



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»

Препринт 2020–2

А.П. Воробьёв, А.А. Киряков, В.М. Роньжин, В.Н. Рядови́ков
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, Протвино

Ю.П. Петухов
Объединённый институт ядерных исследований, Дубна

**Измерение отношения выходов Σ^0/Λ^0
в рА-взаимодействиях при 70 ГэВ**

Направлено в ЯФ

Протвино 2020

Аннотация

Воробьёв А.П. и др. Измерение отношения выходов Σ^0/Λ^0 в pA-взаимодействиях при 70 ГэВ: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2020–2. – Протвино, 2020. – 10 с., 5 рис., 2 табл., библиогр.: 11.

Активная мишень из пластинок углерода, кремния и свинца облучалась протонами с энергией 70 ГэВ от ускорителя У-70. На статистике 10695 событий с одновременным рождением Λ^0 -гиперона и γ -кванта выделен сигнал (270 соб.) от распада $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$ с использованием данных детектора γ -квантов установки СВД-2. Измерено отношение выходов Σ^0/Λ^0 , величина которого составила 0.34 ± 0.08 (C), 0.32 ± 0.06 (Si) и 0.10 ± 0.09 (Pb). Результаты сравниваются с данными других экспериментов.

Abstract

Vorobiev A.P. et al. Measurement of the Σ^0/Λ^0 ratio in pA-interactions at 70 GeV/c: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2020–2. – Protvino, 2020. – p. 10, figs. 5, tables 2, refs.: 11.

The active target with C-, Si- and Pb-plates was irradiated in 70 GeV proton beam at U-70 accelerator. The signal (270 соб.) from $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$ decays was selected in 10695 events with Λ^0 and γ using gamma-detector data. Measured values of the Σ^0/Λ^0 ratio were obtained: 0.34 ± 0.08 (C), 0.32 ± 0.06 (Si) and 0.10 ± 0.09 (Pb). The comparison of the results with another experiments are presented.

Введение

К настоящему времени экспериментальной информации об образовании Σ^0 -гиперонов в протон-ядерных столкновениях существует немного. В тоже время, имея одинаковый кварковый состав с Λ^0 -гиперонами (uds), но разный изотопический спин, исследования реакций их рождения могут дать информацию о влиянии спина на протекание ядерных реакций. Такая информация необходима не только для разработки теоретических моделей сильных взаимодействий [1-3] и генераторов событий [4]. При экспериментальных исследованиях поляризации Λ^0 -гиперонов, как правило, не учитывается факт образования части Λ^0 от распада Σ^0 , других частиц и резонансов, что размывает картину поляризационных явлений, наблюдаемую при сильных взаимодействиях. Рождение странных адронов в нуклон-нуклонных взаимодействиях изучались во многих экспериментах для разных энергий. Накоплено много данных по рождению Λ^0 -гиперона, в сечении которого имеется существенный вклад от распада Σ^0 -гиперона. С выделением распада Σ^0 ситуация хуже, данных значительно меньше. Реконструкция распадов Σ^0 -гиперонов выполняется по каналу $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$, с γ -квантом, имеющим в экспериментах низкую эффективность регистрации. Предполагается, что отношение выходов Σ^0/Λ^0 , согласно числу проекций их изоспинов, должно быть близко к 1/3. Но экспериментальные измерения отношения Σ^0/Λ^0 в реакциях на ядрах показывают, что эта величина может отличаться от значения 0.3. Измеренное значение $\Sigma^0/\Lambda^0 = 0.16$ в d+Au-столкновениях при 200 ГэВ [5], а в pNe-взаимодействиях при 300 ГэВ [6] оно равно 0.75. Предполагается, что это может быть связано с разным влиянием

на процессы образования странных гиперонов составляющих ядра нуклонов, рождающихся резонансов и обменных взаимодействий между частицами.

