

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-2014-XX

На правах рукописи
УДК XXX.XXX+XXX.XXX

РОССИЙСКАЯ
Наталья Сергеевна

ОБРАЗОВАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ГИПЕРОНОВ
В ГЛУБОКО-НЕУПРУГОМ РАССЕЯНИИ МЮОНОВ
НА ДЕЙТРОНАХ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ COMPASS (CERN)

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра и
элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2014

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий Объединённого института ядерных исследований, Дубна.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук Кузнецов
Олег Михайлович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Васильев
Александр Николаевич

доктор физико-математических наук Зотов
Николай Петрович

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет, Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится “ ____ ” _____ 2014 г. на заседании диссертационного совета Д 720.001.02 при Лаборатории физики высоких энергий им. В.И.Векслера и А.М.Балдина в Объединённом институте ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2014 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединённого института ядерных исследований.

Учёный секретарь диссертационного
совета, кандидат физико-математических наук

Арефьев
Валентин Александрович

Общая характеристика работы

Актуальность диссертации. Настоящая диссертация посвящена изучению рождения тяжелых гиперонов в глубоко-неупругом рассеянии (ГНР) заряженных мюонов на изоскалярной мишени. Исследования выполнены на установке COMPASS (COmmon Muon Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy) расположенной на канале M2 ускорителя SPS (Super Proton Synchrotron) европейской организации по ядерным исследованиям CERN (Centre Européen pour la Recherche Nucléaire). Набор данных проводился в 2003-2004 годах на пучке мюонов с импульсом 160 ГэВ/с. Исследование относительных выходов тяжелых гиперонов и антигиперонов в ГНР важно для понимания роли странных кварков в структуре нуклона и в процессе адронизации. Самый легкий из группы странных барионов - Λ гиперон изучен наиболее подробно. Различают прямое рождение Λ гиперонов в первичной вершине и не прямое от каскадных распадов более тяжелых гиперонов, таких как Σ^0 , Σ^* или Ξ ¹. Исследование относительных выходов тяжелых гиперонов и антигиперонов необходимы для интерпретации результатов многих экспериментов, например результатов по измерениям продольной поляризации Λ и $\bar{\Lambda}$ гиперонов рожденных в глубоко-неупругом рассеянии мюонов. Продольная передача спина в Λ ($\bar{\Lambda}$) в ГНР была измерена в экспериментах [1–9]. Λ гипероны, рожденные из распадов более тяжелых гиперонов, поляризованы иначе, чем рожденные напрямую. До настоящей работы, существовавшая оценка [1] указывала, что только 40% наблюдаемых Λ гиперонов рождаются напрямую.

Относительные выходы Σ^0 , Σ^{*+} , Σ^{*-} и Ξ^- изучались в слабых взаимодействиях в эксперименте NOMAD (Neutrino Oscillation MAgnetic Detector) с использованием нейтринного пучка [10]. До настоящей работы информация об образовании тяжелых гиперонов в электромагнитных взаимодействиях отсутствовала, а относительные выходы античастиц $\bar{\Sigma}^{*-}$, $\bar{\Sigma}^{*+}$ и $\bar{\Xi}$ никогда не изучались в ГНР.

Выполненный в диссертации анализ основан на статистике 112000 Λ и 67000 $\bar{\Lambda}$ событий, что является уникальным набором данных, особенно из-за рекордной статистики $\bar{\Lambda}$ [11].

Основными целями диссертационной работы были:

1. Изучение рождения тяжелых гиперонов и антигиперонов $\Sigma(1385)^+$,

¹Здесь и дальнейшем (за исключением отдельных случаев) масса гиперонов $\Sigma(1385)$ и $\Xi(1321)$ не будет указываться, но будет использоваться символ "*" для $\Sigma(1385)$ с $J^P = 3/2^+$. Кроме того, все гипероны, за исключением Λ бариона, будут называться тяжелыми.

$\Sigma(1385)^-$, $\bar{\Sigma}(1385)^-$, $\bar{\Sigma}(1385)^+$, $\Xi(1321)^-$ и $\bar{\Xi}(1321)^+$ в ГНР заряженных лептонов.

2. Оптимизация параметров программы моделирования LEPTO/JETSET [12, 13], связанных с рождением странных частиц, на основе выполненных измерений.

Научная новизна

1. Впервые в ГНР заряженных лептонов измерены выходы тяжелых гиперонов Σ^{*+} , Σ^{*-} , Ξ^- и антигиперонов $\bar{\Sigma}^{*-}$, $\bar{\Sigma}^{*+}$, $\bar{\Xi}^+$ по отношению к Λ и $\bar{\Lambda}$ соответственно. Все относительные выходы составляют от 3,8% до 5,6%. В пределах относительной неопределенности порядка 10%, измеренные значения относительных выходов для гиперонов и антигиперонов совпадают.

2. Впервые измеренные относительные выходы антигиперонов Σ^{*-} , $\bar{\Sigma}^{*+}$ и Ξ^- уникальны. Если для тяжелых гиперонов существовали измерения в ГНР нейтрино, то выходы антигиперонов никогда не изучались в ГНР.

3. Измерены относительные выходы тяжелых гиперонов и антигиперонов не только в ГНР ($Q^2 > 1$ (ГэВ/с)²), но и во всей кинематической области Q^2 и y . В пределах статистических ошибок величина этих выходов не зависит от значения Q^2 .

4. Из результатов измерений в сравнении с предсказаниями Монте-Карло получены новые значения параметров LEPTO/JETSET генератора, связанные с рождением странных кварков и процессами их фрагментации. Новые значения этих параметров существенно отличаются от параметров, включенных в стандартную версию LEPTO/JETSET.

5. Используя новые значения параметров генератора LEPTO/JETSET, получено, что не прямой выход Λ и $\bar{\Lambda}$ в ГНР составляет (37±3)% и (32±3)% соответственно от полного числа рожденных гиперонов.

Практическая ценность работы

1. Разработаны и реализованы критерии отбора для реконструкции тяжелых гиперонов и антигиперонов, рожденных в ГНР заряженных лептонов на изоскалярной мишени.

2. Результаты выполненных впервые измерений относительных выходов тяжелых гиперонов и антигиперонов могут использоваться при анализе текущих и планировании будущих экспериментов.

3. Измерения относительных выходов позволили провести оптимизацию значений параметров LEPTO/JETSET PARJ(1) - PARJ(5), PARJ(7)

генератора связанных с рождением странных кварков и процессами их фрагментации. Новые значения этих параметров существенно отличаются от значений использовавшихся в генераторе до настоящей работы.

Автор защищает:

1. Полученные впервые результаты измерений относительных выходов тяжелых гиперонов $\Sigma(1385)^+$, $\Sigma(1385)^-$, $\Xi(1321)^-$ и антигиперонов $\bar{\Sigma}(1385)^-$, $\bar{\Sigma}(1385)^+$, $\bar{\Xi}(1321)^+$ по отношению к Λ и $\bar{\Lambda}$ барионам в ГНР заряженных лептонов на изоскалярной мишени.

2. Сравнительный анализ относительных выходов тяжелых гиперонов и антигиперонов в ГНР по отношению ко всей кинематической области Q^2 и y . Независимость в пределах статистических ошибок относительных выходов от значения Q^2 .

3. Оптимизацию параметров программы моделирования LEPTO/JET-SET для наиболее точного описания результатов выполненных измерений по рождению гиперонов и антигиперонов.

