

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

Гордеев Павел

План

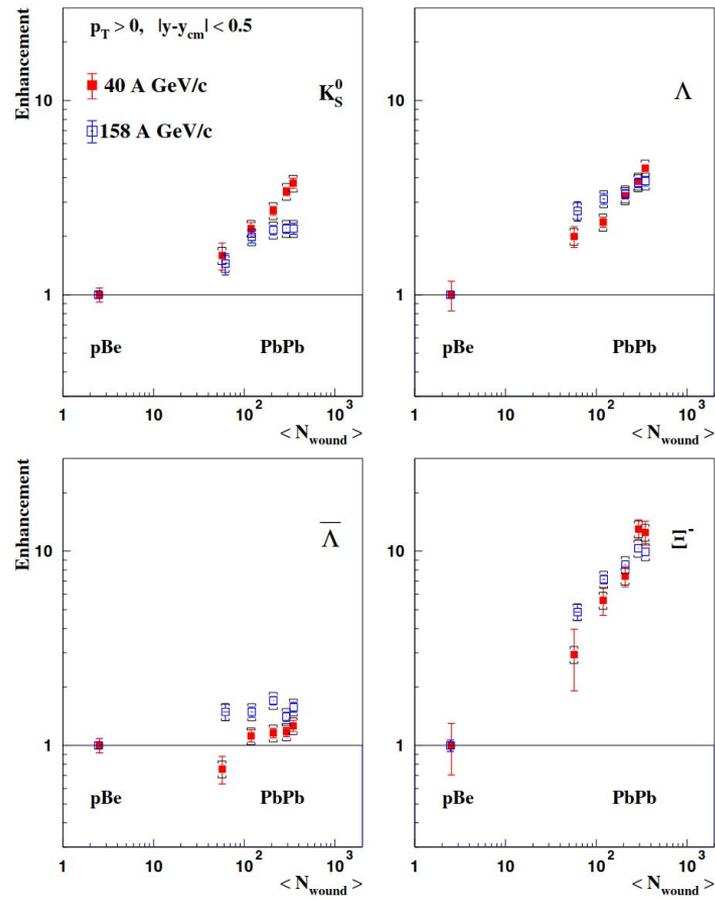
- Кварк-глюонная плазма и выход странных частиц
- Σ -гипероны
- Результаты экспериментов по изучению Σ -гиперонов
- Краткий обзор результатов диссертационной работы

Кварк-глюонная плазма и выход странных частиц

- Кварк-глюонная плазма (QGP) — это экстремальное состояние материи, в котором кварки и глюоны существуют в виде свободных частиц. Это состояние достигается при сверхвысоких температурах и/или огромных плотностях
- Увеличение выхода странных частиц было одним из первых предложенных признаков образования кварк-глюонной плазмы (QGP) в столкновениях тяжелых ионов [1]. С тех пор было проведено множество измерений, и эта идея получила значительное развитие
- Сначала увеличение выхода странных частиц наблюдалось на SPS в экспериментах WA97 [2] и NA57 [3], затем оно было замечено также на RHIC [4, 5] и при энергиях LHC [6, 7]

Эксперименты WA97 [2] и NA57 [3] на SPS

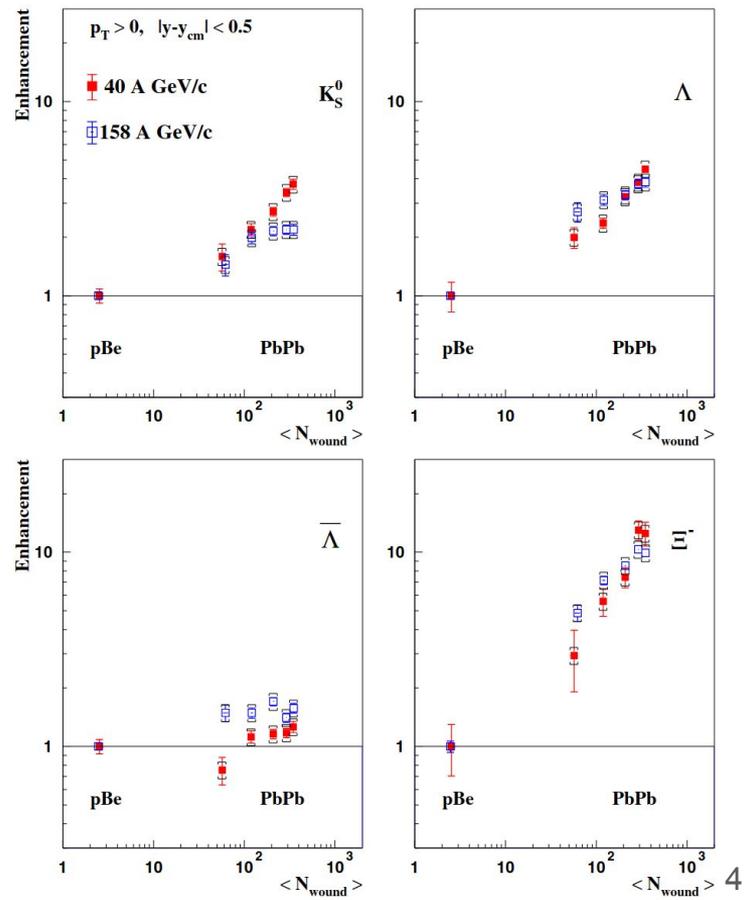
- NA57 является продолжением эксперимента WA97
- Исследование увеличения выхода странных частиц в зависимости от количества странных кварков и центральности столкновения ($\langle N_{\text{wound}} \rangle$)
- Столкновения пучков p и Pb по мишеням Be и Pb, соответственно, при двух энергиях



Эксперименты WA97 [2] и NA57 [3] на SPS

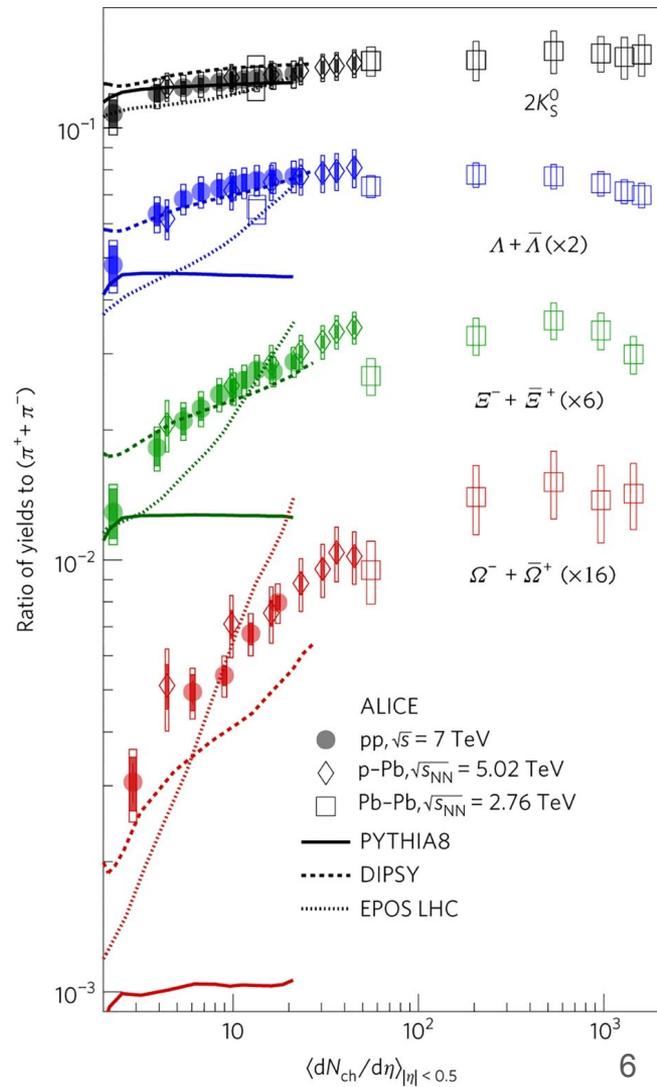
- $\langle N_{\text{wound}} \rangle$ – среднее число участников, согласно модели Глаубера
- Усиление (Enhancement, E) растет с увеличением странности образующихся адронов
- Усиление растет с числом нуклонов, участвующих в столкновении, во всем исследованном диапазоне центральности, от периферийных до центральных столкновений