Предсказания моделей для отношения Σ^0/Λ^0 также различаются. Например, генератор HIJING/BBbar [4] дает $\Sigma^0/\Lambda^0 = 0.37$ для d+Au столкновений при $\sqrt{s_{NN}}=200$ ГэВ; статистическая термальная модель THERMUS [1] – $\Sigma^0/\Lambda^0 = 0.36$ при $T=160$ МэВ и $\gamma_S=1.0$; модель слипания кварков ALCOR [3] – $\Sigma^0/\Lambda^0 = 0.20$. Моделирование C+C столкновений в программе UrQMD показывает, что Σ^0/Λ^0 может быть от 0.3 до 0.6 [7].

Цель данной работы – выделить события с распадом $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$, используя выборку событий в эксперименте на установке СВД-2 [8] с зарегистрированными распадами Λ^0 -гиперонов в рА-взаимодействиях на ядрах углерода (C), кремния (Si) и свинца (Pb) при импульсе протона 70 ГэВ/с, и данные с Детектора γ -квантов (ДЕГА) [9]. Оценить отношение выходов Σ^0/Λ^0 гиперонов.

Регистрация распадов $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$

Для выделения распадов Σ^0 использовалась часть статистики эксперимента с рождением Λ^0 -гиперона (24717 событий) в интервале масс $1.1 < M(p\pi^-) < 1.13$ ГэВ (рис. 1а), в которых было найдено 10695 событий с одновременно зарегистрированным рождением Λ^0 и γ , что составляет 50% от первоначальной выборки (см. рис. 1б).

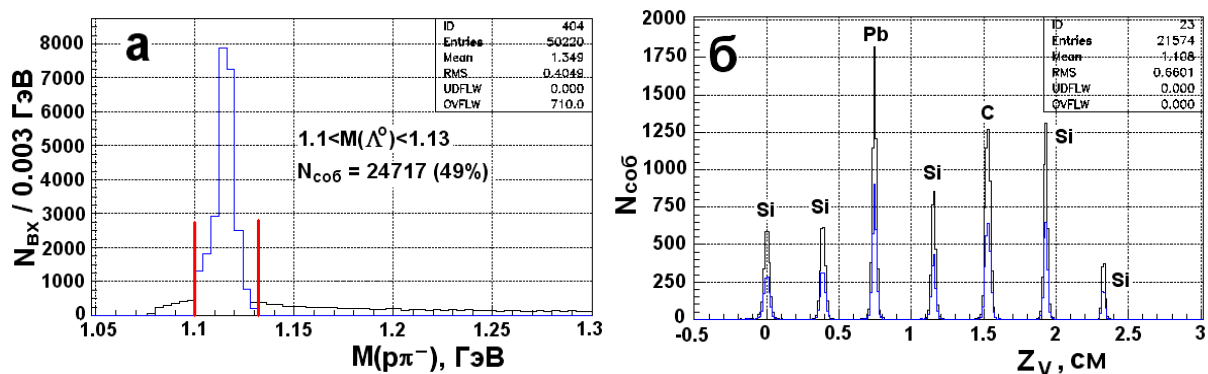


Рис. 1. а) Эффективная масса системы ($p\pi^-$), красные линии – область выделения распадов Λ^0 . б) Распределение событий с $\Lambda^0 + \gamma$ по пластинам мишени (Z – координата первичной вершины). Синие гистограммы для выделенных распадов Λ^0 -гиперонов.

Гамма-детектор установки СВД-2 подробно описан в работах [9, 10]. Детектирующий элемент ДЕГА состоит из блока свинцового стекла ($38 \times 38 \times 505$ мм³) и фотоумножителя (ФЭУ-84). Почти вся (> 90 %) энергия электромагнитного ливня от γ -кванта выделяется в ячейке из (3x3) блоков свинцового стекла. При этом энергия, выделяемая в центральном элементе ячейки, составляет в среднем 77% от энергии всего ливня. Количество элементов в ДЕГА равно 32 (вертикаль) x 42 (горизонталь) = 1344. Калибровка ДЕГА проводилась с помощью облучения центра каждого элемента узким ($\varnothing 3$ мм) пучком электронов с энергией 15 ГэВ. Обработка данных с ДЕГА заключается в поиске кластеров сигналов в (3x3) ячейке и применения к ним критериев отбора ливней от γ -квантов. Основные критерии следующие:

- Кластер (3x3) должен содержать не менее 2 каналов с сигналом выше порога равного 10 отсчета АЦП. При отсутствии сигналов в соседних от центрального канала из-за наличия «нерабочих» каналов или сигнала ниже порога, суммарная энергия ливня корректируется. Используется экспериментальный факт, что в среднем сигнал в центральном элементе ячейки кластера составляет $\sim 80\%$ от общего, поэтому энергия в каждом соседнем элементе должна быть $\sim 2.5\%$ от полной [11].
- Значение параметра a_5 , которое равно отношению энергии электромагнитного ливня в центральном канале к суммарной энергии всех 9 каналов, для γ -кванта должно быть больше 0.6. Оно тем больше, чем ближе к центру стекла попадает γ -квант. Для адронного ливня от заряженных частиц эта величина меньше 0.5 [11].

Для используемой в работе выборки событий среднее число восстановленных в ДЕГА γ -квантов равно 2.2, средняя энергия $E_\gamma = 3.5$ ГэВ, минимальная энергия регистрации равна 100 МэВ.

Анализ массовых спектров системы ($\Lambda^0 \gamma$) для событий в каждой мишени показал, что сигнал от распада Σ^0 виден, но на очень большой фоновой подложке. Для уменьшения фона использовались результаты моделирования методом Монте-Карло (МК) событий с распадом $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$ (100000 шт. для каждой мишени), полученные с помощью программы FRTIOF7.02 для рА-взаимодействий при импульсе пучка 70 ГэВ/с.

Кинематика распада такова, что распределение по поперечным импульсам Λ^0 и γ -кванта от распада Σ^0 в акцептансе СВД-2 имеет характерную форму (рис. 2) и может быть использовано для выделения нужных событий.

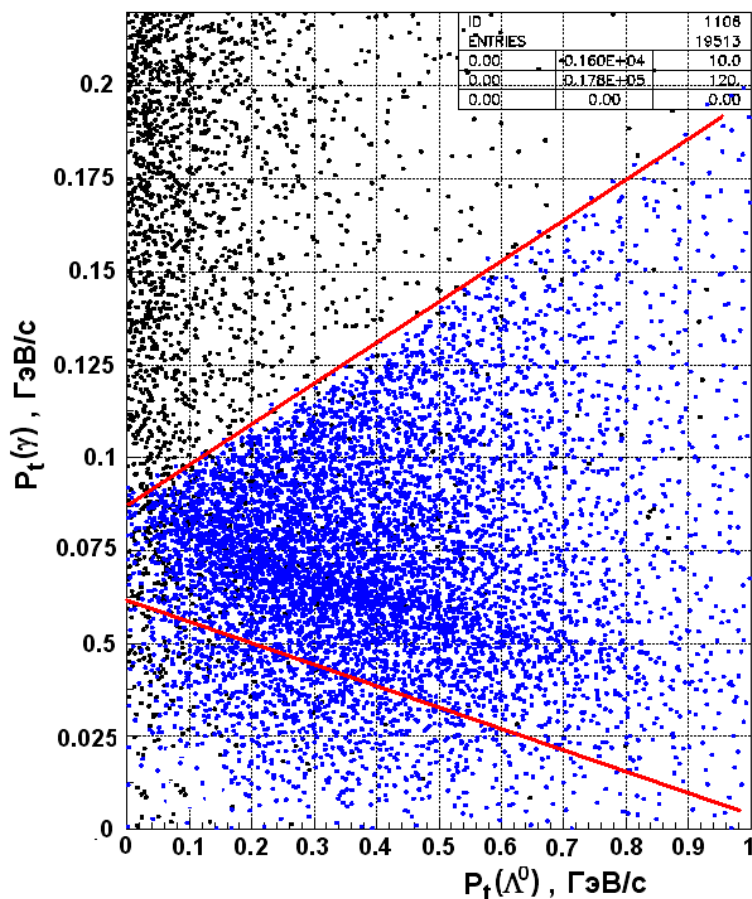


Рис. 2. Плот МК-событий для определения критериев отбора – зависимость поперечных импульсов Λ^0 и γ . Черные точки – эксперимент, синие точки – моделирование. Красные линии ограничивают используемые в эксперименте области для выделения распадов Σ^0 .