4. Оценки непрямого выхода Λ и $\bar{\Lambda}$ барионов в ГНР, которые составляют $(37\pm 3)\%$ и $(32\pm 3)\%$ соответственно от полного числа рожденных гиперонов.

Апробация работы Результаты работы были опубликованы в зарубежных и российских журналах, а также неоднократно докладывались автором на рабочих совещаниях коллаборации COMPASS, научных семинарах и международных конференциях:

1. The 2013 European Physical Society Conference on High Energy Physics, Стокгольм, Швеция, 2013

2. The 20th International Symposium on Spin Physics, ОИЯИ, Дубна, Россия, 2012

3. 12th International Workshop on Meson Production, Properties and Interaction, Краков, Польша, 2012

4. Advanced Studies Institute Symmetries and Spin, Прага, Чешская Республика, 2011

5. Hadron Structure'11, Institute of Physics, SAS, Братислава, Словакия, 2011

6. XVIII International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects, Флоренция, Италия, 2010

7. XX International Baldin Seminar on High Energy Physics Problems "Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics ОИЯИ, Дубна, Россия, 2010

8. Научная сессия-конференция секции ЯФ ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий", Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова, Москва, Россия, 2009

9. XIV Научная конференция молодых ученых и специалистов, ОИЯИ, Дубна, Россия, 2010

10. 10-я Международная Байкальская Школа по Физике Элементарных Частиц и Астрофизике, Большие Коты, Россия, 2010

11. Научные семинары в Лаборатории Физики Высоких Энергий ОИЯИ, Дубна, Россия, 2009, 2010, 2011 и 2013

12. XV Научная конференция молодых ученых и специалистов, ОИЯИ, Дубна, Россия, 2011

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. С. Adolph, ..., N.Rossiyskaya, ... (COMPASS Collaboration) Study of $\Sigma(1385)$ and $\Xi(1321)$ hyperon and antihyperon production in deep inelastic muon scattering, Eur. Phys. J., C73 2013, 2581.

2. В.Ю. Алексахин, О.М. Кузнецов, Н.С. Российская, М.Г. Сапожников, Оптимизация значений параметров генератора LEPTO/JETSET для области ГНР заряженных лептонов, Письма в ЭЧАЯ, 2014, N4.

3. N.Rossiyskaya (for the COMPASS Collaboration) Study of Heavy Hyperons Production in DIS at COMPASS, ISSN 1063 7796, Physics of Particles and Nuclei, 2014, Vol. 45, No. 1, pp.113-116.

4. N.Rossiyskaya (for the COMPASS Collaboration), Yield of heavy hyperons and antihyperons in DIS, Proceeding of XVIII International Workshop on Deep-Inelastic Scattering and Related Subjects, POS(DIS 2010)132.

5. N.Rossiyskaya (for the COMPASS Collaboration), Formation of heavy hyperons and antihyperons in DIS at COMPASS, Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics: Proc. of the XX Intern. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna, Russia, October 4-9, 2010 / Ed.: S.G. Bondarenko, V.V. Burov, A.I. Malakhov, E.B. Plekhanov. Dubna: JINR, 2011, V.1. P.325-332.

6. N.Rossiyskaya (for the COMPASS Collaboration), Heavy hyperons production in DIS at COMPASS, Nucl. Phys. B (Proc.Suppl.) 219, 2011, 39-42.

7. N.Rossiyskaya (for the COMPASS Collaboration), Study of heavy hyperons production in Deep Inelastic Muon Scattering, EPJ Web of Conferences 37, 2012, 09031.

8. N.Rossiyskaya (for the COMPASS Collaboration), Study of Hyperon and Antihyperon Production in Deep Inelastic Muon Scattering PoS(EPS-HEP 2013)019.

Личный вклад автора Личный вклад автора в получение результатов, выносимых на защиту, является определяющим. Данная работа была предложена и выполнена Дубненской группой COMPASS. Результаты, вошедшие в диссертацию, по измерению выходов тяжелых гиперонов и антигиперонов были получены непосредственно автором, а оптимизация параметров генератора LEPTO проведена при его активном участии. Автор принимал активное участие в обсуждении результатов исследования и подготовке публикаций по теме диссертации. Автором неоднократно докладывались результаты работы на рабочих совещаниях коллаборации COMPASS, научных семинарах и международных конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит 112 страниц и состоит из “Введения”, четырех глав (“Формализм ГНР и рождение гиперонов”, “Эксперимент COMPASS”, “Восстановление и анализ тяжелых гиперонов на установке COMPASS”, “Монте - Карло: настройка параметров LEPTO/JETSET”), “Заключения”, двух приложений и списка цитируемой литературы. В диссертации приведены 67 рисунков и 28 таблиц.

Содержание диссертации

Во введении демонстрируется актуальность исследуемой темы, перечислены основные проблемы, сформулированы цели и практическая ценность работы, представлена научная новизна.

В первой главе приводится обзор экспериментальных данных по теме диссертации. Кратко излагается формализм ГНР заряженных лептонов на нуклоне и кварк-партоновая модель. Дается обзор по струнным моделям адронов и рассматривается вопрос о вкладе странных кварков в массу нуклона.

Во второй главе представлено общее описание спектрометра COMPASS [14]. Установка COMPASS расположена на канале M2 ускорителя SPS европейской организации CERN. Схематический вид установки COMPASS в конфигурации 2004 года представлен на Рис.1. Мюоны с энергией

160 ГэВ рассеивались на дейтронной мишени. Мишень состояла из двух ячеек, наполненных веществом ${}^6\text{LiD}$ и находилась внутри сверхпроводящего магнита.

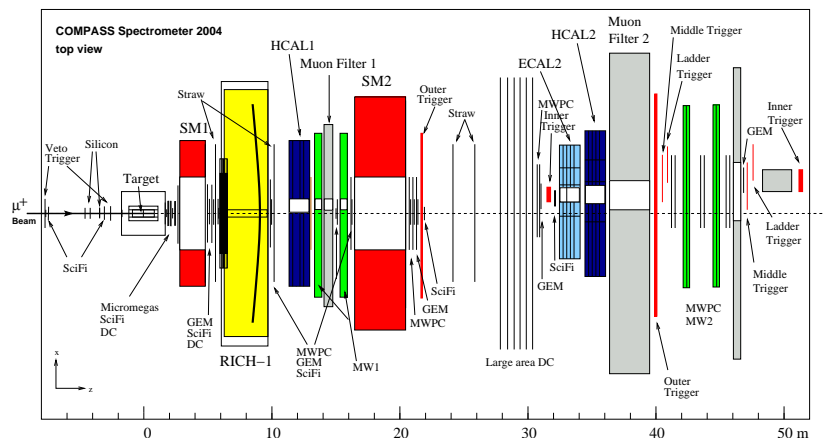


Рисунок 1: Схематический вид установки COMPASS в конфигурации 2004 года.