$$E = \left(\frac{Y}{\langle N_{\text{wound}} \rangle} \right)_{\text{Pb-Pb}} / \left(\frac{Y}{\langle N_{\text{wound}} \rangle} \right)_{\text{p-Be}}$$



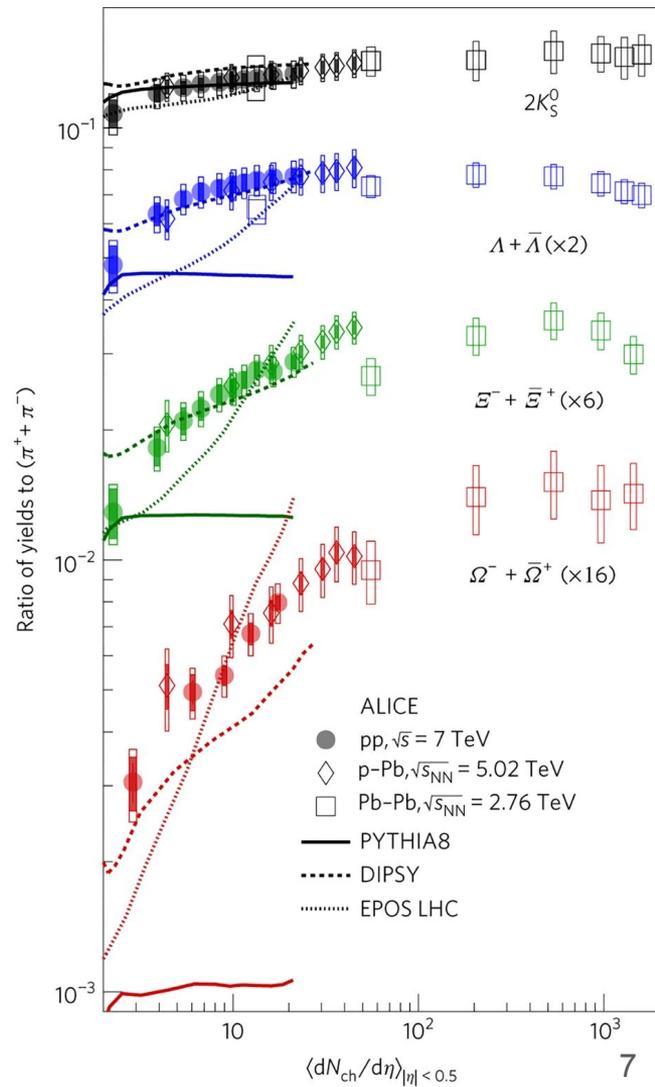
Эксперимент ALICE

- Неожиданно увеличение рождения странных адронов наблюдалось не только в ядро-ядерных (AA) столкновениях, но и в p–A (протон-ядерных) и даже в протон-протонных (pp) столкновениях с высокой множественностью, демонстрируя плавный переход от pp к AA столкновениям в зависимости от плотности заряженных частиц
- Отношения выходов K_S^0 , Λ , Ξ и Ω к выходу пионов ($\pi^+ + \pi^-$) как функция средней плотности заряженных частиц
- $\langle dN_{ch}/d\eta \rangle$ – средняя плотность заряженных частиц



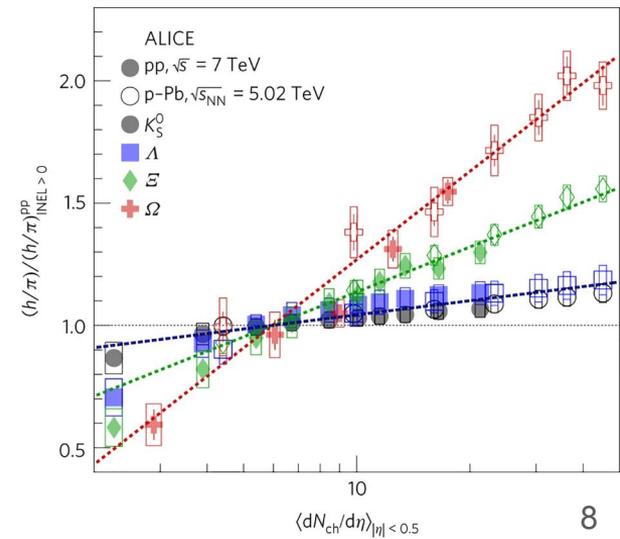
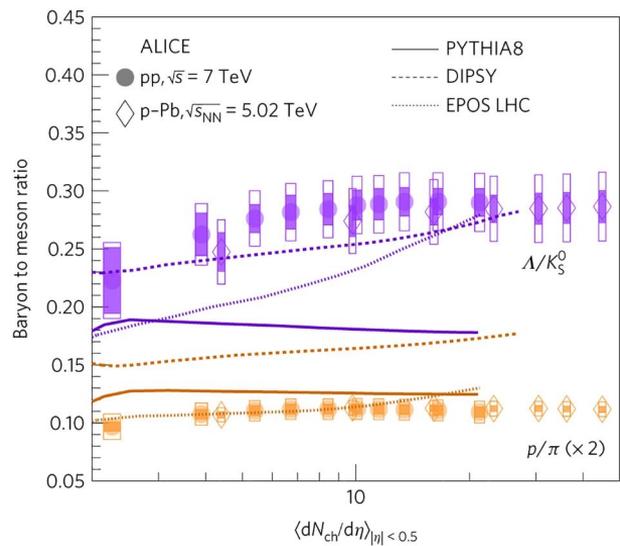
Эксперимент ALICE

- Значительное увеличение количества странных и нестранных адронов с ростом множественности частиц в pp столкновениях
- При высокой множественности отношения выходов достигают значений, аналогичных наблюдаемым в Pb–Pb столкновениях, где не наблюдается существенного изменения с множественностью
- Соотношение частиц в pp и p–Pb одинаково при одном и том же $\langle dN_{ch}/d\eta \rangle$