Из данных моделирования были оптимизированы критерии отбора Σ^0 в эксперименте по параметрам регистрируемых частиц Λ^0 и γ . Область поперечных импульсов $P_t(\gamma)$ и $P_t(\Lambda^0)$ задается двумя прямыми линиями $P_t(\gamma) = 0.08 + 0.1 * P_t(\Lambda^0)$ и $P_t(\gamma) = 0.06 - 0.05 * P_t(\Lambda^0)$ (рис. 2). Полученные после такого отбора события спектры эффективных масс системы $(\Lambda^0 \gamma)$ для мишеней C, Si и Pb приведены на рис. 3.

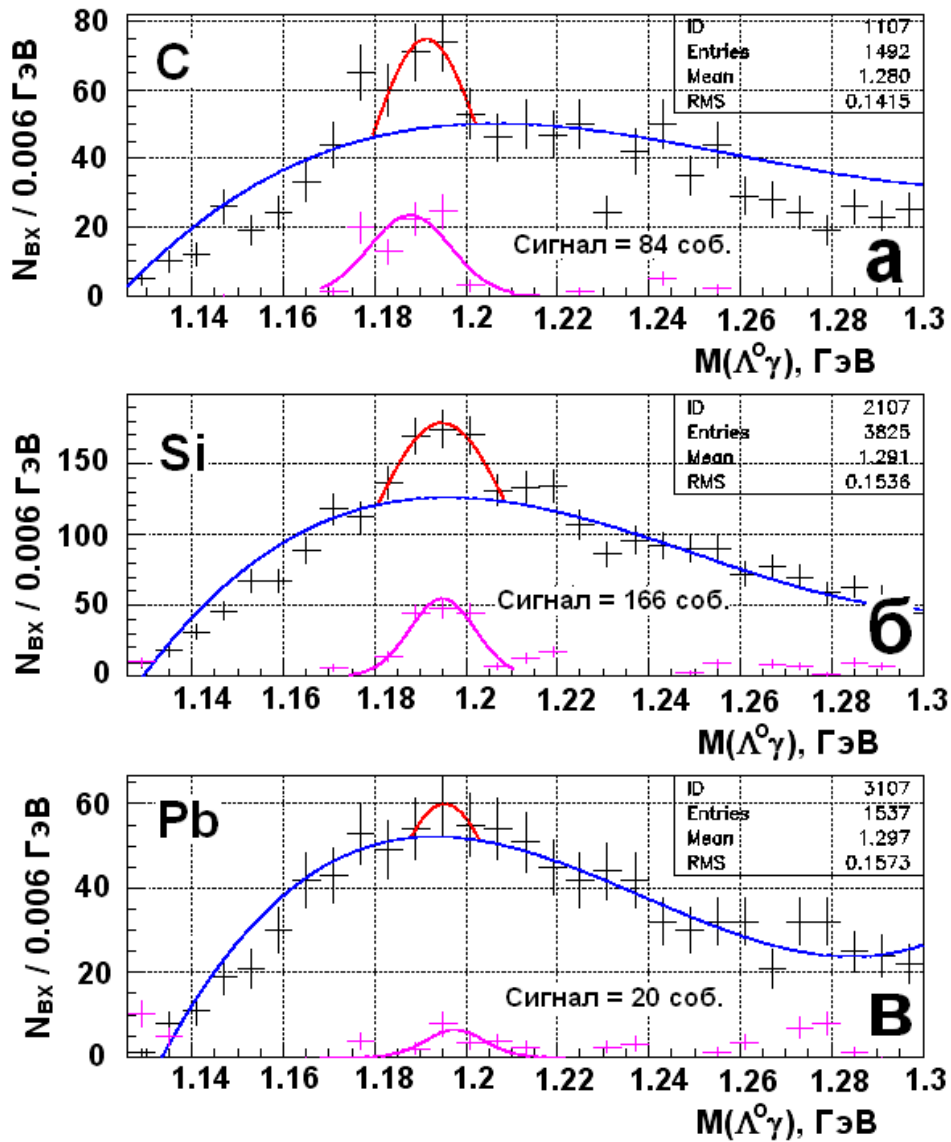


Рис. 3. Массовые спектры системы ($\Lambda^0\gamma$) для разных мишеней (а – С, б – Si, в – Pb) после применения критериев отбора (см. текст). Синими линиями обозначена аппроксимация фона полиномом 3-й степени. Розовые линии – разность двух гистограмм (сигнал – фон) и ее аппроксимация функцией Гаусса.

Видно, что сигнал от распада Σ^0 в интервале масс $1.17 < M(\Lambda^0\gamma) < 1.21$ ГэВ выделяется над фоном для мишеней из углерода и кремния. Для мишени из свинца сигнал от распада Σ^0 сравним с фоном. При этом количество отобранных событий, в которых число комбинаций ($\Lambda^0\gamma$) удовлетворяющих критериям отбора превышает 1, составляет менее 5%, то есть комбинаторика в отобранных событиях практически

отсутствует. Для оценки фона под сигнальным пиком использовался следующий способ. Из моделирования с помощью программы GEANT (см. ниже) известны параметры сигнального пика и, после нормировки его на число экспериментальных событий, вычитается пик из массового спектра. Оставшийся экспериментальный фон фитируется полиномом 3-й степени. Значения полученной гладкой кривой используются для построения разностной гистограммы (см. рис. 3) и вычисления параметров сигнала от распада Σ^0 .

Результаты анализа полученных распределений и фита функцией Гаусса сигнала от распада Σ^0 приведены в таблице 1. Значимость вычисляется по формуле $\sigma = S/\sqrt{(S+B)}$, где S – сигнал, B – фон. Ошибки величины сигнала – статистические, $\Delta_S = \sqrt{S+B}$.

Таблица 1. Результаты аппроксимации гистограмм (рис. 3) функциями Гаусса