Спектрометр COMPASS включает в себя два дипольных магнита SM (Spectrometer Magnet). Магниты SM1 и SM2 расположены на расстоянии 14 м друг от друга и имеют интегралы магнитных полей 1 Тм и 4.4 Тм соответственно. Использование двух дипольных магнитов обеспечивает детектирование частиц в широком импульсном и угловом диапазонах. Обладая низкой отклоняющей способностью и большой угловой апертурой, SM1 служит для восстановления импульса "мягких" адронных треков, исходящих из мишени. Основное предназначение SM2 заключается в определении импульса рассеянного мюона (μ'). Таким образом, спектрометр COMPASS можно условно разделить на две части. Первая часть спектрометра - LAS (Large Angle Spectrometer), включает магнит SM1 и окружающие его детекторы. Вторая часть - SAS (Small Angle Spectrometer), включает магнит SM2, ближние к нему детекторы [15–23] и мюонную часть установки [24].

В третьей главе представлен анализ экспериментальных данных: отбор событий в ГНР, восстановление Λ и $\bar{\Lambda}$ и более тяжелых гиперонов. Представлены относительные выходы тяжелых гиперонов по отношению к Λ и $\bar{\Lambda}$ барионам.

Основной анализ экспериментальных данных производился в ГНР. События ГНР были отобраны ограничениями на виртуальность фотона $Q^2 >$

1 (ГэВ/с)² и на его относительную энергию $0.2 < y < 0.9$. Последнее ограничение исключает область, где затруднительно оценить вклад радиационных эффектов (область больших y) и события с плохо восстановленными кинематическими параметрами (область малых y). За 2003 и 2004 гг. в эксперименте COMPASS было зарегистрировано $2.58 \cdot 10^{10}$ событий из них $3.12 \cdot 10^8$ в ГНР.

В данной работе Λ и $\bar{\Lambda}$ гипероны восстанавливались по их распадам в $p\pi^-$ и $\bar{p}\pi^+$ (вторичная вершина V^0). Условия для отбора событий с Λ и $\bar{\Lambda}$ гиперонами были следующими: 1) Первичная вершина должна быть образована как минимум налетающим и рассеянным мюонами, и ее координаты должны располагаться внутри мишени, то есть $-100 < z < -40$ см или $-30 < z < 30$ см, и радиус-вектор $r < 1.4$ см, где $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$. 2) Вторичная V^0 вершина ($\chi^2 < 2$) должна быть расположена за пределами мишени на расстоянии от 35 до 140 см. 3) Импульсы заряженных адронов должны превышать 1 ГэВ/с и последняя измеренная координата трека должна находиться на расстоянии более 350 см. 4) Исключения e^+e^- пары от конверсии γ квантов в материале установки, требовалось чтобы поперечный импульс Λ ($\bar{\Lambda}$) кандидатов был больше чем 0.023 ГэВ/с. 5) Значение переменной Арментароса-Подольянского α , при отборе Λ должно быть положительным, а для $\bar{\Lambda}$ - отрицательным. 6) Анализ проводился в области фрагментации пучка ($x_F > 0.05$).

На рис. 2 показаны распределения инвариантных масс $p\pi^-$ и $\bar{p}\pi^+$. Фитирование этих распределений проводилось в интервале (1.095 – 1.140) ГэВ/с² суммой функции Гаусса и многочлена. В результате фитирования получены массы Λ и $\bar{\Lambda}$ гиперонов и их экспериментальное разрешение (см. таблицу 1).

Таблица 1: Измеренные массы Λ и $\bar{\Lambda}$ барионов и их экспериментальное разрешение (σ). Обозначение: RD - экспериментальные значения и PDG - мировые данные [25].

	m(RD), МэВ	m(PDG), МэВ	σ (RD), МэВ
Λ	1115.85 ± 0.01	1115.683 ± 0.006	2.22 ± 0.01
$\bar{\Lambda}$	1115.84 ± 0.02	1115.683 ± 0.006	2.21 ± 0.02

Общее количество восстановленных Λ и $\bar{\Lambda}$ гиперонов составило 112449 ± 418 и 66685 ± 350 , соответственно. В таблице 2 приведено сравнение числа зарегистрированных Λ и $\bar{\Lambda}$ гиперонов в экспериментах по измерению продольной передачи спина в Λ и $\bar{\Lambda}$ гиперонов в ГНР заряженных лептонов.

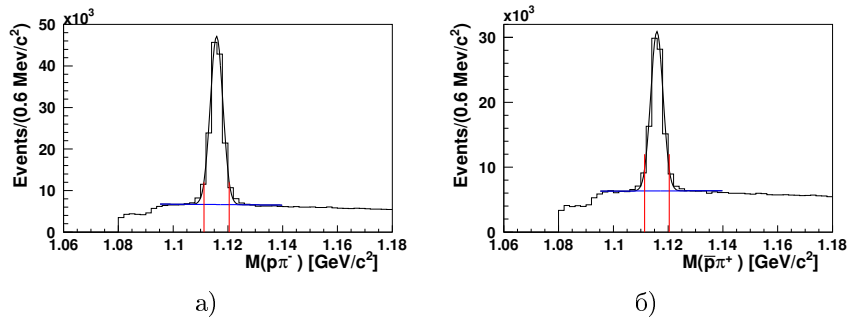


Рисунок 2: Распределения инвариантных масс $p\pi^-$ (а) и $\bar{p}\pi^+$ (б). Сплошными линиями показаны результаты фитирования сигнала от Λ и $\bar{\Lambda}$ гиперонов и фона.

Как видно из таблицы 2, в эксперименте COMPASS число зарегистрированных Λ и $\bar{\Lambda}$ гиперонов существенно превышает суммарную статистику цитируемых экспериментов.

Таблица 2: Сравнительная статистика зарегистрированных Λ и $\bar{\Lambda}$ барионов в различных экспериментах.

	$N(\Lambda)$	$N(\bar{\Lambda})$
E665 [7]	750	650
NOMAD [10]	8087	649
HERMES [1]	7300	1687
STAR [26]	30000	24000
COMPASS [11]	112000	67000

Помимо прямого рождения, Λ гиперон может образовываться в результате распада более тяжелых гиперонов. В настоящем анализе рассмотрены распады заряженных Σ^* и Ξ гиперонов и их античастиц, которые распадаются по каналам $\Lambda\pi$ с вероятностью 0.87 ± 0.02 и 1.00 ± 0.04 соответственно. Распады нейтральных гиперонов Σ^0 ($\Lambda\gamma$ $\text{Br} = 1$) и Ξ^0 ($\Lambda\pi^0$) $\text{Br}=1.00\pm 0.01$) не изучались, так как конфигурация спектрометра COMPASS 2003-2004 годов еще не содержала электромагнитных калориметров необходимых для регистрации γ -кватов и π^0 мезонов. Для восстановления распада $\Omega \rightarrow \Lambda K$ ($\text{Br} = 0.68\pm 0.01$) статистика Λ гиперонов в ГНР оказалась не достаточна.

Следует отметить, что в полной кинематической области (без ограничений по Q^2 и y) Ω гиперон хорошо виден.

Σ^* гиперон распадается за счет сильного взаимодействия, то есть вершина распада экспериментально не отделима от вершины первичного взаимодействия. Λ гиперон из распада Σ^* гиперона практически “вылетает” из первичной вершины. Эта особенность использовалась как критерий отбора и была названа условием коллинеарности. Согласно условию, угол θ_{col} между вектором импульса Λ и вектором, соединяющем первичную и вершину распада Λ бариона, должен быть меньше 0.01 рад. Так как Ξ гиперон распадается за счет слабого взаимодействия, то первичная вершина и вершина распада Ξ должны быть хорошо разделены. В этом случае условие коллинеарности применяется для Ξ гиперона. Так как направление импульса для Ξ восстанавливается с меньшей точностью, чем для Λ гиперона, то ограничение на величину θ_{col} будет менее строгим и ее значение равно 0.02 рад.