Эксперимент ALICE

- Отношения выходов Λ/K_S^0 и p/π существенно не меняются с увеличением множественности – увеличение количества рождения странных адронов по сравнению с пионами не связано с разницей в массах адронов
- Увеличение образования странных адронов наряду с постоянным образованием протонов относительно пионов не может быть одновременно воспроизведено ни одной из МК моделей
- DIPSY, представляет собой модель, в которой взаимодействие между глюонными струнами разрешено для формирования «colour ropes»
- Отношения выхода к пионам, деленные на значения, измеренные в инклюзивном классе событий $INEL > 0$ pp, как для pp, так и для p-Pb столкновений, следуют иерархии, определяемой странностью адронов



Сигма-гипероны

- Сигма-гипероны имеют незначительную долю от распадов более тяжелых резонансов и позволяют напрямую исследовать образование странности
- Σ^0 производят значительный вклад в выход Λ , поэтому важно правильно оценивать данный вклад для корректного сравнения с МК моделями
- Большинство экспериментов оптимизированы для детектирования распадов на заряженные частицы, однако, все Σ барионы имеют как минимум одну нейтральную частицу в распаде
- Фотоны, полученные в результате распада, имеют низкую энергию, что делает их трудными для регистрации в многочастичном конечном состоянии адронного столкновения

$$\Sigma^0 = uds, \quad m_{\Sigma^0} = 1192.642 \pm 0.024 \text{ МэВ}$$

$$\Sigma^+ = uus, \quad m_{\Sigma^+} = 1189.37 \pm 0.07 \text{ МэВ}$$

$$\Sigma^- = dds, \quad m_{\Sigma^-} = 1197.449 \pm 0.030 \text{ МэВ}$$

$$\Sigma^0 \rightarrow \Lambda \gamma, (100)\%$$

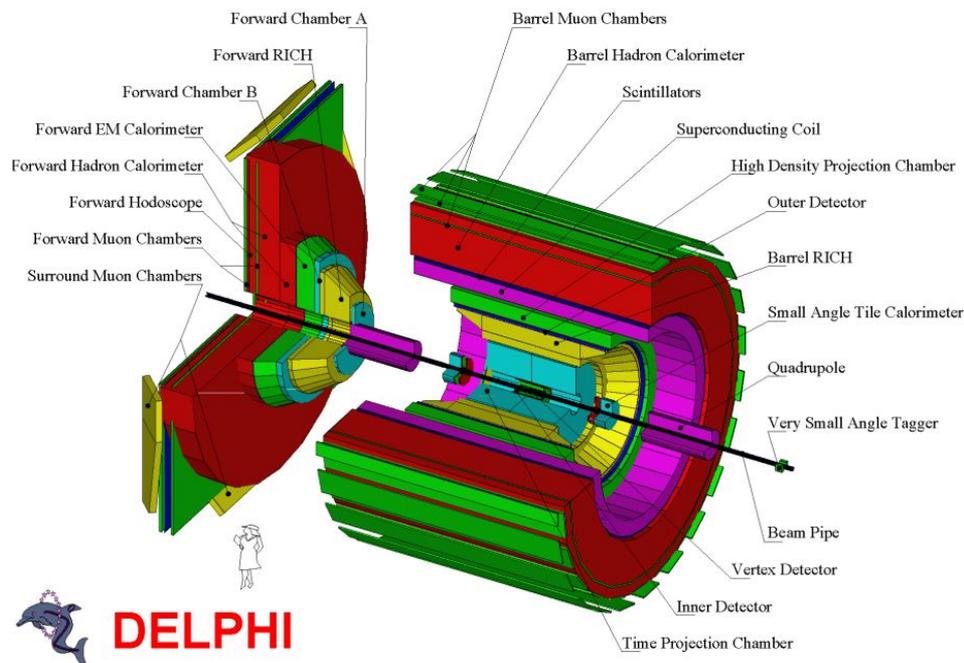
$$\Sigma^+ \rightarrow n \pi^+, (48.43 \pm 0.30)\%$$

$$\Sigma^+ \rightarrow p \pi^0, (51.47) \pm 0.30)\%$$

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

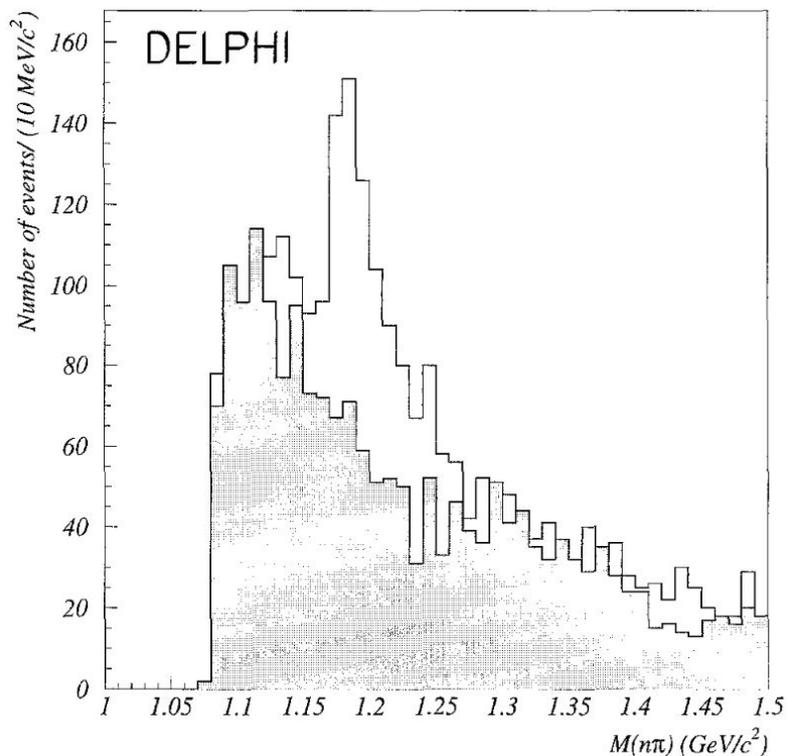
Эксперимент DELPHI на LEP

- Поиск Σ^\pm -гиперонов осуществлялся в адронных распадах Z-бозонов
- Метод основан на топологии распада Σ^\pm (кинк) – $\Sigma^- = 4,49$ см, $\Sigma^+ = 2,39$ см
- Существуют и другие источники, дающие такую же топологическую сигнатуру:
- Границы секторов TPC
- Ядерные взаимодействия
- Неэффективность ассоциации хитов с треками
- Дальнейшее уменьшение фона достигается требованием наличия энергии в адронном калориметре в направлении ожидаемого нейтрона