| Мишень | χ^2/ndf | $M(\Lambda^0\gamma)$ ГэВ/c ² | Сигнал (соб.) ± стат. ошибка | Ширина (сигма) пика (МэВ) | Фон (соб.) | значимость (σ) |
|--------|--------------|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------|----------------------------|
| C | 2.9/4 | 1.189±0.003 | 84 ± 21 | 8.8 | 373 ± 19 | 3.9 |
| Si | 6.3/4 | 1.195±0.005 | 166 ± 30 | 7.1 | 740 ± 27 | 5.5 |
| Pb | 6.4/4 | 1.198±0.008 | 20 ± 18 | 6.4 | 306 ± 17 | 1.1 |

Из таблицы 1 видно, что значимый результат получен только для ядер кремния и углерода, статистика эксперимента для ядер свинца недостаточна.

Отношение выходов Σ^0/Λ^0

Для вычисления отношения выходов используем формулу:

$$\Sigma^0/\Lambda^0 = [N_s(\Sigma^0) / \epsilon(\gamma)] / [N_s(\Lambda^0)], \text{ где}$$

$N_s(\Sigma^0)$ – число событий с распадом Σ^0 -гиперонов в массовом спектре системы $(\Lambda^0\gamma)$ (табл. 1);

$\epsilon(\gamma)$ – эффективность регистрации γ -квантов от распада $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$;

$N_s(\Lambda^0)$ – число Λ^0 в выборке событий для поиска распадов $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$.

Полная эффективность регистрации Σ^0 -гиперонов равна произведению эффективностей $\varepsilon(\Lambda^0) \cdot \varepsilon(\gamma)$. Так как эффективность регистрации Λ^0 -гиперонов $\varepsilon(\Lambda^0)$ входит в числитель и в знаменатель формулы, то эта эффективность сокращается. Моделирование показывает равенство эффективности регистрации всех Λ^0 и Λ^0 от распада $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$. Вероятность распада $\text{Br}(\Lambda \rightarrow p\pi) = 0.64$ в вычислениях отношения Σ^0/Λ^0 также не учитывается, так как при регистрации распадов Σ^0 используется та же мода распада Λ^0 -гиперонов. Число $N_s(\Lambda^0)$ в выборке событий, используемое для поиска распадов $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$ в эксперименте для разных мишеней, равно соответственно: 5273 соб. (C), 13070 соб. (Si), 6356 соб. (Pb).