Для восстановления Σ^* гиперонов были использованы $\Lambda(\bar{\Lambda})$ гипероны (рис. 2) в интервале $\pm 2\sigma$ от измеренных значений масс $\Lambda(\bar{\Lambda})$ и удовлетворяющие условию коллинеарности. Для каждого из треков, исходящих из первичной вершины, вычислялось значение инвариантной массы с отобранными $\Lambda(\bar{\Lambda})$ гиперонами, в предположении, что трек принадлежит пиону. На рис. 3 показаны распределения инвариантных масс для а) $\Sigma^{*+} \rightarrow \Lambda\pi^+$, б) $\bar{\Sigma}^{*-} \rightarrow \bar{\Lambda}\pi^-$, в) $\Sigma^{*-} \rightarrow \Lambda\pi^-$ и $\Xi^- \rightarrow \Lambda\pi^-$, д) $\bar{\Sigma}^{*+} \rightarrow \bar{\Lambda}\pi^+$ и $\Xi^+ \rightarrow \bar{\Lambda}\pi^+$.

Для Σ^{*+} и Σ^{*-} гиперонов (рис. 3 а, б) распределения инвариантных масс были отфитированы функцией $S(x)$ для сигнала, которая представляет собой свертку функций Брейт-Вигнера и Гаусса, и функцией $B(x)$ для комбинаторного фона:

$$S(x) = \frac{\Gamma}{(2\pi)^{3/2}} \int \frac{N e^{-\frac{1}{2}(\frac{t-x}{\sigma})^2}}{(t-M)^2 + (\frac{\Gamma}{2})^2} dt \quad (1)$$

$$B(x) = a (x - M_{th})^b e^{-c (x - M_{th})^d}. \quad (2)$$

Два других инвариантных массовых распределения, $\Lambda\pi^-$ и $\bar{\Lambda}\pi^+$, включают пик от распада Ξ (Рис. 3 в, г). Эти пики были приняты во внимание, и при фитировании была добавлена вторая функция Гаусса к функции $S(x)$. Для каждого гиперона масса M и ширина Γ были зафиксированы и соответствовали мировым значениям [25]. Величина пороговой массы $M_{th} = 1254$ МэВ определялась как сумма масс Λ и π . Параметры a , b , c и d являлись свободными.

В результате фитирования общее количество восстановленных Σ^* гиперонов составило: $N(\Sigma^{*+}) = 3631 \pm 333$, $N(\Sigma^{*-}) = 2970 \pm 490$, $N(\bar{\Sigma}^{*-}) =$

2173 ± 222 и $N(\bar{\Sigma}^{*+}) = 1889 \pm 265$. Сигналы от Σ^{*+} , $\bar{\Sigma}^{*-}$, Σ^{*-} и $\bar{\Sigma}^{*+}$ хорошо различимы. Несмотря на то, что $\Lambda(\bar{\Lambda})$ гипероны от распадов Ξ^- ($\bar{\Xi}^+$) гиперонов происходят по “слабому взаимодействию”, на двух нижних распределениях наблюдается небольшой дополнительный пик от Ξ^- и $\bar{\Xi}^+$. Ширины массовых пиков для Σ^* и $\bar{\Sigma}^*$ совпадают в пределах статистической неопределенности: (9.3 ± 3.6) МэВ/ c^2 для Σ^{*+} , (6.1 ± 2.7) МэВ/ c^2 для $\bar{\Sigma}^{*-}$, (8.7 ± 3.5) МэВ/ c^2 для Σ^{*-} и (7.1 ± 2.1) МэВ/ c^2 для $\bar{\Sigma}^{*+}$.

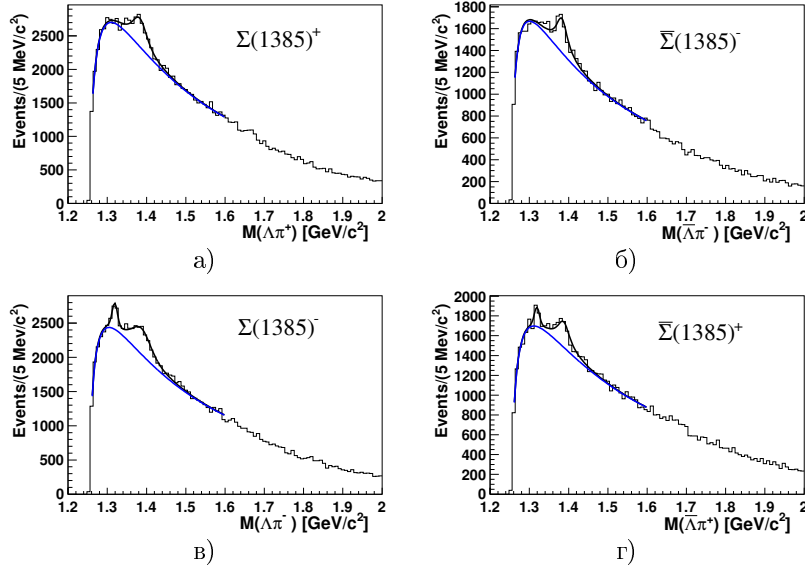


Рисунок 3: Распределения инвариантных масс $\Lambda(\bar{\Lambda})\pi$: а) $\Sigma^{*+} \rightarrow \Lambda\pi^+$; б) $\bar{\Sigma}^{*-} \rightarrow \bar{\Lambda}\pi^-$; в) $\Sigma^{*-} \rightarrow \Lambda\pi^-$ и $\Xi^- \rightarrow \Lambda\pi^-$; г) $\bar{\Sigma}^{*+} \rightarrow \bar{\Lambda}\pi^+$ и $\bar{\Xi}^+ \rightarrow \bar{\Lambda}\pi^+$. Сплошными линиями показаны результаты фитирования сигнала от Σ^{*+} , $\bar{\Sigma}^{*-}$, Σ^{*-} и $\bar{\Sigma}^{*+}$ гиперонов и фона. Общее количество восстановленных Σ^* гиперонов составило: $N(\Sigma^{*+}) = 3631 \pm 333$, $N(\Sigma^{*-}) = 2970 \pm 490$, $N(\bar{\Sigma}^{*-}) = 2173 \pm 222$ и $N(\bar{\Sigma}^{*+}) = 1889 \pm 265$.

Восстановление Ξ гиперонов, распадающихся за счет слабого взаимодействия, для которых первичная вершина и вершина распада четко отделены, осуществлялась в два этапа. На первом этапе были взяты $\Lambda(\bar{\Lambda})$ гипероны в интервале $\pm 2\sigma$ от измеренных значений масс $\Lambda(\bar{\Lambda})$ (рис. 2). Затем, для каждого из треков, не ассоциированных с первичной вершиной, вычислялось значение инвариантной массы с отобранными $\Lambda(\bar{\Lambda})$ гиперонами, в предпо-

ложении, что трек принадлежит пиону. На следующем этапе использовалась процедура двухмерного CDA (Closest Distance of Approach) в плоскости xy . Двухмерное значение величины CDA вычислялась как расстояние между направлением импульса Λ ($\bar{\Lambda}$) и треком не ассоциированным с первичной вершиной, с которым на первом этапе вычислялась инвариантная масса. Дополнительно для подавления фона на Ξ гипероны накладывалось условие коллинеарности.

