > 10\sigma$
(Charged Particle Veto)
- Дисперсионный отбор $\bar{n}$:
 $M02 \geq -M20 + 4$
- $0 < TOF - t_\gamma < 150 \text{ ns}$
где t_γ это TOF фотона до PHOS

- $|\eta| < 0.8$
- TPC dE/dx: 3σ полоса вокруг пионной линии
- Количество кластеров TPC > 60

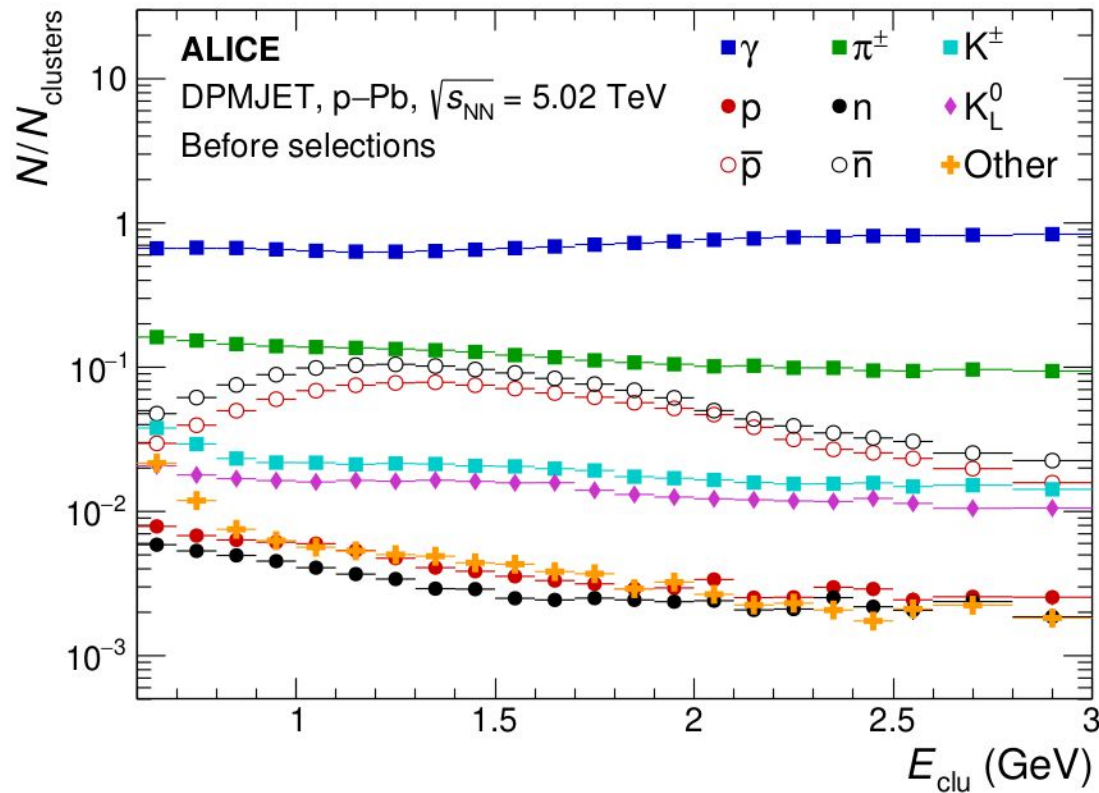


Топологические отборы

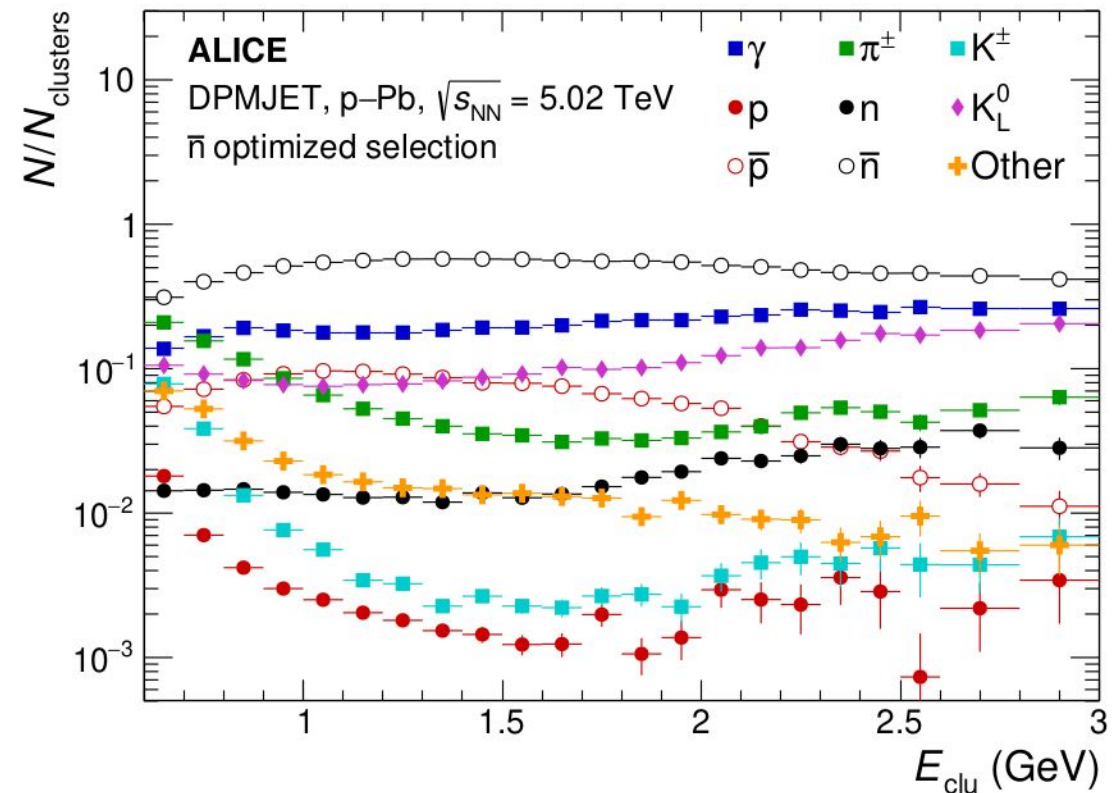


Доля различных типов кластеров

- После применения отборов доля антинейтронных кластеров возрастает до $\sim 50\%$



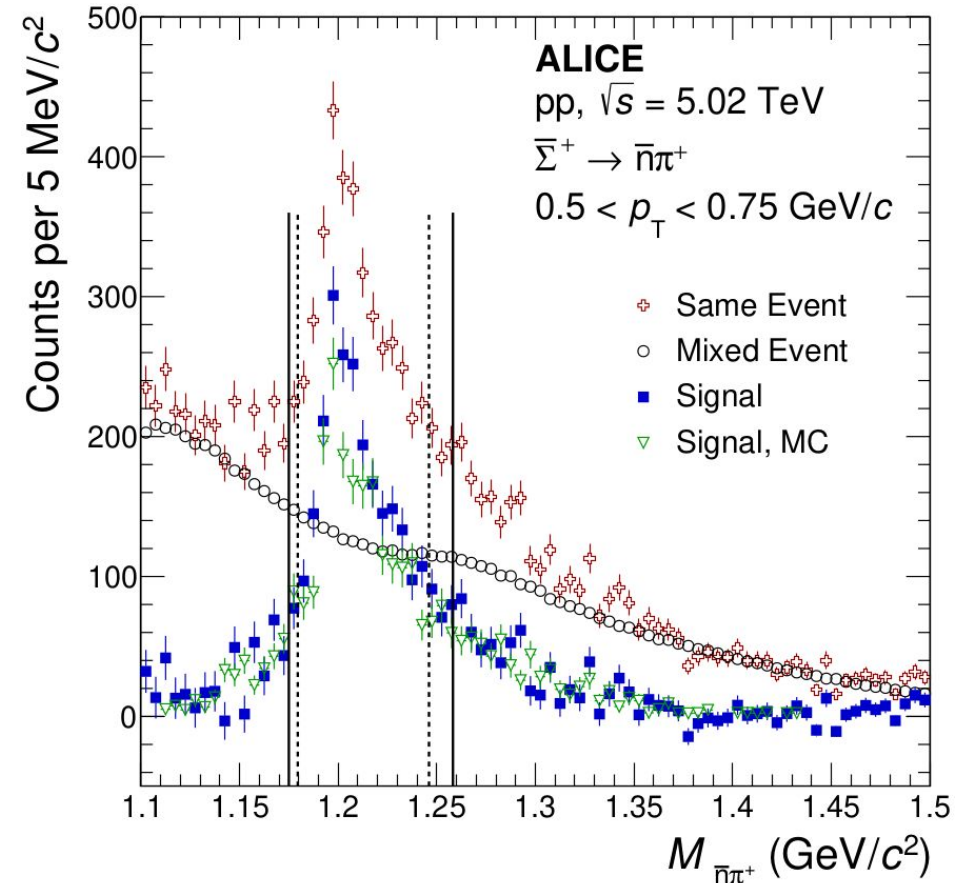
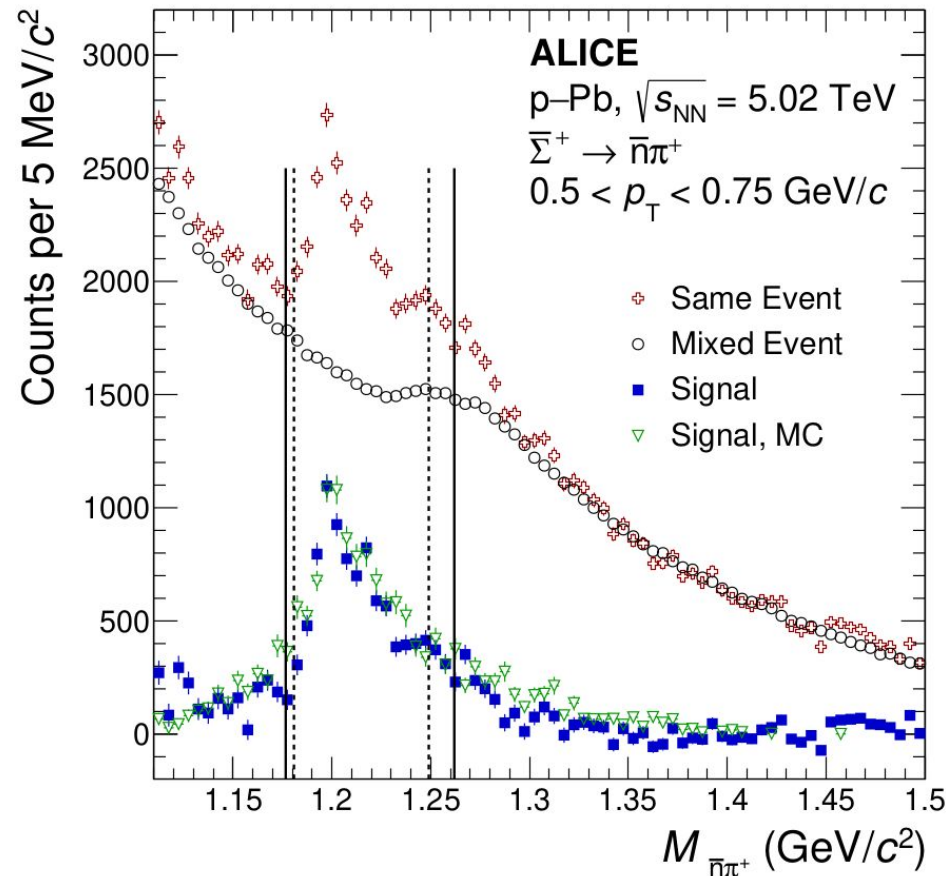
Без отборов