Оценка эффективности $\varepsilon(\gamma)$ получена моделированием по программе GEANT3.21. В программе GEANT для установки СВД-2 имеется процедура восстановления γ -квантов в калориметре ДЕГА, в которой используются геометрия детектора и информация, полученная при калибровке ДЕГА (чувствительность каналов и порог регистрации амплитуд). В качестве входных данных в GEANT использовались МК-события из FRITIOF с образованием Σ^0 -гиперонов. Спектры эффективных масс системы $(\Lambda^0\gamma)$ для восстановленных в ДЕГА γ -квантов приведены на рис. 4 (светлая гистограмма). Так как энергия восстановленных γ -квантов отличается от истинной по разным причинам (шумы, обрезания амплитуд, алгоритм восстановления и т.д.), то строился спектр эффективных масс системы $(\Lambda^0\gamma)$ для восстановленных по программе GEANT зарегистрированных в ДЕГА γ -квантов после применения к системе $(\Lambda^0\gamma)$ критериев отбора, таких же как для экспериментальных событий (красная линия). Эффективность $\varepsilon(\gamma)$ вычисляется делением числа событий этой гистограммы на число Σ^0 -гиперонов на входе в программу GEANT. Параметры гистограмм для каждой мишени после аппроксимации сигналов функцией Гаусса и нормировки использовались для определения фона на рис. 3.