Распределения инвариантных масс для а) $\Xi^- \rightarrow \Lambda\pi^-$ и б) $\bar{\Xi}^+ \rightarrow \bar{\Lambda}\pi^+$ показаны на рис. 4. Эти распределения были отфитированы функцией Гаусса для сигнала, и функцией $B(x)$ - для фона (см. формулу 2).

В результате фитирования общее количество восстановленных Ξ гиперонов составило: $N(\Xi^-) = 2320 \pm 68$ и $N(\bar{\Xi}^+) = 1147 \pm 49$. Полученные значения ширин массовых пиков для Ξ и $\bar{\Xi}$ одинаковы и равны (2.8 ± 0.1) МэВ/ c^2 .

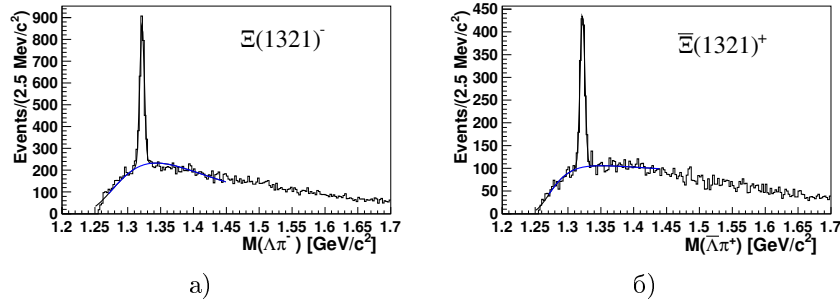


Рисунок 4: Распределения инвариантных масс для $\Lambda\pi^-$ и $\bar{\Lambda}\pi^+$: а) $\Xi^- \rightarrow \Lambda\pi^-$ и б) $\bar{\Xi}^+ \rightarrow \bar{\Lambda}\pi^+$. Сплошными линиями показаны результаты фитирования сигнала от Ξ^- и $\bar{\Xi}^+$ гиперонов и фона. Общее количество восстановленных Ξ гиперонов составило: $N(\Xi^-) = 2320 \pm 68$ и $N(\bar{\Xi}^+) = 1147 \pm 49$.

Для извлечения относительных выходов тяжелых гиперонов и антигиперонов необходимо принять во внимание аксептанс установки. Для этого проводилось моделирование событий ГНР с использованием генератора LERGO 6.5.1 [12], с включенными по умолчанию параметрами, характеризующими распределения странных кварков в нуклоне и их фрагментацию, а также полного описания спектрометра, основанного на программе COMGEANT [27] и GEANT 3.21 [28]. Реконструкция событий и процедура их отбора были идентичны процедуре, применяемой к экспериментальным данным. Вычисление аксептанса проводилось следующим образом. На первом этапе вычислялись отношения: $R_{rec} = N_{rec}^{hyp} / N_{rec}^{\Lambda}$, где N_{rec}^{hyp} - чис-

ло реконструируемых тяжелых гиперонов, N_{rec}^{Λ} - число реконструируемых Λ барионов и $R_{gen} = N_{gen}^{hyp}/N_{gen}^{\Lambda}$, где N_{gen}^{hyp} - число сгенерированных тяжелых гиперонов, N_{gen}^{Λ} - число сгенерированных Λ барионов. На втором этапе находился акцептанс (A), как отношение R_{rec} к R_{gen} :

$$A = \frac{R_{rec}}{R_{gen}}.$$

Величина акцептанса также включает поправки на $\text{Br}(\Sigma^* \rightarrow \Lambda\pi) = 0.87 \pm 0.02$ и $\text{Br}(\Xi \rightarrow \Lambda\pi) = 1.00 \pm 0.04$ [25]. Относительные выходы Σ^* и Ξ к Λ гиперонам, поправленные на акцептанс, со статистическими и систематическими неопределенностями приведены в таблице 3. Эти выходы находятся в пределах от 3.8 % до 5.6 % с относительной статистической ошибкой $\sim 10\%$. Процент Λ и $\bar{\Lambda}$ гиперонов из распадов более тяжелых гиперонов и антигиперонов одинаковый в пределах статистических ошибок. Вклад в систематическую ошибку рассматривался от трех источников. 1) Числа восстановленных Λ и $\bar{\Lambda}$ событий, то есть систематическая неопределенность оценивалась путем изменения массового интервала восстановленных Λ и $\bar{\Lambda}$ событий, вместо стандартного интервала $\pm 2\sigma$ брались $\pm 2.5\sigma$ и $\pm 1.5\sigma$. 2) Числа фоновых событий, то есть вклада фона оцениваемого с помощью смешивания Λ и π из различных событий. 3) Принималась во внимание неопределенность, связанная с вычислением акцептанса.

Таблица 3: Относительные выходы тяжелых гиперонов к Λ и антигиперонов к $\bar{\Lambda}$ со статистическими и систематическими неопределенностями в ГНР заряженных лептонов.

Относительный выход	COMPASS
Σ^{*+}/Λ	$0.055 \pm 0.005(\text{стат}) \pm 0.005(\text{сист})$
$\bar{\Sigma}^{*-}/\bar{\Lambda}$	$0.047 \pm 0.006(\text{стат}) \pm 0.006(\text{сист})$
Σ^{*-}/Λ	$0.056 \pm 0.009(\text{стат}) \pm 0.007(\text{сист})$
$\bar{\Sigma}^{*+}/\bar{\Lambda}$	$0.039 \pm 0.006(\text{стат}) \pm 0.006(\text{сист})$
Ξ^-/Λ	$0.038 \pm 0.003(\text{стат}) \pm 0.002(\text{сист})$
$\bar{\Xi}^+/\bar{\Lambda}$	$0.043 \pm 0.004(\text{стат}) \pm 0.002(\text{сист})$

В диссертации представлены впервые измеренные относительные выходы тяжелых гиперонов и антигиперонов к Λ и $\bar{\Lambda}$ в реакции глубоко-неупругого рассеяния заряженных лептонов. Ранее, были измерены только выходы тяжелых гиперонов к Λ в ГНР нейтрино коллаборацией NOMAD

[29], при этом средняя энергия нейтрино в канале заряженного тока составляла 45.3 ГэВ. Полученные в данной работе и в эксперименте NOMAD [10] значения относительных выходов представлены в таблице 4. Отметим, что статистика восстановленных тяжелых гиперонов в COMPASS в области фрагментации пучка больше (от 30 до 130 раз), чем в эксперименте NOMAD. Интересно сравнить выходы тяжелых гиперонов в COMPASS и NOMAD несмотря на разницу типа взаимодействия и энергию. Полученные, в данной работе, отношения для Σ^{*+}/Λ и Σ^{*-}/Λ в пределах экспериментальных ошибок совпадают. С одной стороны, то же самое заключение справедливо и для отношений полученных в эксперименте NOMAD. С другой стороны, значения, полученные в NOMAD, в два раза меньше, чем в COMPASS. В пределах неопределенности, отношение Ξ^-/Λ измеренные в NOMAD сравнимы с нулем, в то время как в COMPASS получены ненулевые значения для отношений Ξ^-/Λ и Ξ^+/Λ .

Таблица 4: Относительные выходы тяжелых гиперонов к Λ и тяжелых антигиперонов к $\bar{\Lambda}$ в экспериментах COMPASS и NOMAD в области фрагментации пучка [10].