С отборами

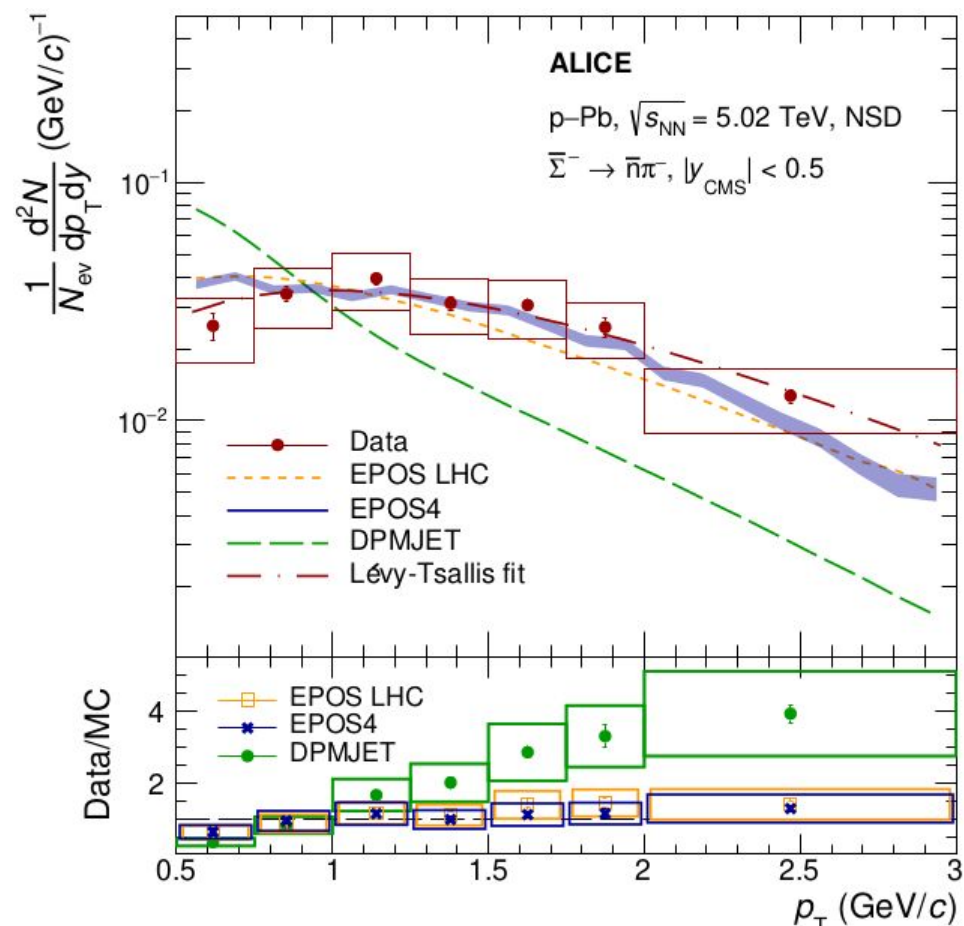
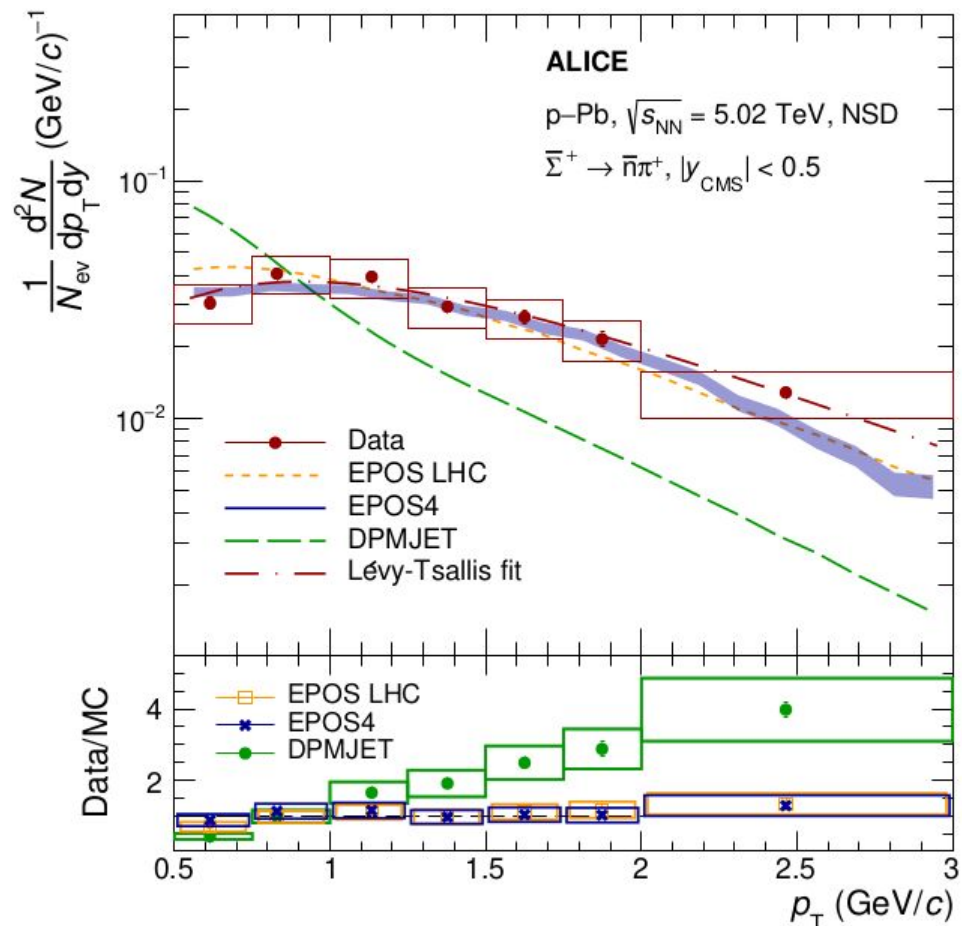
Процедура выделения сигнала

- Применяя полученные отборы, были построены распределения инвариантных масс для пар трек (пи-мезон) и кластер в калориметре (антинейтрон)
- Получены Same Event и Mixed Event распределения