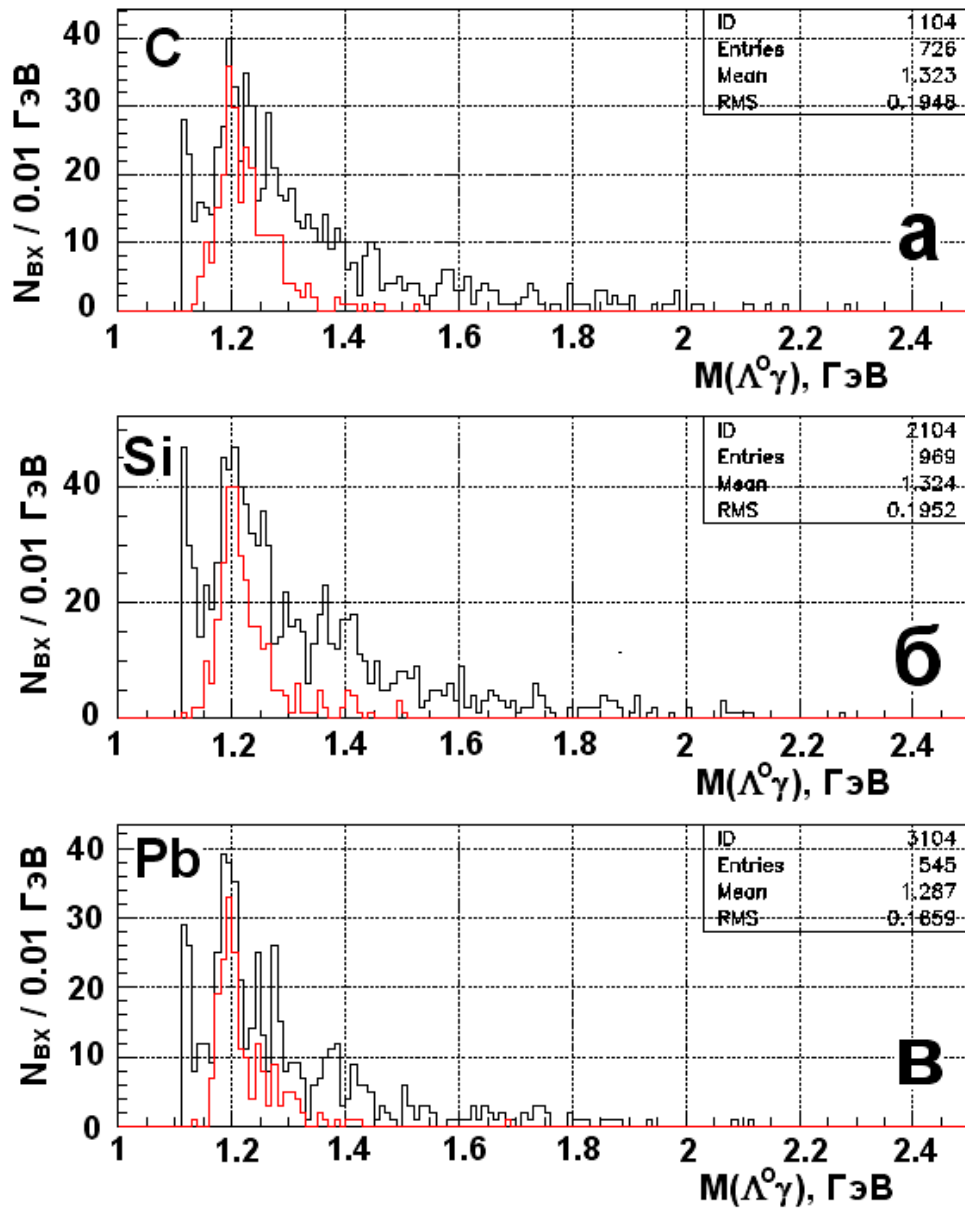


Рис. 4. Массовые МК-спектры системы $(\Lambda^0\gamma)$ для восстановленных в ДЕГА γ -квантов до и после (красные линии) применения критериев отбора для мишеней: а – С, б – Si, в – Pb.

После анализа результатов моделирования в GEANT'e (11816 соб. для углерода, 10039 соб. для кремния и 13548 соб. для свинца) были получены отношения выходов Σ^0/Λ^0 (табл. 2). В графе для $\varepsilon(\gamma)$ приведены отношения чисел событий в красной гистограмме ($N_G(\Sigma^0)$) на рис. 4 к числу событий на входе в GEANT. Относительные ошибки Σ^0/Λ^0 : статистическая – $\Delta_S/S(\Sigma^0)$, систематическая – $1/\sqrt{N_G(\Sigma^0)}$.

Таблица 2. Отношения выходов Σ^0/Λ^0 , ошибки = $\sqrt{(\text{стат.}^2 + \text{сист.}^2)}$

| Мишень | $N_s(\Lambda^0)$ | $N_s(\Sigma^0)$, соб. | $\varepsilon(\gamma)$ | Σ^0/Λ^0 |
|--------|------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| C | 5273 | 84 ± 21 | 0.0474 | 0.34 ± 0.08 |
| Si | 13070 | 166 ± 30 | 0.0394 | 0.32 ± 0.06 |
| Pb | 6356 | 20 ± 18 | 0.0364 | 0.10 ± 0.09 |

Измерение отношений выходов Σ^0/Λ^0 в реакциях на ядерных мишенях интересно тем, что при этом исследуются взаимодействия нуклонов в ядрах. Модели нуклон-ядерных процессов чувствительны к значению этой величины. Появляется еще одна возможность их проверки.

Приведем рисунок из работы [5], на котором отмечены результаты, полученные на установке СВД-2 для мишеней из углерода и кремния. Точка для свинца не показана по причине ее статистической необеспеченности.