Эксперимент DELPHI на LEP

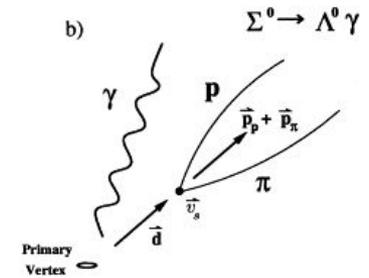
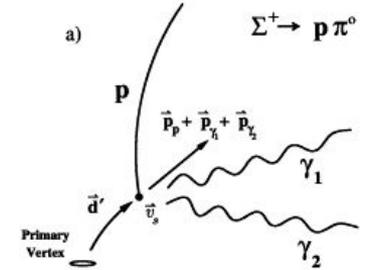
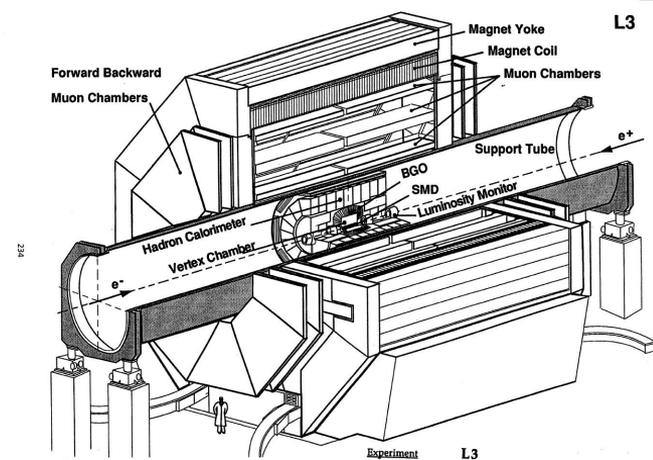
- Получены спектры инвариантных масс нейтрон–пионных кандидатов
- Впервые установлено, что выход Σ^\pm в адронных распадах Z-бозона согласуется со значениями моделей JETSET (0.18) и HERWIG (0.14)



Hadron Type	Number / event	JETSET	HERWIG
K^0	$1.962 \pm 0.022 \pm 0.056$	2.15	2.37
Λ	$0.357 \pm 0.003 \pm 0.017$	0.373	0.421
Ξ^-	$0.0250 \pm 0.0009 \pm 0.0021$	0.0265	0.058
$\Xi(1530)^0$	$0.0041 \pm 0.0004 \pm 0.0004$	0.0052	0.027
$\Sigma(1385)^\pm$	$0.0382 \pm 0.0028 \pm 0.0045$	0.0730	0.134
Σ^\pm	$0.170 \pm 0.014 \pm 0.061$	0.180	0.142

Эксперимент L3 на LEP

- Использование мод распада с фотонами, позволяет проводить измерения вплоть до низких барионных импульсов благодаря способности детектора L3 детектировать низкоэнергетичные фотоны
- Реконструкция Σ через вторичную вершину и соответствующую топологию распада



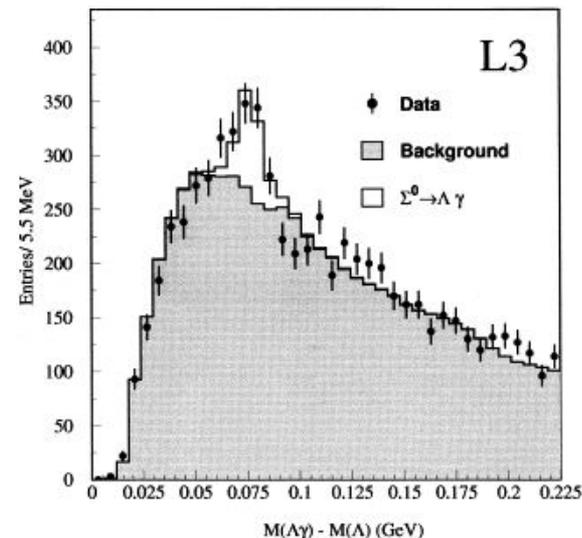
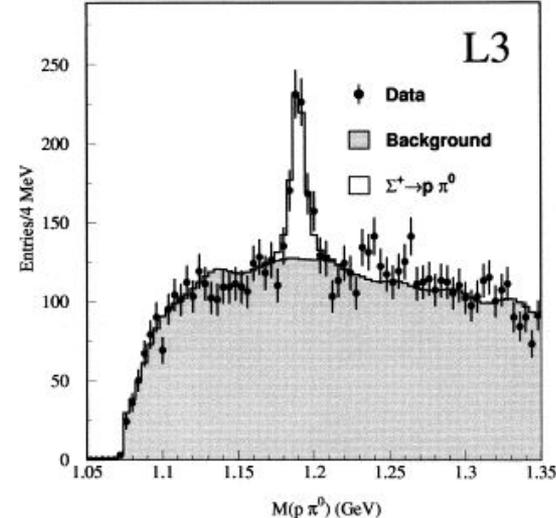
Эксперимент L3 на LEP

- Измерения выходов Σ^+ и Σ^0 в адронных Z-распадах сравниваются с количеством барионов, предсказанным моделями JETSET, HERWIG и ARIADNE, в таблице
- Предсказания всех этих моделей недооценивают измеренные выходы
- Использование фотонов низких энергий в измерениях выходов Σ^+ и Σ^0 позволяет расширить кинематический диапазон, охватываемый измерениями L3, до более низких импульсов барионов, чем те, которые измеряются другими детекторами LEP

$$\langle N_{\Sigma^+} \rangle + \langle N_{\bar{\Sigma}^+} \rangle = 0.114 \pm 0.011_{\text{stat}} \pm 0.009_{\text{syst}}$$

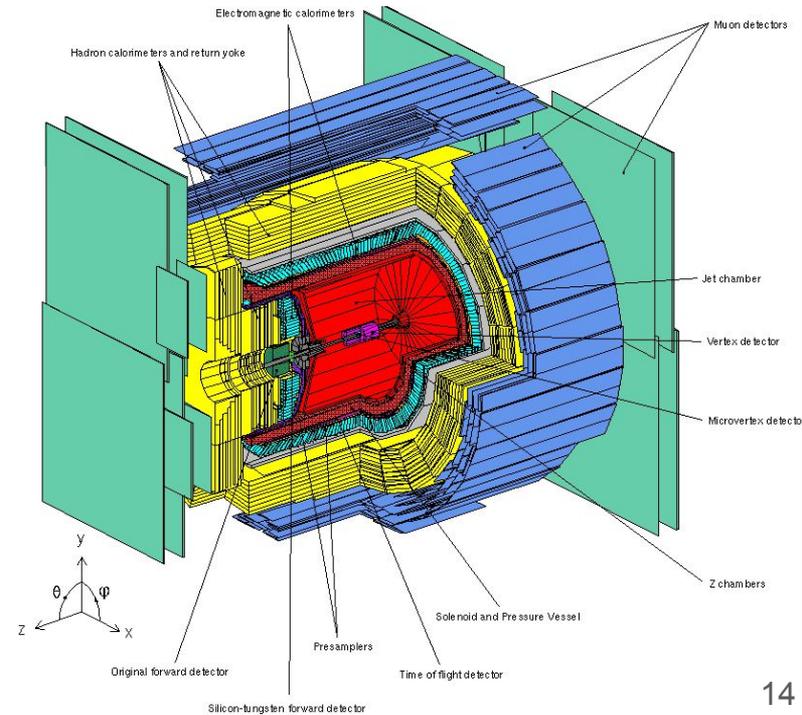
$$\langle N_{\Sigma^0} \rangle + \langle N_{\bar{\Sigma}^0} \rangle = 0.095 \pm 0.015_{\text{stat}} \pm 0.013_{\text{syst}}$$