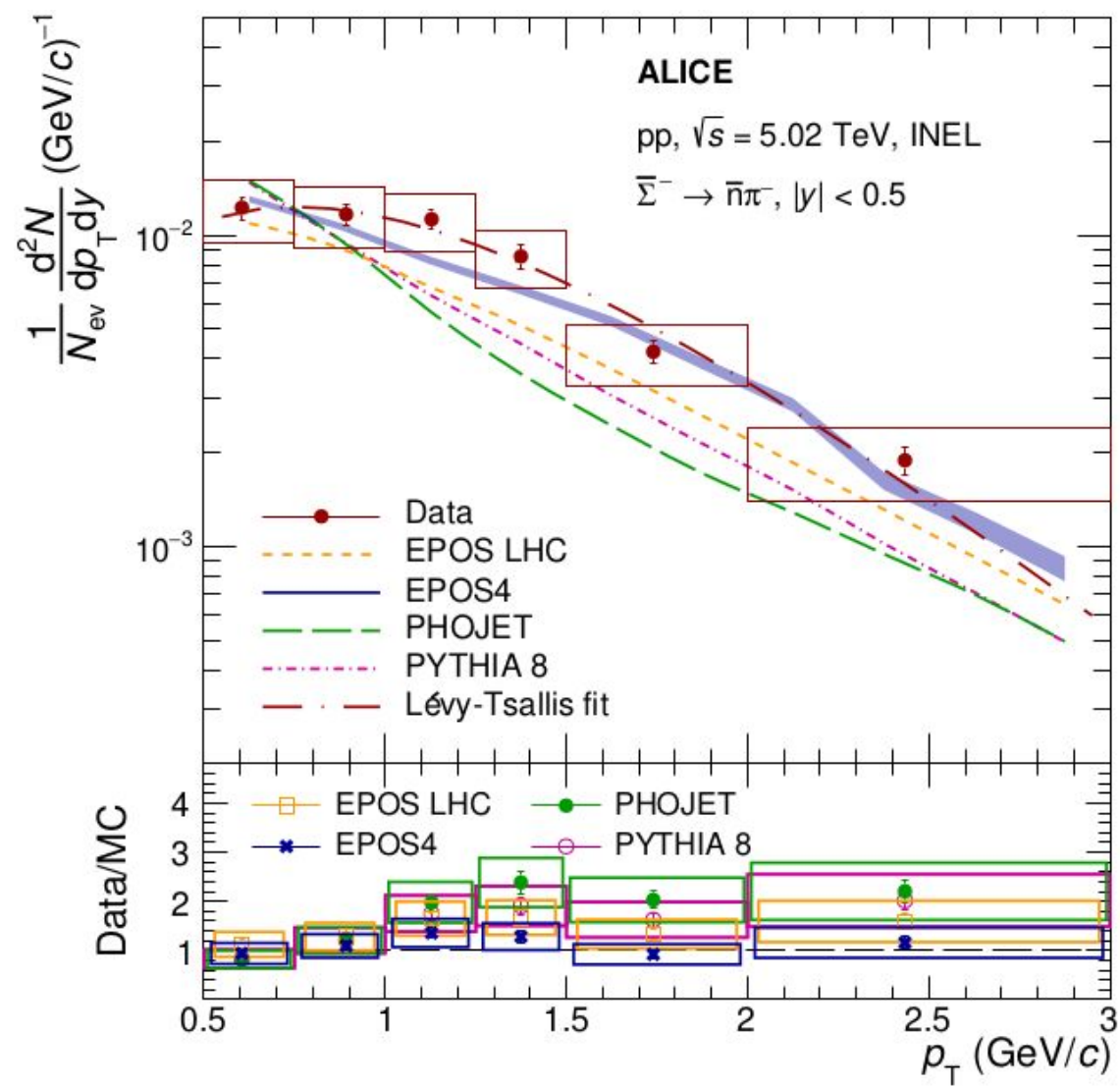
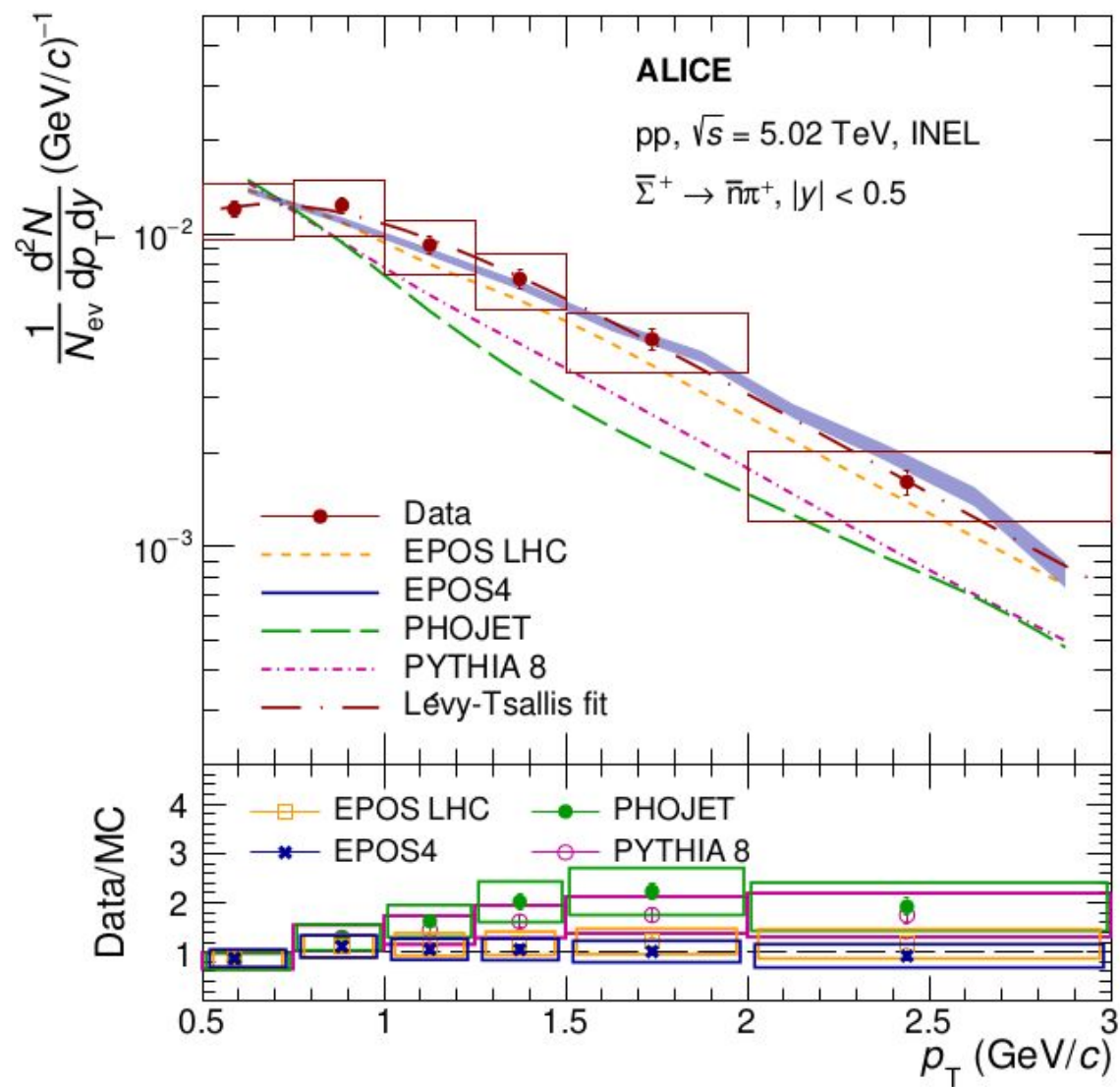


Спектры $\bar{\Sigma}$ в p-Pb столкновениях

- После получения выходов, спектр нормируется на эффективность реконструкции
- Систематические погрешности показаны прямоугольниками
- EPOS LHC и EPOS4 показывают наилучшее согласие, по сравнению с другими моделями

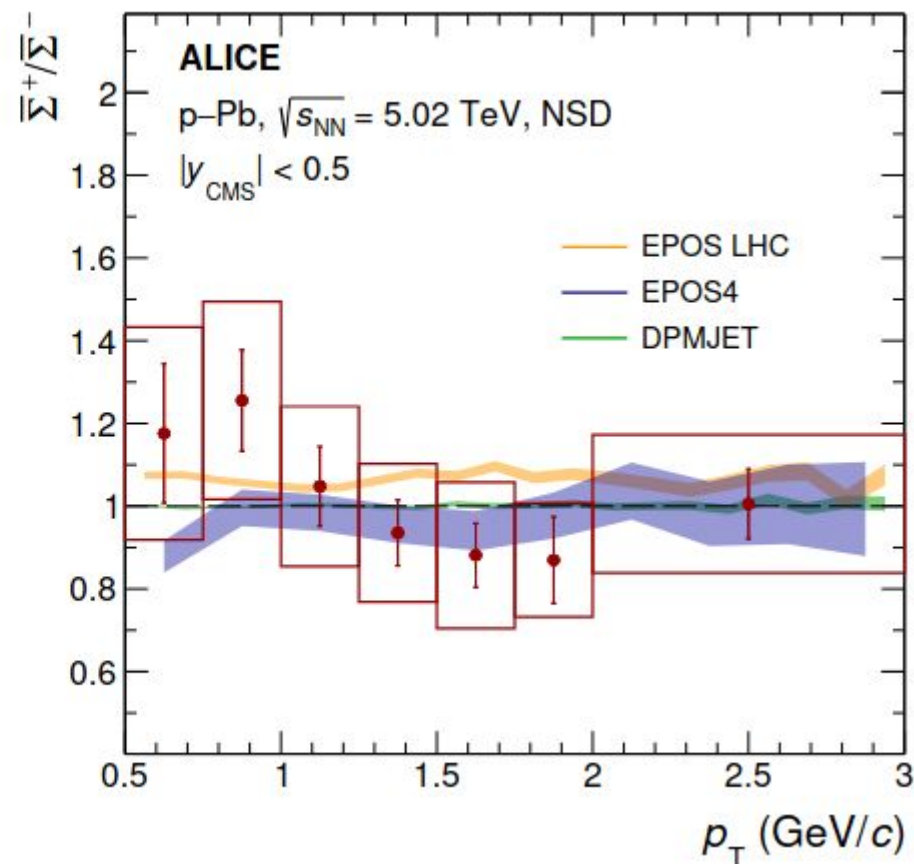
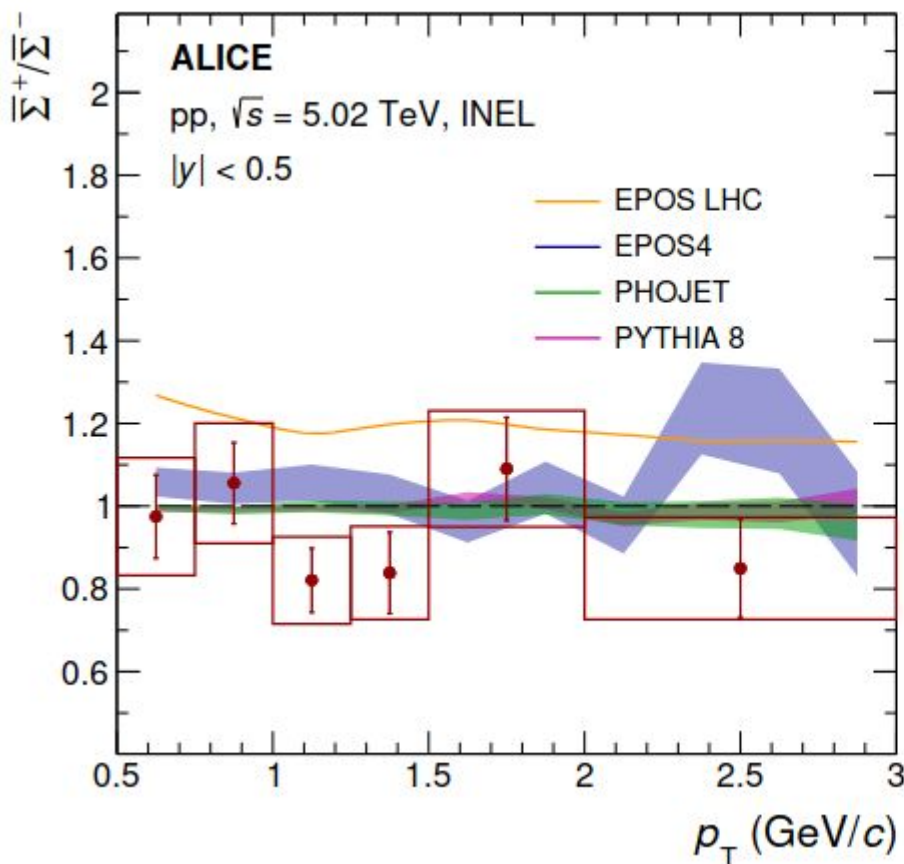