Относительный выход	COMPASS	NOMAD
Σ^{*+}/Λ	0.055 ± 0.005	0.025 ± 0.019
$\bar{\Sigma}^{*-}/\bar{\Lambda}$	0.047 ± 0.006	-
Σ^{*-}/Λ	0.056 ± 0.009	0.037 ± 0.015
$\bar{\Sigma}^{*+}/\bar{\Lambda}$	0.039 ± 0.006	-
Ξ^-/Λ	0.038 ± 0.003	0.007 ± 0.007
$\bar{\Xi}^+/\bar{\Lambda}$	0.043 ± 0.004	-

Относительные выходы тяжелых гиперонов и антигиперонов во всей кинематической области Q^2 и y также представляют большой интерес. При этом условия отбора ГНР событий $Q^2 > 1$ (ГэВ/с)² и $0.2 < y < 0.9$ не использовались. В остальном процедура реконструкции гиперонов и антигиперонов во всей кинематической области Q^2 и y , была аналогична процедуре использованной в области ГНР. В результате общее количество восстановленных Λ и $\bar{\Lambda}$ барионов, тяжелых гиперонов Σ^* и Ξ во всей кинематической области Q^2 и y на порядок больше, чем в ГНР.

В таблице 5 приведены отношения относительных выходов тяжелых гиперонов к Λ и антигиперонов к $\bar{\Lambda}$ во всей кинематической области Q^2 и y к соответствующим относительным выходам в ГНР. Относительные

выходы тяжелых гиперонов к Λ и антигиперонов к $\bar{\Lambda}$ во всей области Q^2 и y к ГНР различаются приблизительно на 6%, что значительно меньше экспериментальных ошибок. Среднее значение Q^2 во всей кинематической области равно $0.47 \text{ (ГэВ/}c)^2$ и $3.58 \text{ (ГэВ/}c)^2$ в ГНР. Равные отношения относительных выходов тяжелых гиперонов в двух кинематических областях при 8 кратном различии средних значений Q^2 указывает на независимость этих выходов от значения Q^2 .

Таблица 5: Отношения относительных выходов тяжелых гиперонов к Λ и антигиперонов к $\bar{\Lambda}$ во всей кинематической области Q^2 и y к соответствующим относительным выходам в ГНР.

Отношение	Величина
Σ^{*+}/Λ	1.03 ± 0.08 (стат)
$\bar{\Sigma}^{*-}/\bar{\Lambda}$	0.97 ± 0.11 (стат)
Σ^{*-}/Λ	1.03 ± 0.16 (стат)
$\bar{\Sigma}^{*+}/\bar{\Lambda}$	0.97 ± 0.13 (стат)
Ξ^-/Λ	1.06 ± 0.09 (стат)
$\bar{\Xi}^+/\bar{\Lambda}$	1.06 ± 0.09 (стат)

В четвертой главе представлено сравнение экспериментальных и моделированных данных. Описана настройка параметров функции фрагментации. Настройка выполнена минимизацией разности измеренных и предсказанных значений относительных выходов странных частиц. Также приведены распределения по кинематическим переменным Q^2 , W , z и p_T для всех изучаемых в данной работе гиперонов.

Для моделирования взаимодействий ГНР широко используется модель LUND [30, 31], на основе которой был создан генератор LEPTO [12] с программным пакетом JETSET [13] для описания процесса фрагментации.

Согласование экспериментальных и моделированных данных достигается с помощью настройки значений параметров фрагментации программного пакета JETSET генератора LEPTO. В процессе настройки программы использовались следующие параметры функции фрагментации: PARJ(1) – подавление рождения пары дикварк-антидикварк в цветовом поле по сравнению с рождением кварк-антикварковой пары; PARJ(2) – подавление рождения $s\bar{s}$ пары в поле по сравнению с рождением пар $u\bar{u}$ или $d\bar{d}$; PARJ(3) – подавление рождения странных дикварков, дополнительно к нормальному подавлению странных кварков; PARJ(4) – подавление дикварков со спином 1 по сравнению с дикварком со спином 0; PARJ(5) – относительный выход барионов (антибарионов); PARJ(7) – дополнитель-

ное подавление странного мезона. В качестве настраиваемых величин использовались предсказываемые относительные выходы странных частиц к Λ в сравнении со значениями полученными в эксперименте COMPASS (см. таблицу 3). Минимизация функционала F была выполнена следующим образом

$$F^2 = \sum_i \frac{(R_{i(Exp)} - R_{i(Lepto)})^2}{\sigma_{R_{i(Exp)}}^2}, \quad (3)$$

где $R_{i(Exp)}$ - поправленные на акцептанс экспериментальные относительные выходы, $R_{i(Lepto)}$ - относительные выходы, предсказываемые для кинематических условий эксперимента COMPASS, генератором LEPTO/JETSET и $\sigma_{R_{i(Exp)}}^2$ - статистическая ошибка величины $R_{i(Exp)}$. В процессе минимизации использовались несколько итераций перебора параметров с разным шагом - большой шаг для первой итерации и меньший для последующих. Далее генерировался набор моделированных событий с новыми параметрами, трассировкой треков частиц через установку и полной реконструкцией.

В таблице 6 представлены значения параметров до и после настройки программного пакета JETSET.

Таблица 6: Параметры JETSET до и после настройки.

Параметры	Default	Настроенные (COMPASS)
PARJ(1)	0.1	0.03
PARJ(2)	0.3	0.45
PARJ(3)	0.4	0.175
PARJ(4)	0.05	0.078
PARJ(5)	0.5	3.0
PARJ(7)	0.5	0.13

Было проверено, что процедура настройки параметров не приводит к искажению распределений кинематических переменных Q^2 и W , характеризующих полуинклюзивное ГНР, а также z и p_T распределений самих гиперонов. На рисунках 5 - 8 приведены распределения кинематических переменных Q^2 , W , z и p_T для экспериментальных данных, моделированных событий с параметрами по умолчанию и настроенными параметрами JETSET для Σ^{*+} (а) и Ξ^- (в) гиперонов, а также отношении Монте-Карло распределений до и после настройки параметров JETSET (б) и (г) соответственно.

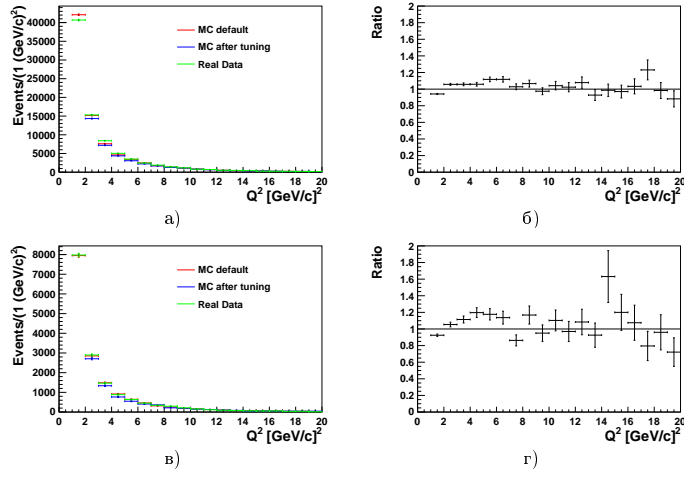


Рисунок 5: Распределение кинематической переменной Q^2 для Σ^{*+} (а) и Ξ^- (в), отношение распределений Q^2 полученных в Монте-Карло до и после настройки параметров JETSET (б) и (г) соответственно.