Monte Carlo	$\langle N_{\Sigma^+} \rangle + \langle N_{\bar{\Sigma}^+} \rangle$	$\langle N_{\Sigma^0} \rangle + \langle N_{\bar{\Sigma}^0} \rangle$
JETSET	0.0711	0.0691
HERWIG	0.0978	0.0692
ARIADNE	0.0716	0.0685
string-based model	0.0740	0.0774
hadron gas model	0.0732	0.0766



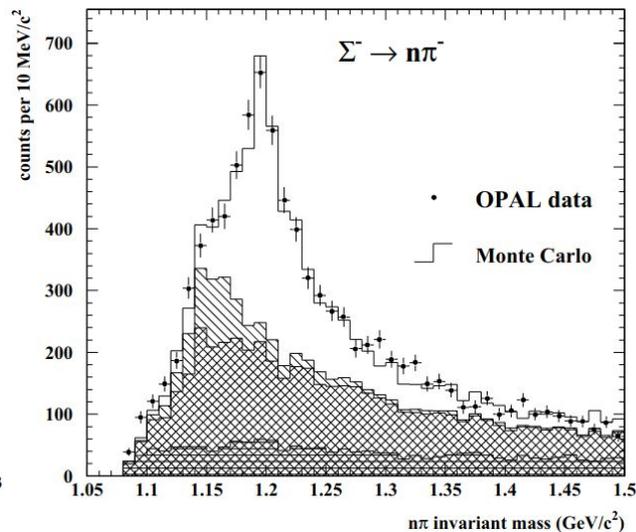
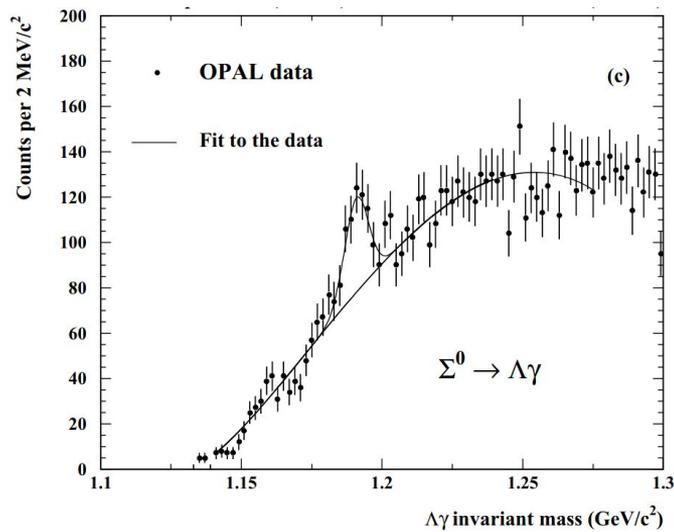
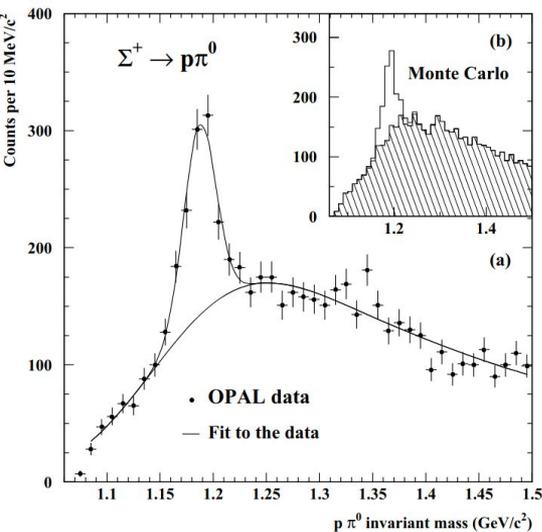
Эксперимент OPAL на LEP

- Измерения выходов Σ^+ , Σ^0 и Σ^- в адронных распадах Z бозона
- Используются различные закономерности в топологии распада, трековые детекторы, калориметр



Эксперимент OPAL на LEP

- Метод фотонной конверсии (PCM) дополнительно к электромагнитному калориметру
- Σ^- восстанавливается с учетом топологии. Нужно учитывать фоновые распады K^- и Ξ^-



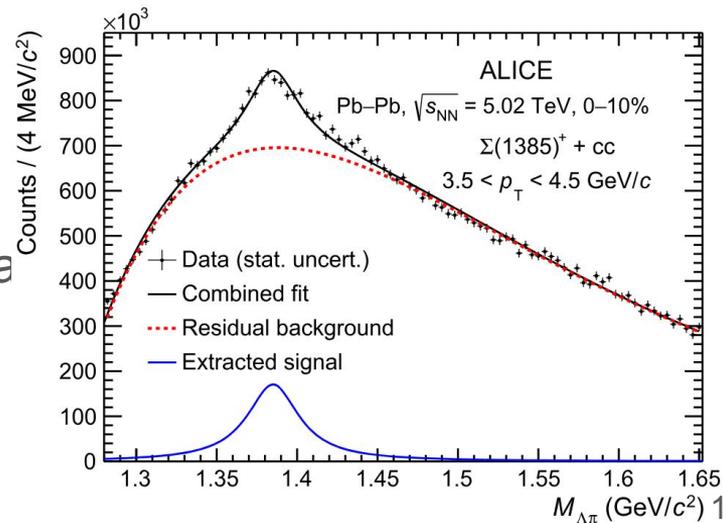
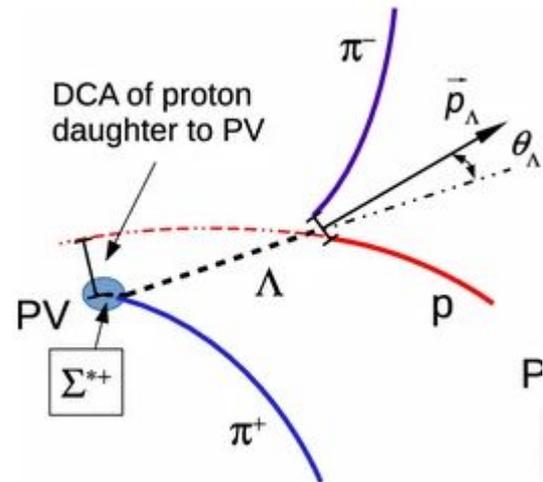
Эксперимент OPAL на LEP

- Впервые были отдельно измерены инклюзивные выходы трех изоспиновых состояний
- Значения соответствуют прогнозам генератора событий JETSET 7.4 и HERWIG 5.5
- Результаты измерения соответствуют результатам предыдущих экспериментов DELPHI и L3

particle	DELPHI	OPAL	JETSET 7.4	HERWIG 5.6	Therm. Model
Σ^+	-	0.099 ± 0.015	0.072	0.072	0.077
Σ^0	0.070 ± 0.014	0.071 ± 0.018	0.073	0.056	0.077
Σ^-	-	0.083 ± 0.011	0.067	0.060	0.069
$\frac{1}{2}[\Sigma^+ + \Sigma^-]$	0.085 ± 0.031	0.087 ± 0.009	-	-	-
$\frac{1}{3}[\Sigma^+ + \Sigma^0 + \Sigma^-]$	0.073 ± 0.013	0.084 ± 0.009	-	-	-