Спектры $\bar{\Sigma}$ в pp столкновениях



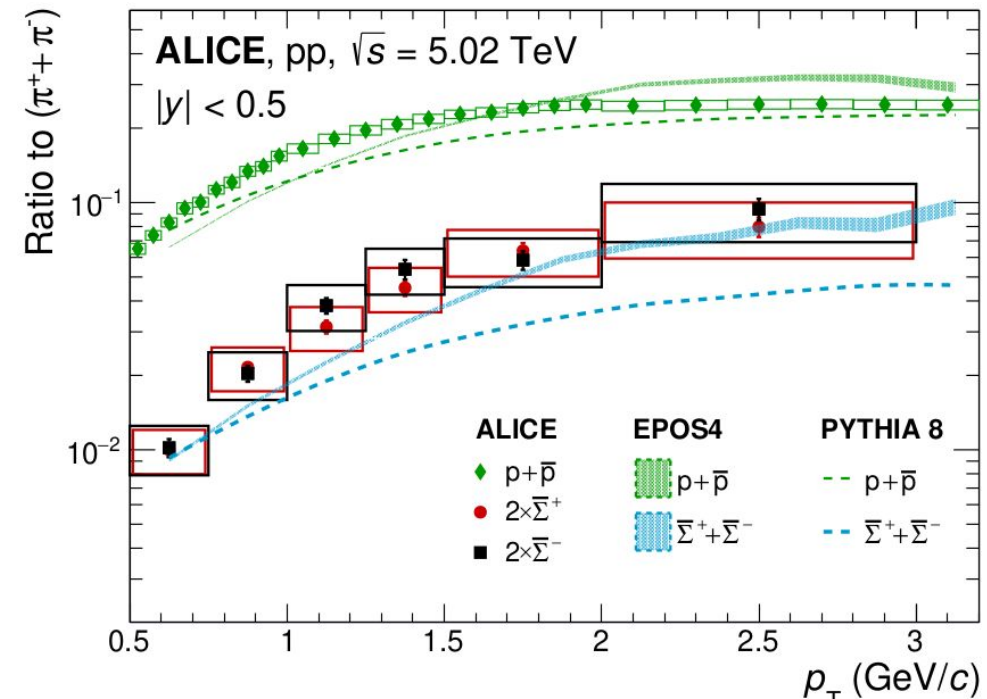
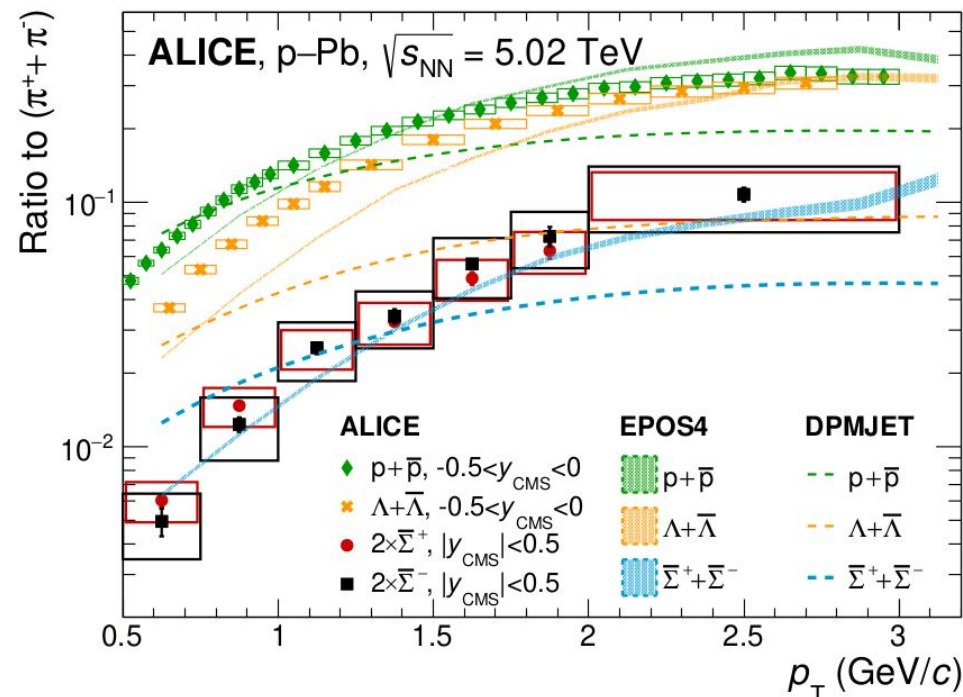
Отношение спектров $\bar{\Sigma}$

- Отношение спектров анти- $\Sigma^\pm$ -гиперонов ожидается равным единице
- Для EPOS LHC наблюдается отклонение от единицы ввиду асимметрии между u и d кварками (была введена для воспроизведения данных LEP и NA49)



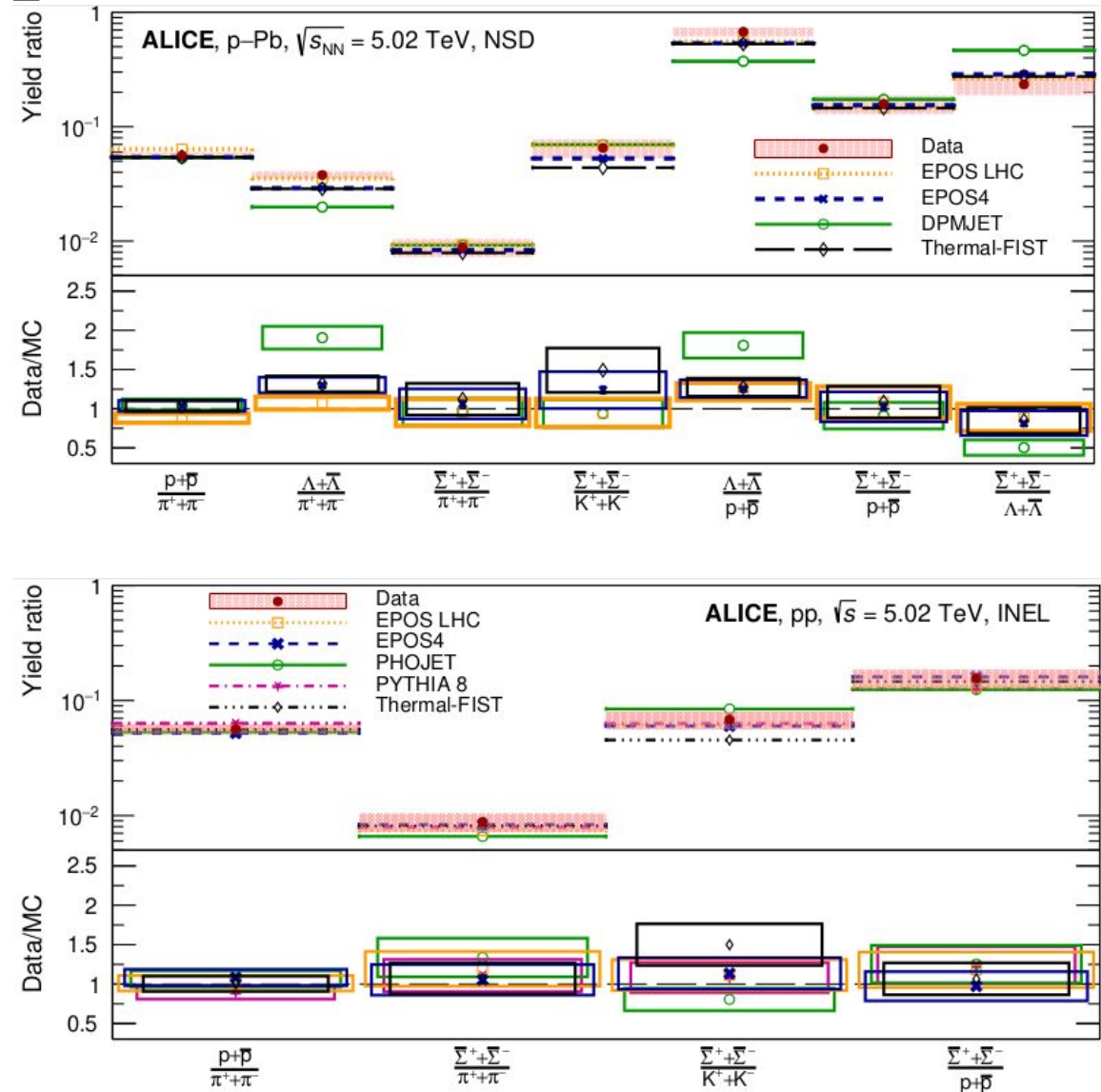
Отношение p_T -дифференциальных выходов

- Соотношения спектров различных видов адронов позволяют подробно изучать различные эффекты, такие как участие в радиальном расширении и более раннем или более позднем термодинамическом замораживании для данного вида адронов, вклад эффектов коалесценции
- Отношение p/π насыщается при высоких p_T в pp и p -Pb столкновениях. Отношение Λ/π демонстрирует похожий тренд в p -Pb столкновениях
- Отношение Σ/π растет до 3 GeV/c в p -Pb и, в меньшей степени, в pp столкновениях. Это может указывать на участие анти- $\Sigma^\pm$ гиперонов в радиальном коллективном расширении в p -Pb столкновениях