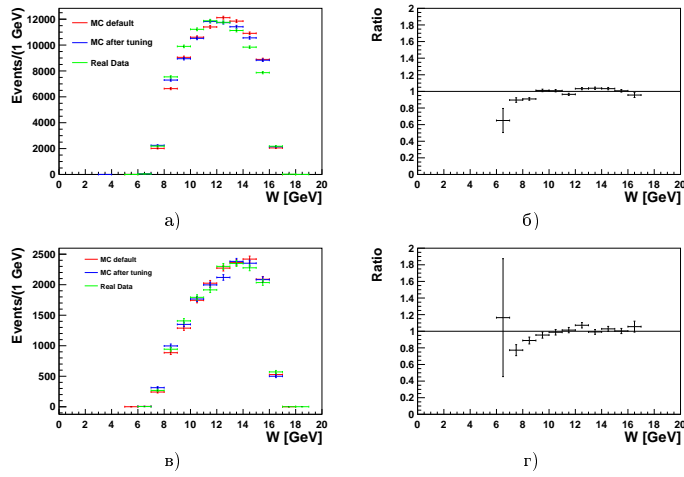


Рисунок 6: Распределение кинематической переменной W для Σ^{*+} (а) и Ξ^- (в), отношение распределений W полученных в Монте-Карло до и после настройки параметров JETSET (б) и (г) соответственно.

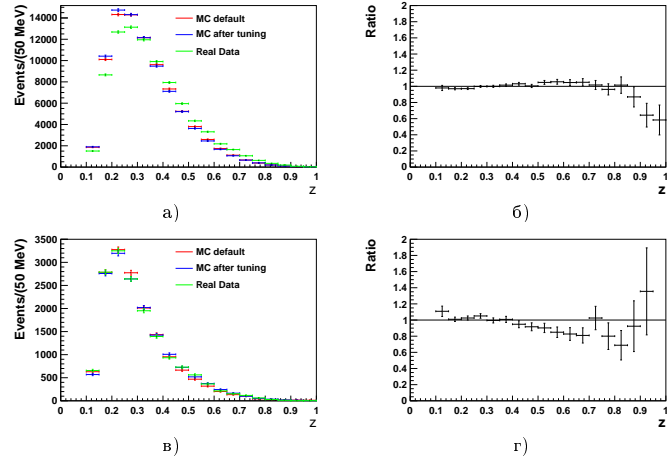


Рисунок 7: Распределение кинематической переменной z для Σ^{*+} (а) и Ξ^- (в), отношение распределений z полученных в Монте-Карло до и после настройки параметров JETSET (б) и (г) соответственно.

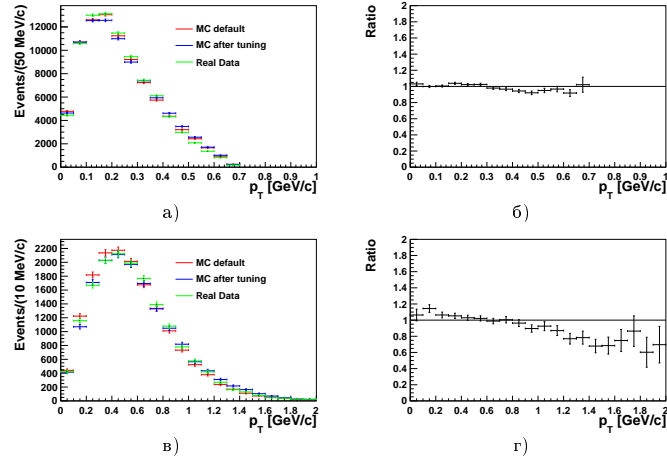


Рисунок 8: Распределение кинематической переменной p_T для Σ^{*+} (а) и Ξ^- (в), отношение распределений p_T полученных в Монте-Карло до и после настройки параметров JETSET (б) и (г) соответственно.

В таблице 7 приведены относительные выходы тяжелых гиперонов и антигиперонов к Λ и $\bar{\Lambda}$ барионам для экспериментальных данных, со значениями параметров программного пакета JETSET по умолчанию и с настроенными значениями в ГНР. Важно отметить, что полученные новые относительные выходы тяжелых гиперонов и антигиперонов, а также отношения $\Lambda/\bar{\Lambda}$ и K^0/Λ , хорошо согласуются с экспериментальными данными полученными на установке COMPASS. Отметим, что новые значения параметров также изменяют неисследованные в данной работе отношения Σ^0/Λ и $\bar{\Sigma}^0/\bar{\Lambda}$.

Акцептансы, рассчитанные с параметрами JETSET по умолчанию и с настроенными, согласуются в пределах одного стандартного отклонения. Разница абсолютных значений была включена в систематическую неопределенность. В эксперименте COMPASS программа моделирования с параметрами по умолчанию предсказывала выходы для непрямого рождения Λ и $\bar{\Lambda}$ составили 58% и 54% соответственно. С новыми значениями параметров эти величины составили 37% и 32% ².

Таблица 7: Относительные выходы тяжелых гиперонов и антигиперонов к Λ и $\bar{\Lambda}$ барионам для экспериментальных данных, для смоделированных событий с параметрами по умолчанию и с настроенными параметрами JETSET в ГНР.

Относительный выход	С "default" параметрами JETSET	Данные COMPASS	С настроенными параметрами JETSET
$\Lambda/\bar{\Lambda}$	1.22 ± 0.01	1.71 ± 0.02	1.72 ± 0.01
K^0/Λ	6.06 ± 0.01	6.21 ± 0.05	6.22 ± 0.01
Σ^{*+}/Λ	0.082 ± 0.001	0.055 ± 0.005	0.052 ± 0.001
$\bar{\Sigma}^{*-}/\bar{\Lambda}$	0.074 ± 0.001	0.047 ± 0.006	0.038 ± 0.001
Σ^{*-}/Λ	0.084 ± 0.001	0.056 ± 0.009	0.067 ± 0.001
$\bar{\Sigma}^{*+}/\bar{\Lambda}$	0.060 ± 0.001	0.039 ± 0.006	0.037 ± 0.001
Ξ^-/Λ	0.051 ± 0.001	0.038 ± 0.003	0.029 ± 0.001
$\bar{\Xi}^+/\bar{\Lambda}$	0.056 ± 0.001	0.043 ± 0.004	0.040 ± 0.001
Σ^0/Λ	0.200 ± 0.003	–	0.130 ± 0.002
$\bar{\Sigma}^0/\bar{\Lambda}$	0.200 ± 0.003	–	0.120 ± 0.002

²Эти величины также включают вклад непрямого рождения Λ ($\bar{\Lambda}$) от распадов Ξ^0 ($\bar{\Xi}^0$) и Ω^- ($\bar{\Omega}^+$) гиперонов.

Заклучение

В эксперименте COMPASS набрана уникальная статистика Λ и $\bar{\Lambda}$ гиперонов в ГНР заряженных лептонов. Число восстановленных Λ и $\bar{\Lambda}$ гиперонов составило 112000 и 67000 соответственно.