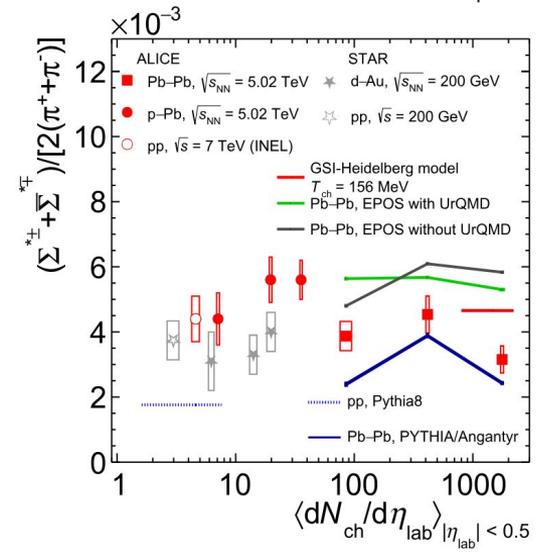
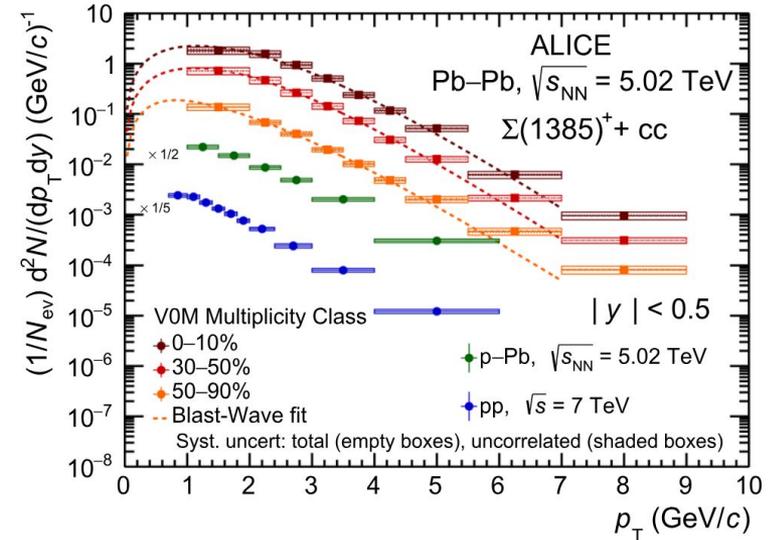
Возбужденные состояние Σ

- В предыдущих измерениях возбужденных состояний Σ -барионов проводились сравнения с различными МС-генераторами и были обнаружены большие отклонения как в форме, так и в выходе p_T -спектров. В этом отношении измерение Σ является важной перекрестной проверкой и вкладом в ограничение моделей
- Реконструкция $\Sigma(1385)$ по топологии каскада



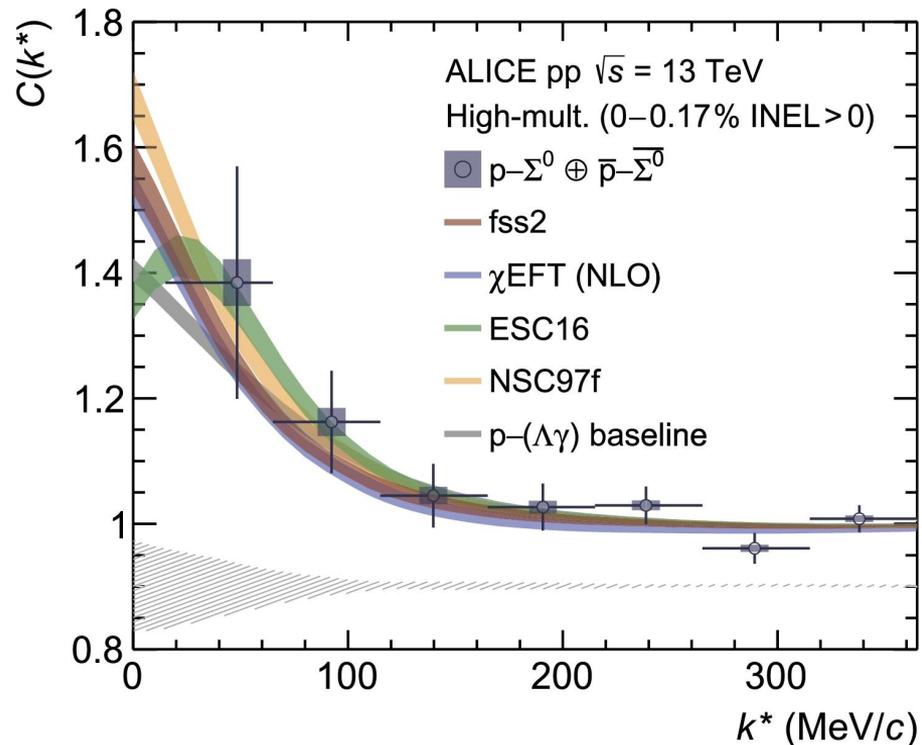
Возбужденные состояние Σ

- Представлены распределения по поперечному импульсу $\Sigma(1385)^+$ в Pb–Pb столкновениях, они сравниваются с измерениями в неупругих pp столкновениях @ 7 ТэВ и в недифракционных (NSD) p–Pb столкновениях @ 5.02 ТэВ
- В центральных столкновениях наблюдается подавление по отношению к гранд-канонической тепловой модели
- EPOS3, соединенная с UrQMD, описывает зависимость от центральности, она явно переоценивает выход $\Sigma(1385)^{\pm}$
- PYTHIA8/Angantyr не воспроизводит выход $\Sigma(1385)^{\pm}$, но при этом отражает зависимость $\Sigma(1385)^{\pm}/\pi$ от центральности в пределах неопределенности



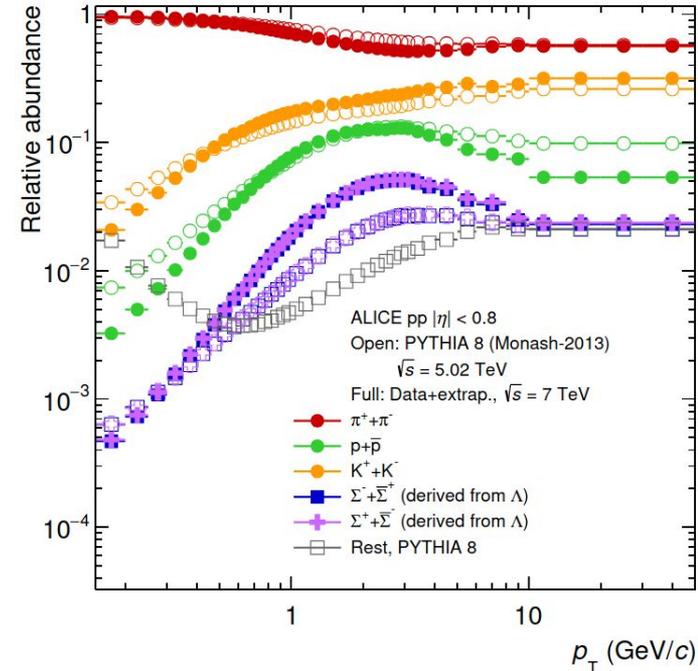
Гиперон-нуклонное взаимодействие

- Количественное понимание гиперон-нуклонного взаимодействия в секторе странности $S = -1$ имеет фундаментальное значение для выяснения роли странности в квантовой хромодинамике низких энергий и для изучения свойств барионной материи при конечных плотностях
- Включение гиперонов в описание ядерной материи внутри нейтронных звезд НЗ обычно содержит только лямбда-состояния, а среднее по величине притяжение нуклон-лямбда приводит к довольно мягким уравнениям состояния (EoS) для НЗ. Они не могут обеспечить стабильность звезд с массой около двух солнечных масс
- Измеренная корреляция указывает на наличие малого сильного взаимодействия
- Текущая экспериментальная точность пока не позволяет различать различные модели