Отношение p_T -интегральных выходов

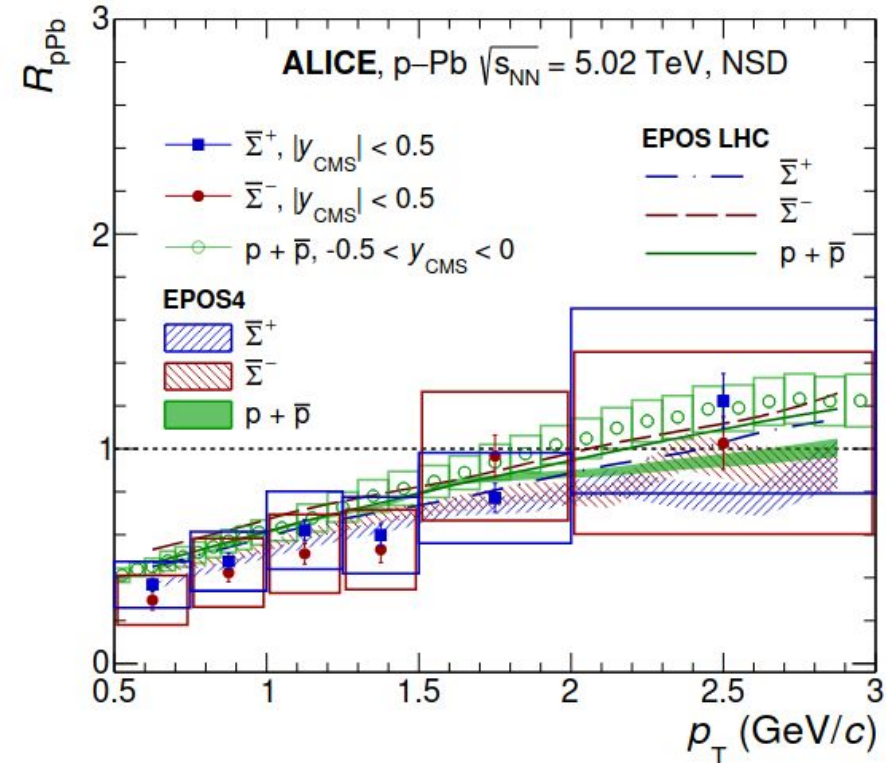
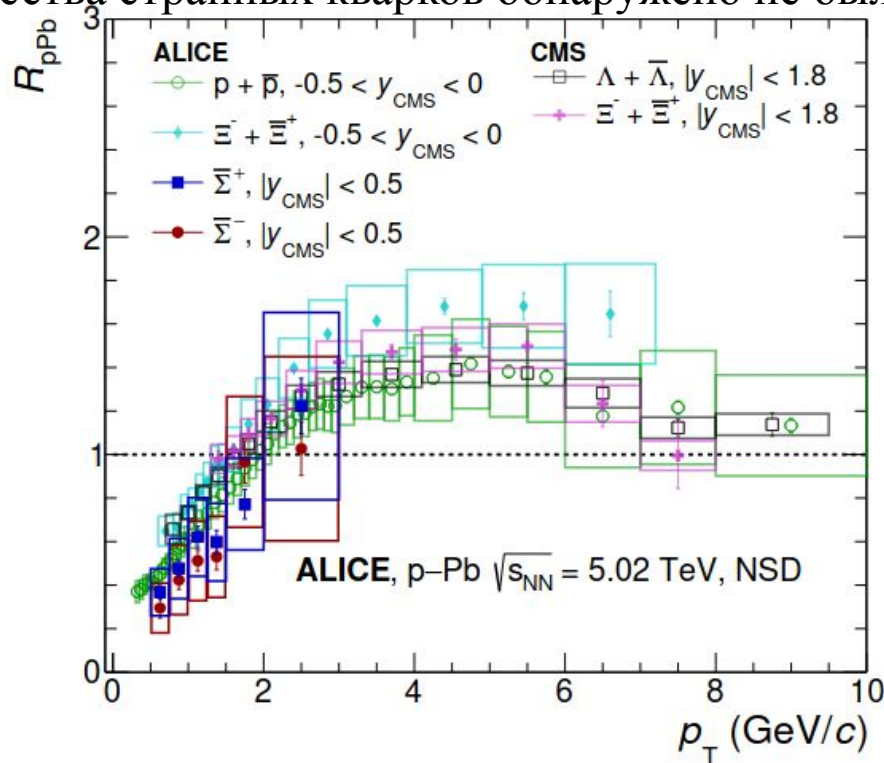
- Все модели, включая статистическую модель Thermal-FIST, воспроизводят измеренные интегральные выходы в пределах погрешностей в pp и p-Pb столкновениях
- Отношение Σ/Λ недооценивается динамическими моделями, но лучше описывается статистической Thermal-FIST моделью (Λ плохо описывается моделями)
- Отношение Σ/K лучше описывается динамической моделью и недооценивается моделью Thermal-FIST
- Эти наблюдения могут помочь в объяснении механизмов образования странности



Фактор ядерной модификации

- Измерен R_{pPb} для анти- Σ^+ гиперонов
- R_{pPb} сравнивается с опубликованными результатами для протонов, гиперонов с одним странным кварком (Λ) и гипероном с двумя странными кварками (Ξ)
- R_{pPb} для всех адронов согласуется в пределах погрешностей, зависимости от количества странных кварков обнаружено не было

$$R_{pPb} = \frac{dN_{pPb}/dp_T}{\langle N_{coll} \rangle dN_{pp}/dp_T}$$



Заключение

- Впервые предложен метод реконструкции антинейтронов, который открывает новые переменные для исследований
- Реконструкция антинейтронов с использованием времени пролета позволяет восстанавливать импульсы вплоть до ~ 2 GeV/c с текущим временным разрешением PHOS
- Метод может быть использован для реконструкции $\bar{\Sigma}^+$ по $\sim 100\%$ каналу распада на антинейтрон и заряженный пион
- Измерены дифференциальные и интегральные выходы анти- $\Sigma^\pm$ -гиперонов в p-Pb и pp столкновениях @ 5.02 ТэВ
- Модели EPOS LHC и EPOS4 дают наилучшее согласие с данными
- Статистическая термальная модель описывает интегральные выходы анти- $\Sigma^\pm$ -гиперонов в пределах погрешностей

Апробация результатов

- Gordeev, P., ALICE Collaboration. Antineutron Reconstruction and Identification in Electromagnetic Calorimeter. Phys. Atom. Nuclei 86, 827–831 (2023).
<https://doi.org/10.1134/S1063778823050174>
- Gordeev, P., the ALICE Collaboration. Production of Baryons in p–Pb and pp Collisions at the LHC with ALICE. Phys. Atom. Nuclei 87 (Suppl 3), S432–S437 (2024).
<https://doi.org/10.1134/S1063778824700996>
- Конференционная - Gordeev, P., Production of Σ baryons as a function of multiplicity in pp collisions at the LHC with ALICE, EPJ Web Conf., 316 (2025) 03003, DOI:
<https://doi.org/10.1051/epjconf/202531603003>

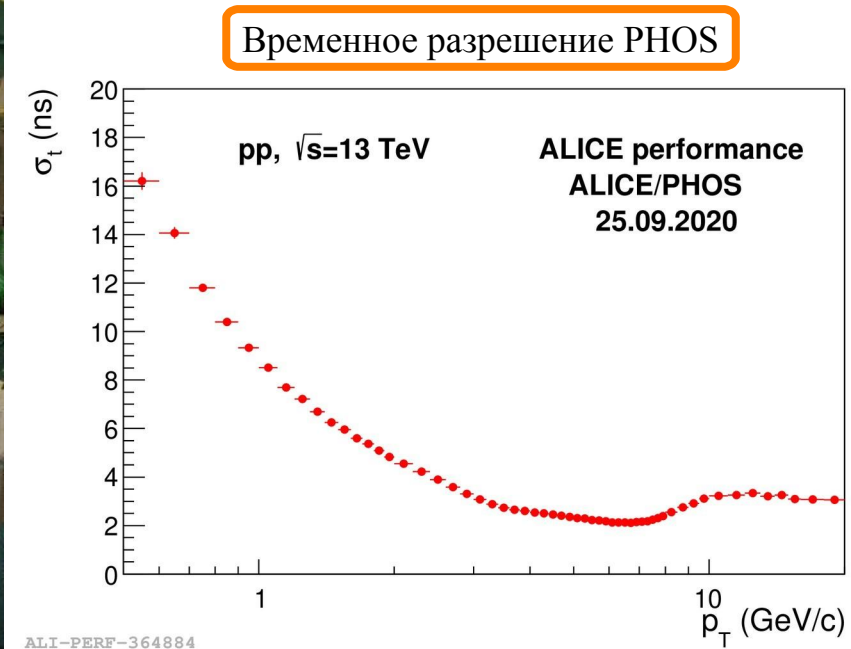
В процессе

- Коллаборационная статья - CR2 пройден, следующий этап - CERN review
- Планируется еще одна статья после конференции QFTHEP (не конференционная)

Спасибо за внимание!