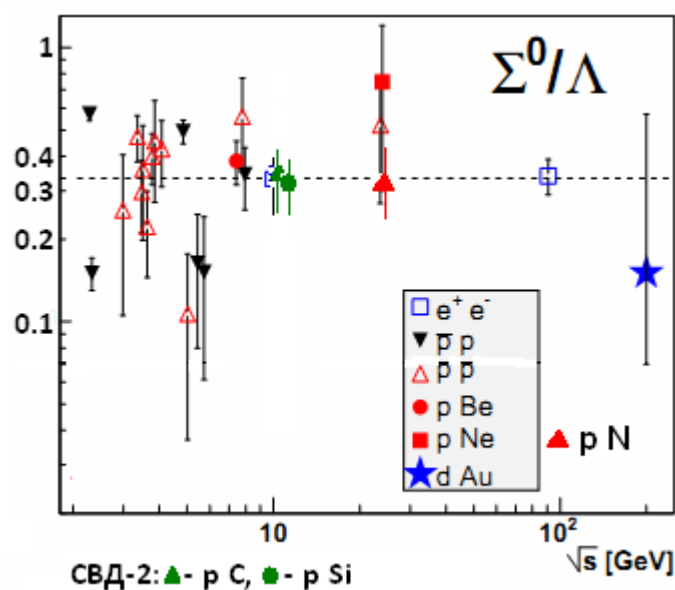


Рис. 5. Зависимость Σ^0/Λ^0 от энергии в с.д.м. из работы [5] с добавлением точек, полученных на установке СВД-2, и точки для pN из [6]. Пунктирная линия показывает величину отношения $\Sigma^0/\Lambda^0 = 1/3$.

Заключение

На статистике 10695 событий с одновременным рождением Λ^0 -гиперона и γ -кванта выделен сигнал (270 соб.) от распада $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$ с использованием данных детектора γ -квантов установки СВД-2. Значимый результат получен только для ядер

кремния и углерода, статистика для ядер свинца недостаточна, результаты для этой мишени можно рассматривать как справочные. Измерено отношение выходов Σ^0/Λ^0 , величина которого составила 0.34 ± 0.08 (C), 0.32 ± 0.06 (Si). Результаты в пределах ошибок сравнимы с данными других экспериментов и указывают на согласие с предположением, что отношение выходов Σ^0/Λ^0 близко к 1/3 в соответствии с числом проекций их изоспинов.

Список литературы

- [1] Wheaton S and Cleymans J 2004 Preprint [hep-th]0407174,
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **31**, 1069.
- [2] Biró T S and Zimányi J 1983 Nucl. Phys. A **395**, 525.
- [3] Biró T S, Lévai P and Zimányi J 1995 Phys. Letters B **347** 6.
- [4] Vance S E, Gyulassy M, Wang X N 1998 Phys. Letters B **443** 45.
- [5] G. Van Baren (for the STAR Collaboration), Romanian Reports in Physics.
58:069074, 2006; <https://arxiv.org/abs/nucl-ex/0512018>
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **31** (2005) 1127–1130.
- [6] Yuldashev B S et al (FNAL-343 Collaboration) Neutral-strange-particle production in $p^{20}\text{Ne}$ and $p\text{N}$ interactions at 300 GeV, Phys. Rev. D (1991) **43** 2792.
- [7] Natalia Zhigareva, Alexey Stavinskiy, EPJ Web of Conferences **204**, 03016.
(2019) Baldin ISHEPP XXIV; <https://doi.org/10.1051/epiconf/201920403016>
- [8] А.А. Киряков, В.М. Роньжин. Реконструкция распадов Λ^0 -гиперонов на установке СВД-2, Препринт ИФВЭ, 2020 (в печати).
- [9] S. Golovnya, The gamma-quantum registration system of SVD setup, Journal of Instrumentation v. 9 (2014) p. 9-16.
- [10] В.В. Авдейчиков и др. Спектрометр с вершинным детектором для экспериментов на ускорителе ИФВЭ, ПТЭ, № 1, 14 (2013).
[Instrum. Exp. Tech. **56**, 9 (2013)].
- [11] Ардашев Е.Н. и др. ЯФ, 2012, том 75, №3, с. 1–6.

Рукопись поступила 4 марта 2020 г.

А.П. Воробьёв и др.

Измерение отношения выходов Σ^0 / Λ^0 в pA-взаимодействиях при 70 ГэВ.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 11.03.2020. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.

Печ.л. 0, 75. Уч.–изд.л. 1,15. Тираж 80. Заказ 6. Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ

142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2020-2,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2020