Спектры заряженных частиц

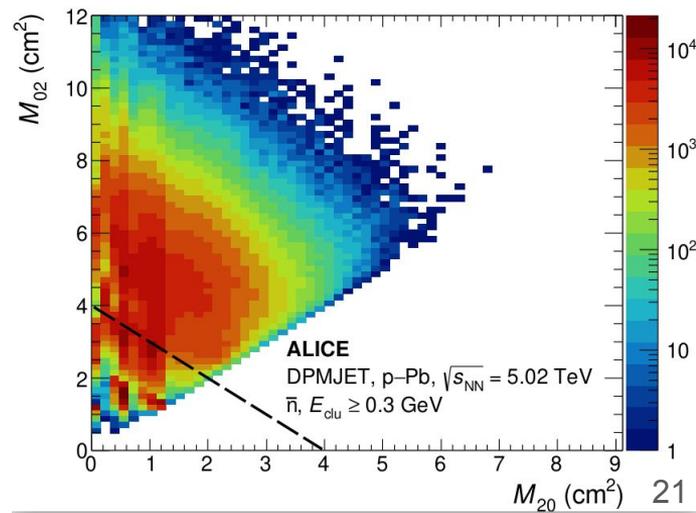
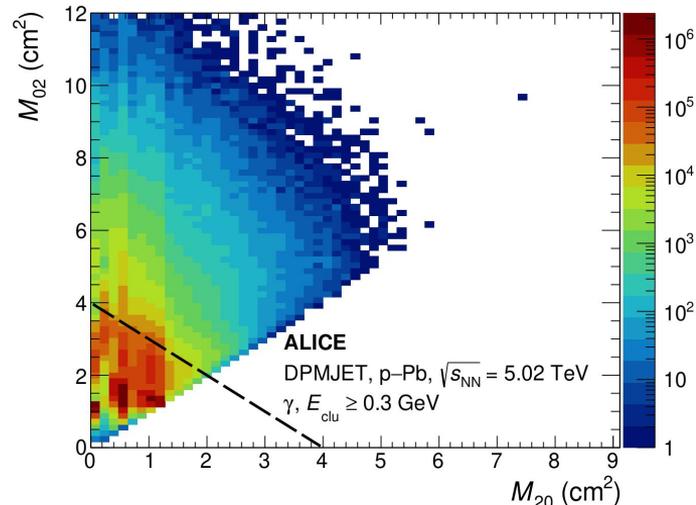
- Измерение выхода Σ важно как исходный параметр для измерения инклюзивных спектров заряженных частиц
- Сравнение относительного количества частиц, измеренного ALICE в pp столкновениях @ 7 ТэВ, с результатами моделирования методом Монте-Карло с помощью генератора событий PYTHIA 8 (Monash 2013 tune) @ 5.02 ТэВ
- p_T -спектры Σ^\pm аппроксимируются с помощью измеренного спектра Λ -гиперонов, масштабированного на отношение Σ^\pm к Λ -гиперонам из генератора Монте-Карло



Реконструкция антинейтронов

- Метод регистрации антинейтронов с помощью электромагнитного калориметра
- Идентификация антинейтронов по форме ливня
- Восстановление импульса по информации о времени пролета

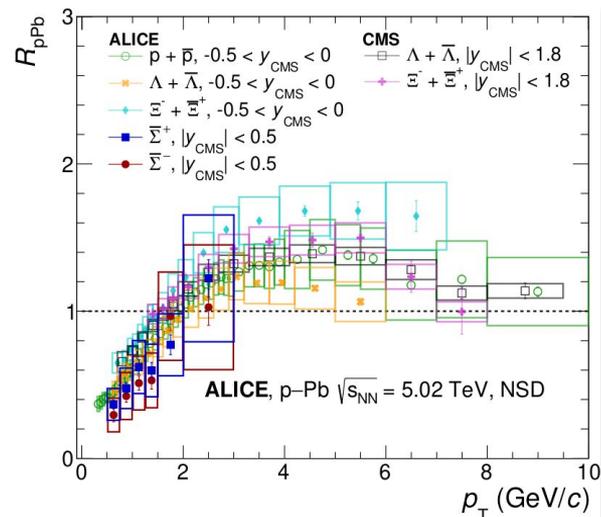
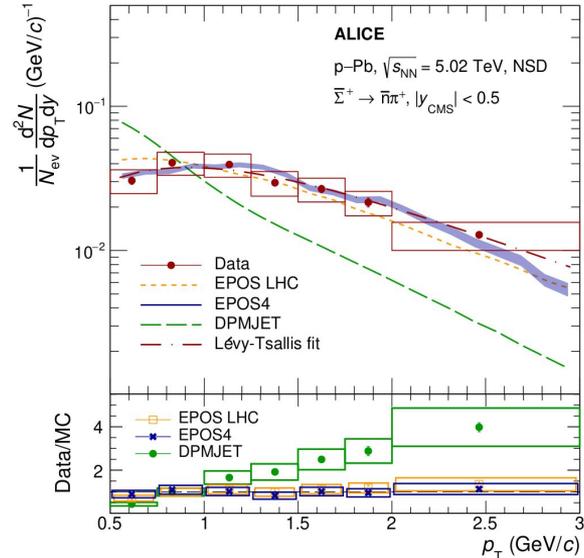
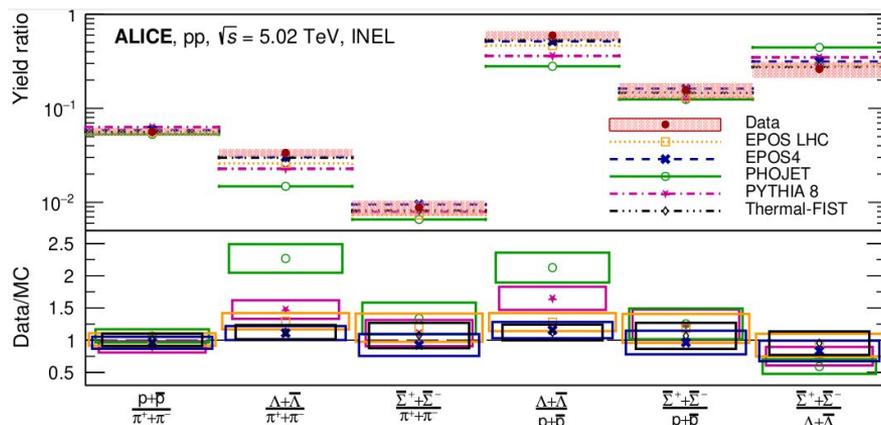
$$p_{\text{rec}} = \frac{m_n c}{\sqrt{(c \cdot t/l)^2 - 1}}$$