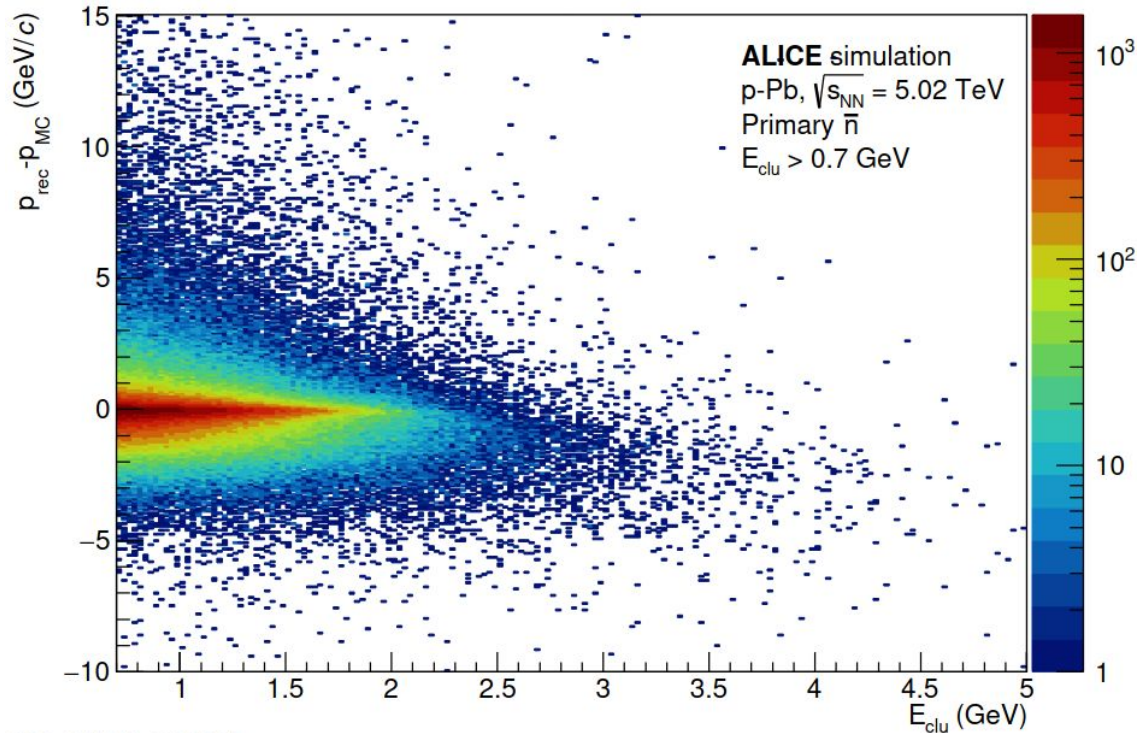
PHOS

- PHOS - высокогранулированный фотонный спектрометр на основе кристаллов PbWO_4
- PHOS предназначен для исследования электромагнитного излучения горячей сильновзаимодействующей материи в ядро-ядерных столкновениях при высоких энергиях, а также для измерения спектров мезонов через их фотонные распады
- Может быть измерено время пролета (TOF) частицы, образующей кластер в PHOS

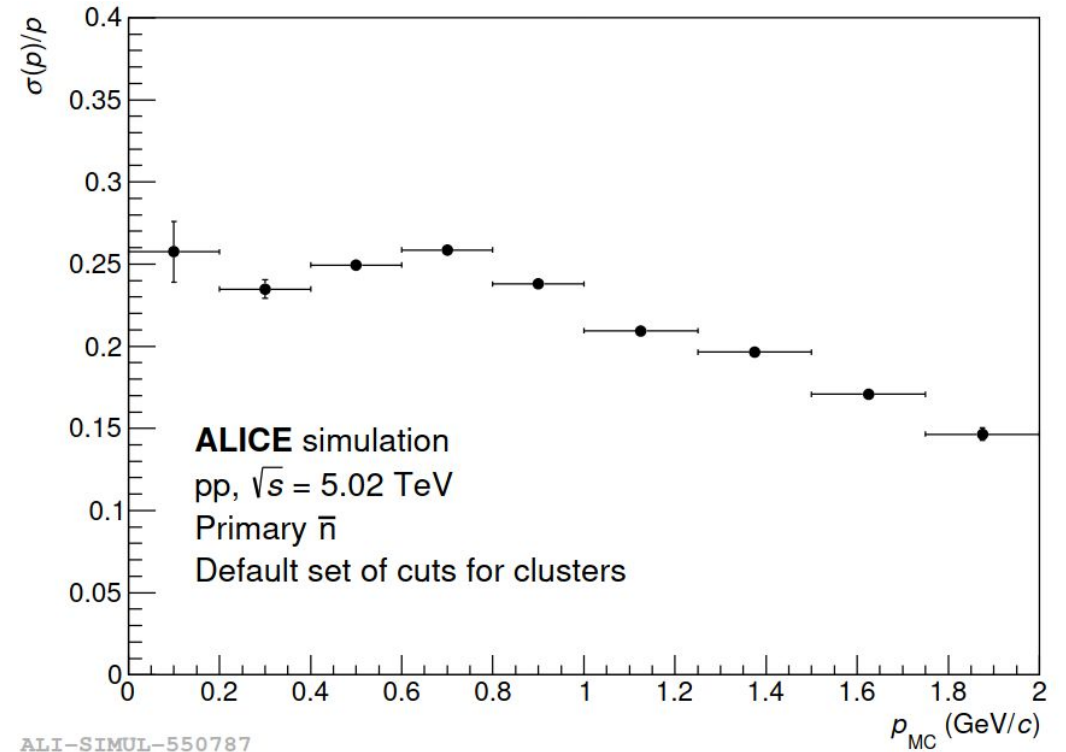


Реконструкция импульса антинейтрона

Реконструкция импульса с использованием времени пролета



Импульсное разрешение



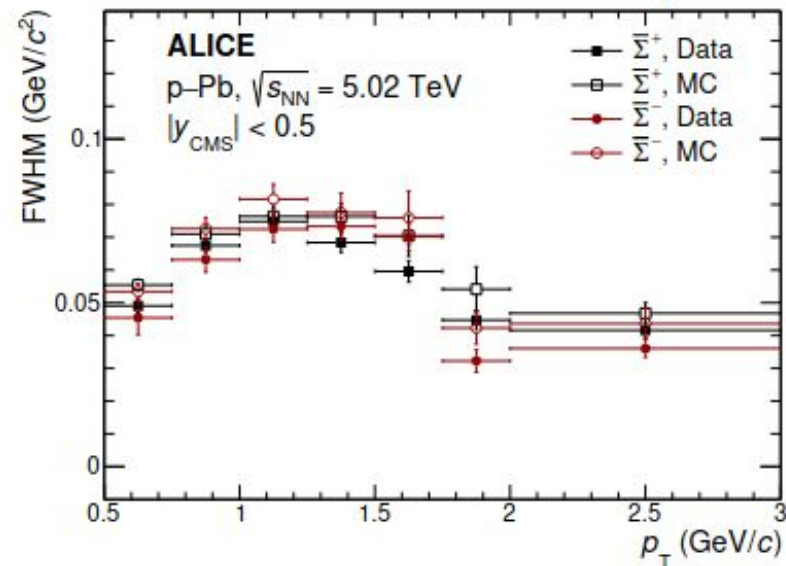
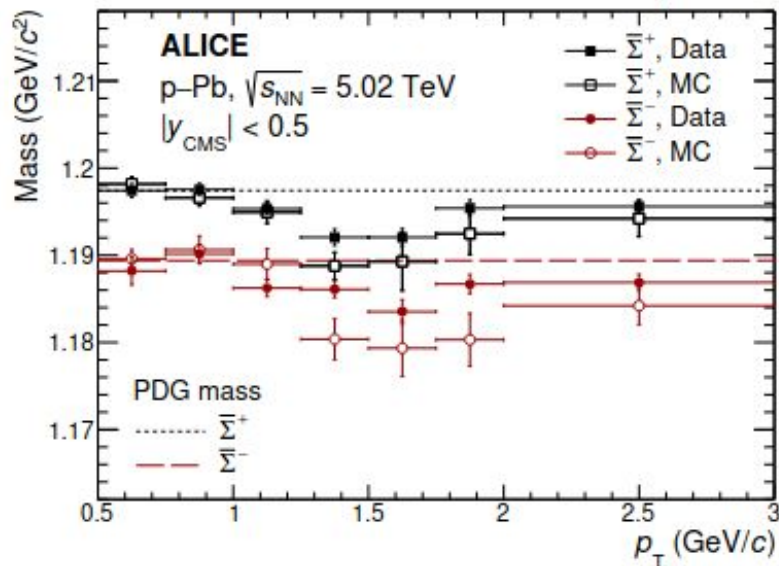
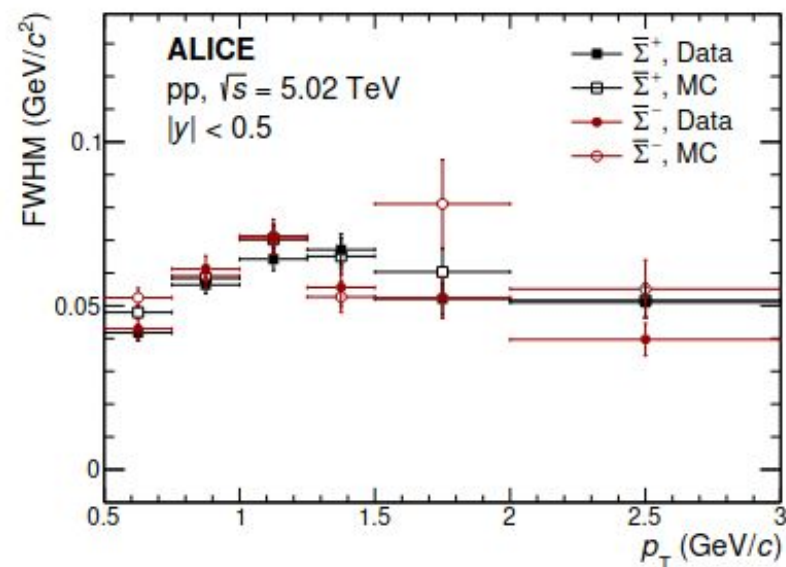
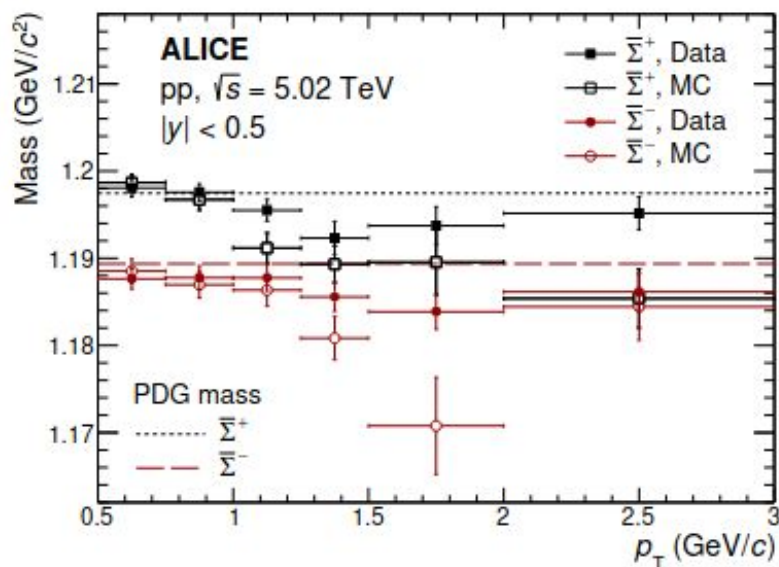
$$p_{rec} = \frac{m_{\bar{n}}}{\sqrt{\left(\frac{t_{TOF} \cdot c}{L}\right)^2 - 1}}$$