Впервые:

а) измерены выходы тяжелых гиперонов Σ^{*+} , Σ^{*-} , $\bar{\Sigma}^{*-}$, $\bar{\Sigma}^{*+}$, Ξ^- и $\bar{\Xi}^+$ в ГНР с относительной неопределенностью порядка 10%;

б) точность выполненных измерений позволила провести настройку параметров программы моделирования LEPТО/JETSET в ГНР. С новыми значениями параметров оценены не прямые выходы Λ и $\bar{\Lambda}$ гиперонов.

Следует отметить, что ранее были измерены только выходы тяжелых гиперонов Σ^{*+} , Σ^{*-} , Ξ^- , но не антигиперонов $\bar{\Sigma}^{*-}$, $\bar{\Sigma}^{*+}$, $\bar{\Xi}^+$, в ГНР нейтрино коллаборацией NOMAD [10]. Из за больших экспериментальных ошибок измерений в эксперименте NOMAD, мы не можем сделать определенных сравнительных выводов о выходах тяжелых гиперонов в ГНР заряженных лептонов и в ГНР нейтрино.

Основные результаты можно сформулировать следующим образом:

1. Впервые измерены относительные выходы тяжелых гиперонов $\Sigma(1385)^+$, $\Sigma(1385)^-$, $\Xi(1321)^-$ и антигиперонов $\bar{\Sigma}(1385)^-$, $\bar{\Sigma}(1385)^+$, $\bar{\Xi}(1321)^+$ по отношению к Λ и $\bar{\Lambda}$ барионам в ГНР заряженных лептонов:

$$\Sigma(1385)^+/\Lambda = 0.055 \pm 0.005(\text{стат}) \pm 0.005(\text{сист})$$

$$\bar{\Sigma}(1385)^-/\bar{\Lambda} = 0.047 \pm 0.006(\text{стат}) \pm 0.006(\text{сист})$$

$$\Sigma(1385)^-/\Lambda = 0.056 \pm 0.009(\text{стат}) \pm 0.007(\text{сист})$$

$$\bar{\Sigma}(1385)^+/\bar{\Lambda} = 0.039 \pm 0.006(\text{стат}) \pm 0.006(\text{сист})$$

$$\Xi(1321)^-/\Lambda = 0.038 \pm 0.003(\text{стат}) \pm 0.002(\text{сист})$$

$$\bar{\Xi}(1321)^+/\bar{\Lambda} = 0.043 \pm 0.004(\text{стат}) \pm 0.002(\text{сист})$$

2. Измерены относительные выходы тяжелых гиперонов и антигиперонов как в ГНР, так и во всей кинематической области Q^2 и y . Показана в пределах статистических ошибок независимость этих выходов от значения Q^2 . Показано, что относительные выходы тяжелых гиперонов во всей кинематической области и ГНР различаются приблизительно на 6%, что значительно меньше экспериментальных ошибок.

3. Уникальные измерения относительных выходов позволили провести оптимизацию значений параметров LEPTO/JETSET PARJ(1) – PARJ(5), PARJ(7), связанных с рождением странных кварков и процессами их фрагментации в ГНР заряженных лептонов. Новые значения этих параметров существенно отличаются от параметров, включенных в стандартную версию LEPTO/JETSET.
4. Оценен вклад непрямого выхода Λ и $\bar{\Lambda}$ барионов в ГНР, который составляет порядка $(37\pm 3)\%$ и $(32\pm 3)\%$ соответственно от полного числа рожденных гиперонов.

Список литературы

- [1] HERMES Collaboration, A. Airapetian et al., *Phys. Rev.* **D74** (2006) 072004.
- [2] WA21 Collaboration, G.T.Jones et al., *Z. Phys.* **C28** (1985) 23.
- [3] WA59 Collaboration, S.Willocq et al., *Z. Phys.* **C53** (1992) 207.
- [4] E632 Collaboration, D.De Prosopo et al., *Phys.Rev.* D50 (1994) 6691.
- [5] NOMAD Collaboration, P.Astier et al., *Nucl. Phys.* **B588** (2000) 3.
- [6] NOMAD Collaboration, P.Astier et al., *Nucl. Phys.* **B605** (2001) 3.
- [7] E665 Collaboration, M.R.Adams et al., *Eur. Phys. J.* **C17** (2000) 263.
- [8] STAR Collaboration, B.I.Abelev et al., *Phys. Rev. Lett.* **97** (2006) 252001.
- [9] COMPASS Collaboration, M.Alekseev et al., *Eur. Phys. J.* **64** (2009) 171.
- [10] NOMAD Collaboration, P.Astier et al., *Nucl. Phys.* **B621** (2002) 3.
- [11] COMPASS Collaboration, C.Adolph et al., *Eur. Phys. J.* **C73** (2013) 2581.
- [12] A.E.G.Ingelman, A.Edin, J.Rathsman, *Comp. Phys. Commun.* **101** (1997) 108.
- [13] T.Sjöstrand, *Comp. Phys. Commun.* **82** (1994) 74.
- [14] COMPASS Collaboration, P.Abbon et al., The COMPASS Experiment at CERN, *Nucl. Instrum. Meth.* **A577** 455 (2007).
- [15] O.A.Rondon, *Phys. Rev.* **C60** (1999) 035201 and references therein.

- [16] J. Bisplinghoff et al., A scintillating fibre hodoscope for high rate applications, *Nucl. Instrum. Meth.* **A490** (2002) 101-111.
- [17] H. Angerer et al., Present status of silicon detectors in COMPASS, *Nucl. Instrum. Meth.* **A512** (2003) 229-238.
- [18] М.Д. Шафранов, Микроструктурные газовые детекторы, ФЭЧАЯ, Т33 вып.5 (2002).
- [19] Micromegas as a large microstrip detector for the COMPASS experiment. D. Thers et al., *Nucl. Instrum. Meth.* **A469** (2001) 133-146.
- [20] M.C. Altunbas et al., Construction, test and commissioning of the triple-GEM tracking detector for COMPASS, *Nucl. Instrum. Meth.* **A490** (2002) 177-203.
- [21] E. Iarocci, *Nucl. Instrum. Meth.* **A217** (1983) 30.
- [22] V.N. Bychkov et al., Construction and Manufacture of Large Size Straw-Chambers of the COMPASS Spectrometer Tracking System, *Part. Nucl. Lett.* **2** (2002) 111.
- [23] E. Albrecht et al., The mirror system of COMPASS RICH-1, *Nucl. Instrum. Meth.* **A502** (2003) 112.
- [24] C. Bernet et al., The COMPASS trigger system for muon scattering, *Nucl. Instrum. Meth.* **A550** (2005) 217.
- [25] Review of Particle Properties, *J. Phys.* **G 37, 7A** (2010) 075021.
- [26] STAR Collaboration, Quinhua Xu, Proc. 17th International Spin Physics Symposium (SPIN06), Kyoto, AIP conference Proceedings, 915 (2006) 428; hep-ex/0612035.
- [27] *COMGEANT* webpage, <http://valexakh.web.cern.ch/valexakh/wwwcomg/index.html>
- [28] GEANT, CERN Program Library Long Writeup W5013.
- [29] NOMAD Collaboration, J. Altegoer et al., *Nucl. Instrum. Meth.* **A404** (1998) 96.
- [30] П.Э. Волковицкий, Модель фрагментации струн Лундского университета, в сб.: Элементарные частицы, 12 школа физики ИТЭФ, М. в. 4 (1986) 68.
- [31] B. Andersson et al., Parton-fragmentation and string dynamics, *Phys. Rep.* **97** (1983) 31.