Измерение анти- Σ -гиперонов в pp и p -Pb @ 5.02 ТэВ

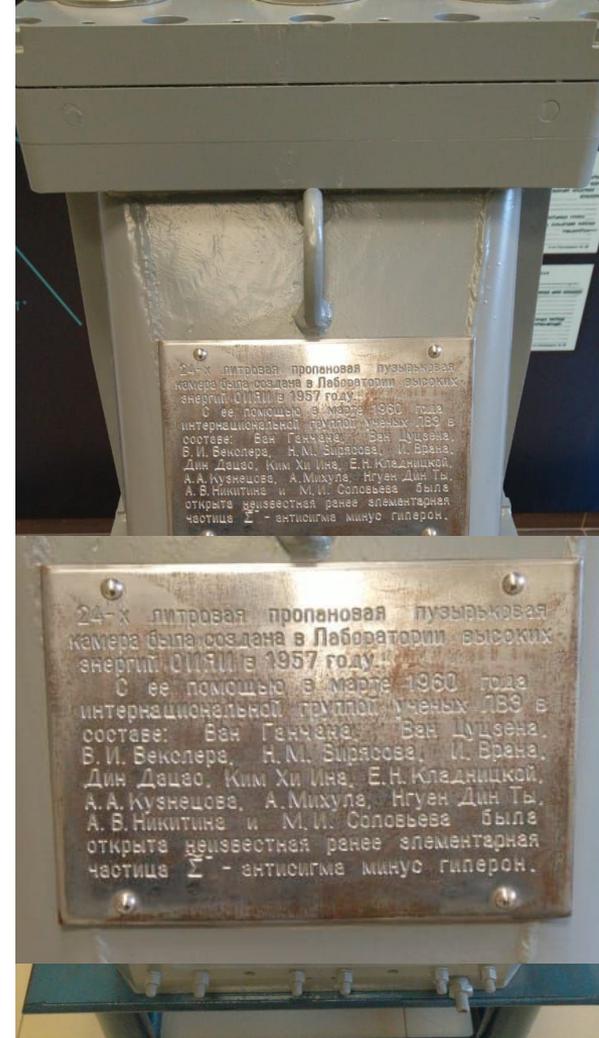
- p_T -спектры анти- Σ^\pm в pp и p -Pb @ 5.02 ТэВ
- p_T -дифференциальные и -интегральные выходы и отношения
- Сравнение с МК моделями
- Получен фактор ядерной модификации

R_{pPb}



Заключение

- Исследование барионов со странностями вносит важный вклад в понимание механизма производства странных адронов в pp, p-A и A-A столкновениях и служит ориентиром для генераторов событий Монте-Карло (МК), основанных на КХД, которые обычно склонны недооценивать выход странных адронов
- Σ^0 производят значительный вклад в выход Λ , поэтому важно правильно оценивать данный вклад для корректного сравнения с МК моделями
- Большинство экспериментов оптимизированы для детектирования распадов на заряженные частицы, однако, все Σ барионы имеют как минимум одну нейтральную частицу в распаде, что делает их изучение затруднительным
- Включение гиперонов в описание ядерной материи внутри нейтронных звезд НЗ (обеспечение стабильности звезд с массой около двух солнечных масс)
- Измерение выхода Σ важно как исходный параметр для измерения инклюзивных спектров заряженных частиц



Список литературы

- [1] J. Rafelski and B. Müller, “Strangeness production in the quark-gluon plasma,” *Phys. Rev. Lett.* **48** (1982) 1066–1069. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.48.1066>.
- [2] **WA97** Collaboration, E. Andersen *et al.*, “Strangeness enhancement at mid-rapidity in Pb Pb collisions at 158-A-GeV/c,” *Phys. Lett. B* **449** (1999) 401–406.
- [3] **NA57** Collaboration, F. Antinori *et al.*, “Strangeness enhancements at central rapidity in 40 A GeV/c Pb-Pb collisions,” *J. Phys. G* **37** (2010) 045105, arXiv:1001.1884 [nucl-ex].
- [4] **PHENIX** Collaboration, K. Adcox *et al.*, “Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX collaboration,” *Nucl. Phys. A* **757** (2005) 184–283, arXiv:nucl-ex/0410003.
- [5] **STAR** Collaboration, B. I. Abelev *et al.*, “Systematic Measurements of Identified Particle Spectra in pp, d+ Au and Au+Au Collisions from STAR,” *Phys. Rev. C* **79** (2009) 034909, arXiv:0808.2041 [nucl-ex].
- [6] **ALICE** Collaboration, B. B. Abelev *et al.*, “Multi-strange baryon production at mid-rapidity in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV,” *Phys. Lett. B* **728** (2014) 216–227, arXiv:1307.5543 [nucl-ex]. [Erratum: *Phys.Lett.B* 734, 409–410 (2014)].
- [7] **CMS** Collaboration, V. Khachatryan *et al.*, “Multiplicity and rapidity dependence of strange hadron production in pp, pPb, and PbPb collisions at the LHC,” *Phys. Lett. B* **768** (2017) 103–129, arXiv:1605.06699 [nucl-ex].
- [8] **ALICE** Collaboration, J. Adam *et al.*, “Enhanced production of multi-strange hadrons in high-multiplicity proton-proton collisions,” *Nature Phys.* **13** (2017) 535–539, arXiv:1606.07424 [nucl-ex].
- [9] **ALICE** Collaboration, S. Acharya *et al.*, “The ALICE experiment: a journey through QCD,” *Eur. Phys. J. C* **84** no. 8, (2024) 813, arXiv:2211.04384 [nucl-ex].
- [10] **ALICE** Collaboration, J. Adam *et al.*, “Multi-strange baryon production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV,” *Phys. Lett. B* **758** (2016) 389–401, arXiv:1512.07227 [nucl-ex].
- [11] **Particle Data Group** Collaboration, S. Navas *et al.*, “Review of particle physics,” *Phys. Rev. D* **110** no. 3, (2024) 030001.
- [12] **DELPHI** Collaboration, P. Abreu *et al.*, “Strange baryon production in Z hadronic decays,” *Z. Phys. C* **67** (1995) 543–554.
- [13] **L3** Collaboration, M. Acciarri *et al.*, “Inclusive Σ^+ and Σ^0 production in hadronic Z decays,” *Phys. Lett. B* **479** (2000) 79–88, arXiv:hep-ex/0002066.
- [14] **OPAL** Collaboration, G. Alexander *et al.*, “ Σ^+ , Σ^0 and Σ^- hyperon production in hadronic Z0 decays,” *Z. Phys. C* **73** (1997) 587–600.
- [15] A. Andronic, F. Beutler, P. Braun-Munzinger, K. Redlich, and J. Stachel, “Thermal description of hadron production in e+e- collisions revisited,” *Phys. Lett. B* **675** (2009) 312–318, arXiv:0804.4132 [hep-ph].