L - расстояние между вершиной взаимодействия и кластером в PHOS, м (~ 4.6 м)

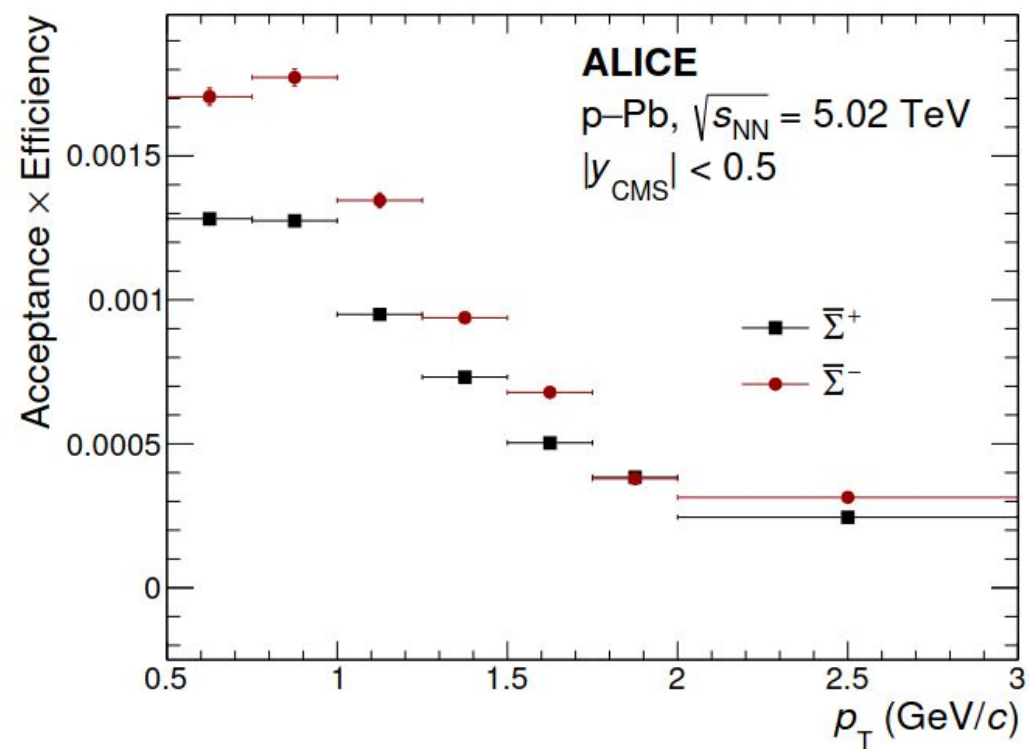
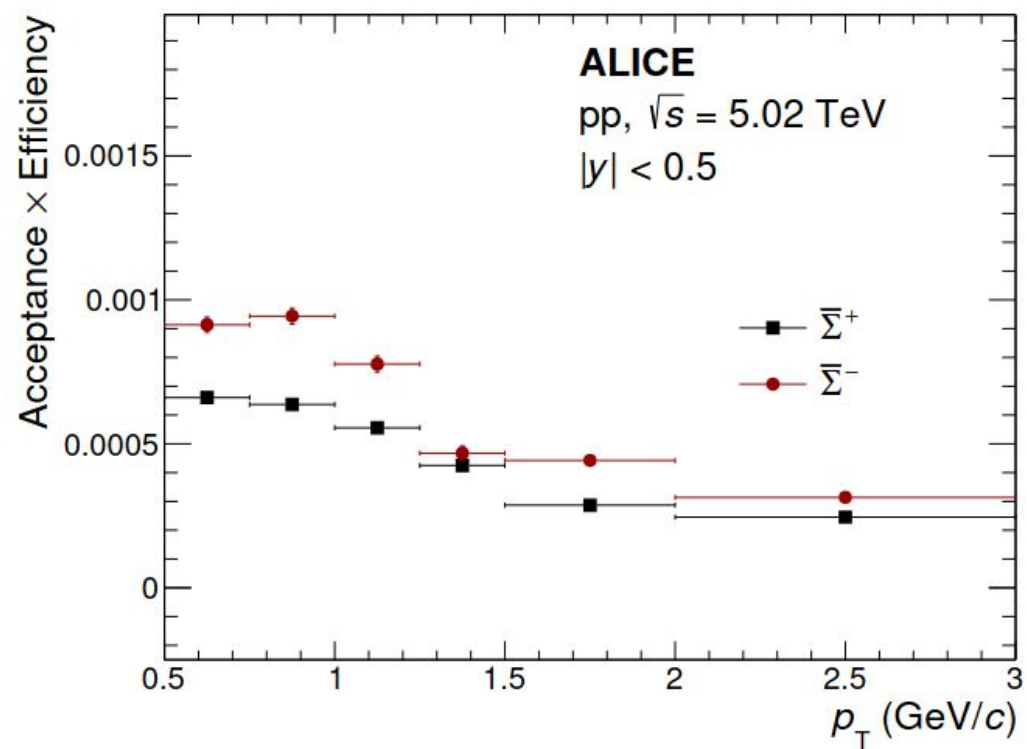
$m_{\bar{n}}$ - масса антинейтрона, $0.939485 \text{ GeV}/c^2$

t_{TOF} - время пролета, с

Среднее значение и ширина сигнала пика



Эффективность реконструкции



Систематические погрешности

Source	Uncertainty (%) $\bar{\Sigma}^+ / \bar{\Sigma}^-$					
	pp			p-Pb		
p_T (GeV/c)	0.5–0.75	1–1.25	1.5–2	0.5–0.75	1–1.25	1.75–2
Shower shape	11.4/14.8			7.2/11.6		
CPV n_σ	3.9/2.7			2.5/5.1		
Minimum E_{clu}	13.6/10.5			11.0/13.6		
PHOS time response	4.9/5.1	5.5/5.8	9.4/8.9	5.5/4.1	7.9/6.5	11.5/14.6
Track $ \eta_{\text{max}} $	3.7/1.0	1.4/1.0	1.3/1.9	4.7/4.5	3.4/3.9	1.4/3.0
$\pi^\pm$ dE/dx	0.4/2.2	0.4/2.1	0.5/2.1	1.7/1.7	0.8/1.9	0.5/2.0
Topological selections	2.5/8.8	1.6/4.9	1.3/5.3	6.9/18.2	5.4/13.4	3.2/6.2
Raw yield extraction	2.0/5.2	2.3/1.9	1.0/2.1	5.2/12.2	3.1/10.2	3.0/4.8
Material budget	4.5					
ITS-TPC matching efficiency	3.0					
Total	20.3/22.6	20.1/21.0	21.4/22.2	18.7/29.9	18.3/26.9	19.4/25.9

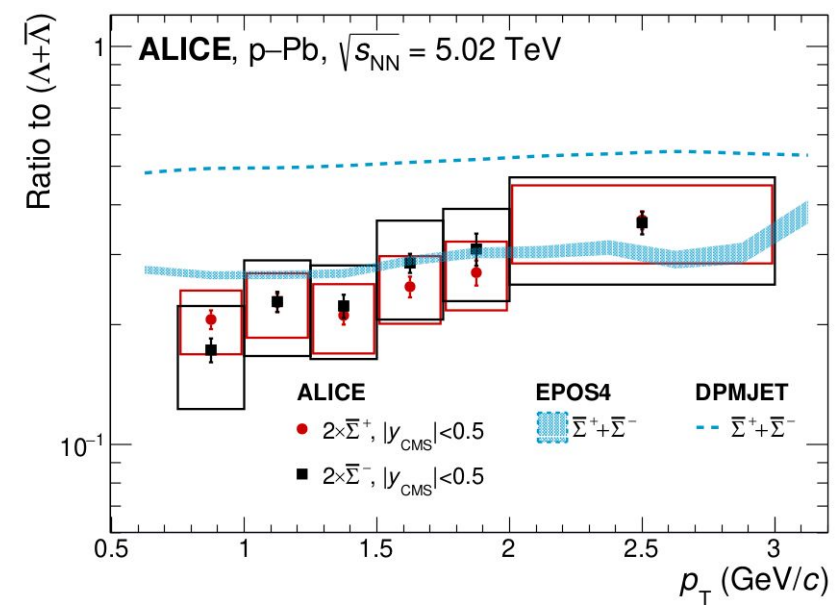
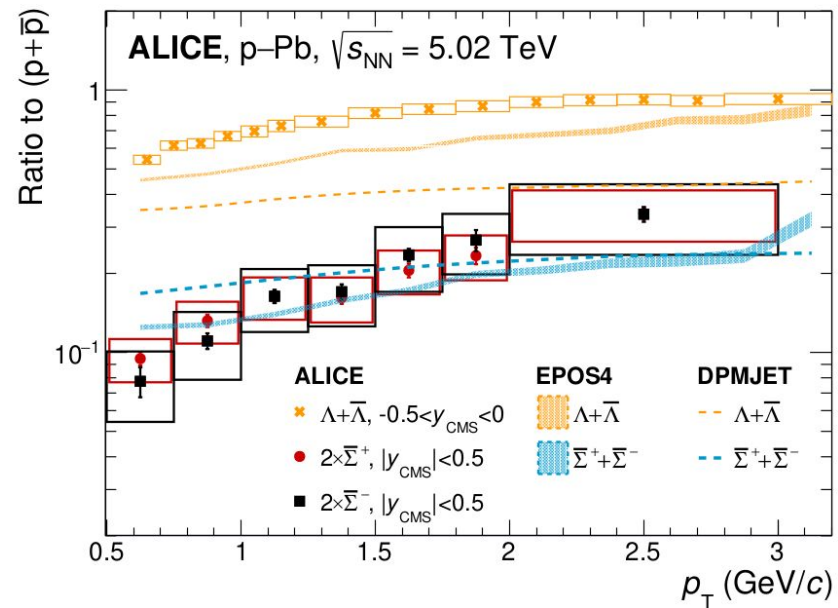
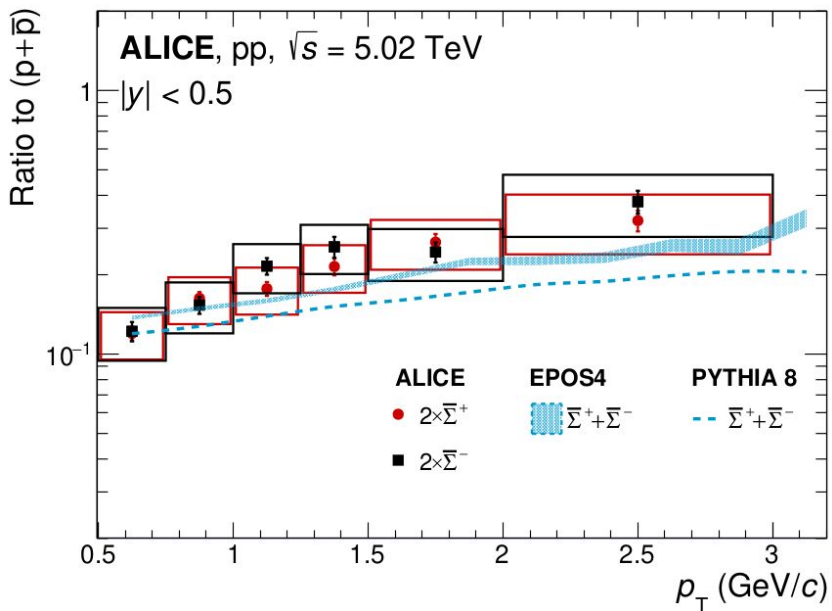
Интегральные выходы $\times 10^3$

Specie	$\frac{dN}{dy} \pm (\text{stat.}) \pm (\text{sys.}) \pm (\text{extr.})$	EPOS4	EPOS LHC	PHOJET/DPMJET	PYTHIA 8	Thermal-FIST
pp collisions (INEL)						
$\bar{\Sigma}^+$	$18.1 \pm 0.5 \pm 4.0 \pm 0.7$	21.4 ± 0.2	18.441 ± 0.004	16.45 ± 0.05	17.71 ± 0.03	16.7
$\bar{\Sigma}^-$	$18.3 \pm 0.7 \pm 4.7 \pm 0.7$	20.4 ± 0.2	14.735 ± 0.004	16.55 ± 0.05	17.77 ± 0.03	17.2
p-Pb collisions (NSD)						
$\bar{\Sigma}^+$	$75 \pm 3 \pm 16 \pm 3$	71.9 ± 0.8	74.1 ± 0.1	78.39 ± 0.05	—	63
$\bar{\Sigma}^-$	$72 \pm 2 \pm 20 \pm 3$	73.8 ± 0.8	69.1 ± 0.1	78.47 ± 0.05	—	65

Доля интегральных выходов вне диапазона измерения составляет приблизительно 16–24% в области низких p_T и 1–3% в области высоких p_T в pp столкновениях, и 8–14% в области низких p_T и 5–12% в области высоких p_T в p-Pb столкновениях

Параметры Thermal-FIST: $T = 148.69 \pm 0.03$ MeV, $\mu_B = 0 \pm 0.09$ MeV и $T = 147.31 \pm 0.06$ MeV, $\mu_B = 0 \pm 0.2$ MeV для pp и p-Pb соответственно

Отношение p_T -дифференциальных выходов



Монте-Карло модели

- DPMJET 3.0-5
- PYTHIA 8.2.10 with Monash 2013 tune
- PHOJET (DPMJET version 3.0-5)
- EPOS LHC
- EPOS4

Характеристика	DPMJET	EPOS LHC	EPOS4
Физическая основа	DPM (Dual Parton Model) + мини-джеты	Гибридная (партоны + гидродинамика)	Улучшенная гибридная модель
Ядерные эффекты	Glauber + DPS(Double Parton Scattering)	Glauber + shadowing + core-corona	Улучшенные nPDF + тройные рассеяния
Гидродинамика	Нет	3+1D гидродинамика	Улучшенная вязкость и EoS
Коллективные эффекты	Слабые	Сильные (v_n)	Ещё лучшее описание v_n
Применимость	Космические лучи, LHC (упрощенно)	LHC (оптимизирован)	LHC, будущие коллайдеры (FCC)

1. DPMJET (Dual Parton Model + Jet emissions)

Основа: Развитие модели Dual Parton Model (DPM) с включением мини-джетов.

Применимость: Высокие и сверхвысокие энергии (космические лучи, LHC).

Особенности в p-Pb:

- Ядерные эффекты: Использует Glauber-подход для моделирования множественных столкновений нуклонов внутри ядра.
- Множественные взаимодействия: Учитывает двойные партонные рассеяния (Double Parton Scattering, DPS).
- Генерация вторичных частиц: Основана на цепочках (strings), но без явного учета гидродинамической эволюции.

Ограничения:

- Нет динамического описания кварк-глюонной плазмы (QGP).
- Менее точен в области низких p_T по сравнению с EPOS.

2. EPOS LHC (версия, оптимизированная для LHC)

Основа: Гибридная модель (партонные ливни + гидродинамика).

Применимость: Оптимизирована для pp, pA, AA при энергиях LHC.

Особенности в p-Pb:

- Гибридный подход:
- Начальная стадия: партонные каскады + струны (Parton-Based Gribov-Regge Model).
- Промежуточная стадия: 3+1D гидродинамика (если плотность энергии достаточна).
- Финализация: адронизация через модель "core-corona" (ядро $\rightarrow$ гидродинамика, корона $\rightarrow$ струнная фрагментация).
- Ядерные эффекты:
- Учет "shadowing" (подавление партонных плотностей в ядре).
- Множественные взаимодействия через Glauber + партонные перерасеяния.
- Преимущества:
- Лучше описывает коллективные эффекты (например, v_n) в p-Pb.
- Учет QGP-подобных эффектов даже в малых системах.

3. EPOS4 (развитие EPOS LHC)

Основа: Усовершенствованная версия EPOS с улучшенной динамикой партонов.

Нововведения в p-Pb:

- Более точный учет начальных состояний:
- Улучшенное описание партонных распределений (NLO-коррекции).
- Более сложная модель PDF (nPDF).
- Гидродинамика:
- Улучшенная вязкость и уравнение состояния.
- Более точное описание границы между "core" и "corona".
- Множественные рассеяния:
- Включены тройные партонные взаимодействия.
- Преимущества перед EPOS LHC:
- Лучшее согласие с данными по множественности и p_T -спектрам.
- Более последовательное описание перехода $pp \rightarrow pA \rightarrow AA$.

Монте-Карло модели

Характеристика	PHOJET	PYTHIA 8 (Monash)	EPOS LHC	EPOS4
Физическая основа	DPM(Dual Parton Model) + реггеоны	Партонный шоверинг	Гибридная (партоны + гидро)	Улучшенная гибридная
Множественность	Занижает на LHC	Хорошо согласуется	Хорошо согласуется	Ещё лучше
Коллективные эффекты (v_n)	Нет	Слабые (только из MPI)	Есть (гидродинамика)	Улучшенные
Гидродинамика	Нет	Нет	Есть (3+1D)	Улучшенная
Вычислительная сложность	Низкая	Средняя	Высокая	Очень высокая
Оптимизация под LHC	Нет	Да (Monash tune)	Да	Да + новые улучшения

1. RHOJET

Основа: Комбинация партонных и реггеонных моделей (развитие Dual Parton Model).

Применимость: Средние и высокие энергии (HERA, LHC).

Особенности в pp:

- Реггеонная динамика: Доминирует при низких p_T .
- Множественные взаимодействия: Учитываются, но без детального тюнинга под LHC.

Ограничения:

- Нет современного партонного showering (как в PYTHIA).
- Плохо описывает данные LHC при высоких p_T .
- Нет учета коллективных эффектов.

Использование: Устаревшая модель, но иногда применяется для фотон-адронных взаимодействий.

2. PYTHIA 8 (Monash 2013 tune)

Основа: Партонная каскадная модель + Lund string fragmentation.

Применимость: Основной генератор для pp-столкновений на LHC.

Особенности в pp:

- Партонный showering: Точно рассчитывается в формализме DGLAP.
- Тюнинг Monash 2013: Оптимизирован под данные LHC (множественность, p_T -спектры).
- Множественные взаимодействия (MPI): Учитываются, влияют на множественность.

Ограничения:

- Нет гидродинамики $\rightarrow$ коллективные эффекты (v_n) слабые.
- Нет явного учета QGP-подобных эффектов.

Преимущества: Быстрый, хорошо проверенный, стандарт для LHC.

3. EPOS LHC

Основа: Гибридная модель (партоны + гидродинамика).

Применимость: Оптимизирован для LHC (pp, pA, AA).

Особенности в pp:

- Гибридный подход:
- Начальная стадия: партонные каскады + струны.
- Если плотность энергии высока $\rightarrow$ 3+1D гидродинамика.
- Финализация: coге-coгопа модель (ядро $\rightarrow$ гидродинамика, корона $\rightarrow$ струны).
- Коллективные эффекты:
- Может генерировать v_n даже в pp (из-за гидродинамики).
- Тюнинг: Под LHC данные (лучше PYTHIA в низком p_T).

Ограничения:

- Вычислительно тяжелее PYTHIA.
- Гидродинамика в pp спорна (не все согласны, что она нужна).

4. EPOS4

Основа: Улучшенная версия EPOS LHC.

Нововведения в pp:

- Улучшенный партонный шоверинг:
- Более точные начальные условия (NLO-эффекты).
- Гидродинамика:
- Улучшенная вязкость и уравнение состояния.
- Более точное разделение coге-coгопа.
- Множественные взаимодействия:
- Учет тройных партонных рассеяний.

Преимущества перед EPOS LHC:

- Лучшее описание p_T -спектров и множественности.
- Более последовательная экстраполяция к pA и AA.