

ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ВЫХОДОВ Σ^0/Λ^0 В pA -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ 70 ГэВ

© 2021 г. А. П. Воробьев¹⁾, А. А. Киряков¹⁾,
В. М. Роньжин¹⁾, В. Н. Рядовиков^{1)*}, Ю. П. Петухов²⁾

Поступила в редакцию 30.07.2020 г.; после доработки 30.07.2020 г.; принята к публикации 30.08.2020 г.

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 (С), 0.32 ± 0.06 (Si) и 0.10 ± 0.09 (Pb). Результаты сравниваются с данными других экспериментов.

DOI: 10.31857/S0044002721030168

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени экспериментальной информации об образовании Σ^0 -гиперонов в протон-ядерных столкновениях существует немного. В то же 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 изучалось 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 изоспи-

нов, 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 $(s_{NN})^{1/2} = 200$ 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 С + С-столкновений в программе UrQMD показывает, что Σ^0/Λ^0 может быть от 0.3 до 0.6 [7].

Цель настоящей 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 pA -взаимодействиях на ядрах углерода (С), 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 $1.1 <$

¹⁾НИЦ “Курчатовский институт” — ИФВЭ, Протвино, Россия.

²⁾Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия.

*E-mail: riadovikov@ihep.ru

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

Мишень	χ^2/ndf	$M(\Lambda^0\gamma)$, ГэВ/ c^2	Сигнал (соб.) \pm \pm 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

$< M(p\pi^-) < 1.13$ 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).

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 (3×3) 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) \times 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 (3×3) ячейке и применения к ним критериев отбора ливней от γ -квантов. Основные критерии следующие:

- Кластер (3×3) должен содержать не менее 2 каналов с сигналом выше порога, равного 10 отсчетам 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 FRITIOF7.02 для pA -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.

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 $P_t(\gamma) = 0.08 + 0.1P_t(\Lambda^0)$ и $P_t(\gamma) = 0.06 - 0.05P_t(\Lambda^0)$ (рис. 2). Полученные после такого отбора событий спектры эффективных масс системы ($\Lambda^0\gamma$) для мишеней C, Si и Pb приведены на рис. 3.

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 фитуруется полиномом 3-й степени. Значения

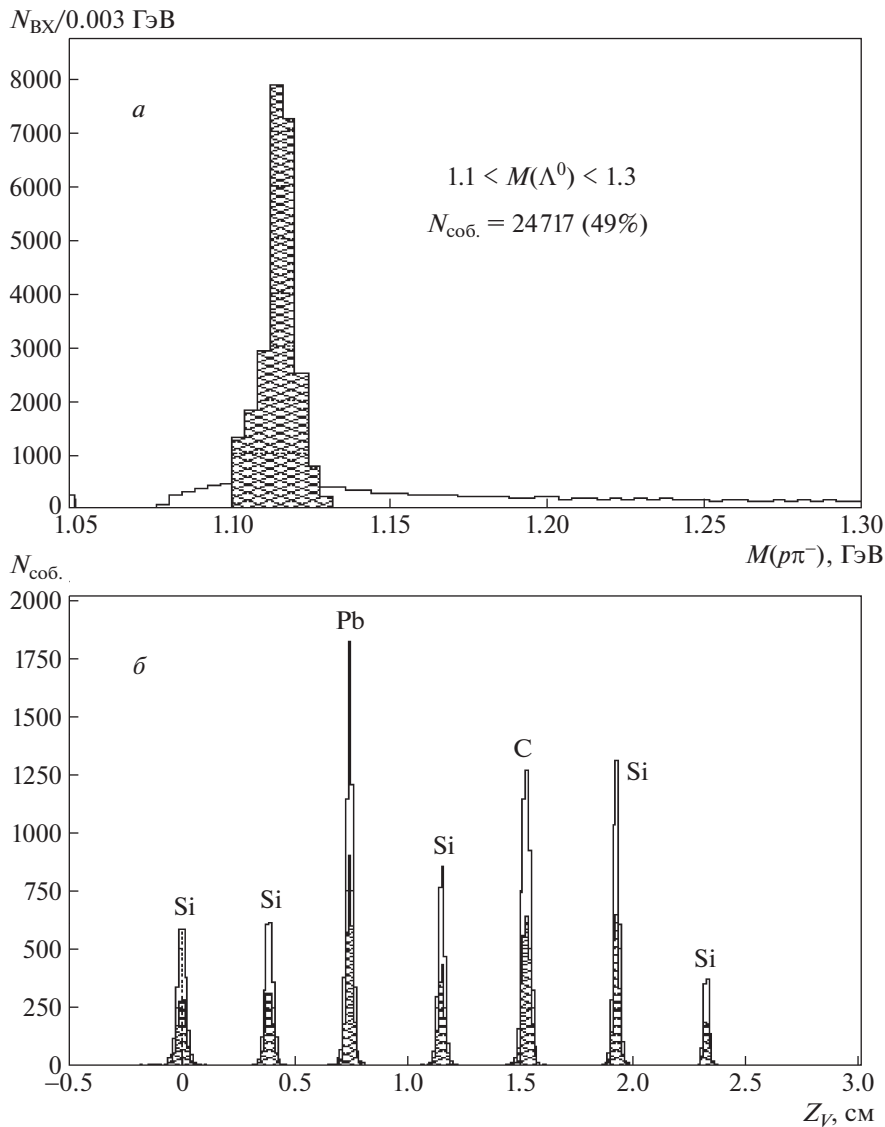


Рис. 1. *a* — Эффективная масса системы ($p\pi^-$), заштрихована область выделения распадов Λ^0 , *б* — распределение событий с $\Lambda^0 + \gamma$ по пластинам мишени (Z — координата первичной вершины). Заштрихованные гистограммы для выделенных распадов Λ^0 -гиперонов.

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 сигнала от распада Σ^0 функцией Гаусса приведены в табл. 1. Значимость сигнала вычисляется по формуле $\sigma = S/(S+B)^{1/2}$, где S — сигнал, B — фон. Статистическая ошибка величины сигнала $\Delta_S = (S+B)^{1/2}$.

Из табл. 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

$$\Sigma^0/\Lambda^0 = [N_s(\Sigma^0)/\varepsilon(\gamma)]/[N_s(\Lambda^0)],$$

где $N_s(\Sigma^0)$ — число событий с распадом Σ^0 -гиперонов в массовом спектре системы ($\Lambda^0\gamma$) (табл. 1); $\varepsilon(\gamma)$ — 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 $\varepsilon(\Lambda^0) \times \varepsilon(\gamma)$. Так как эффективность регистрации Λ^0 -

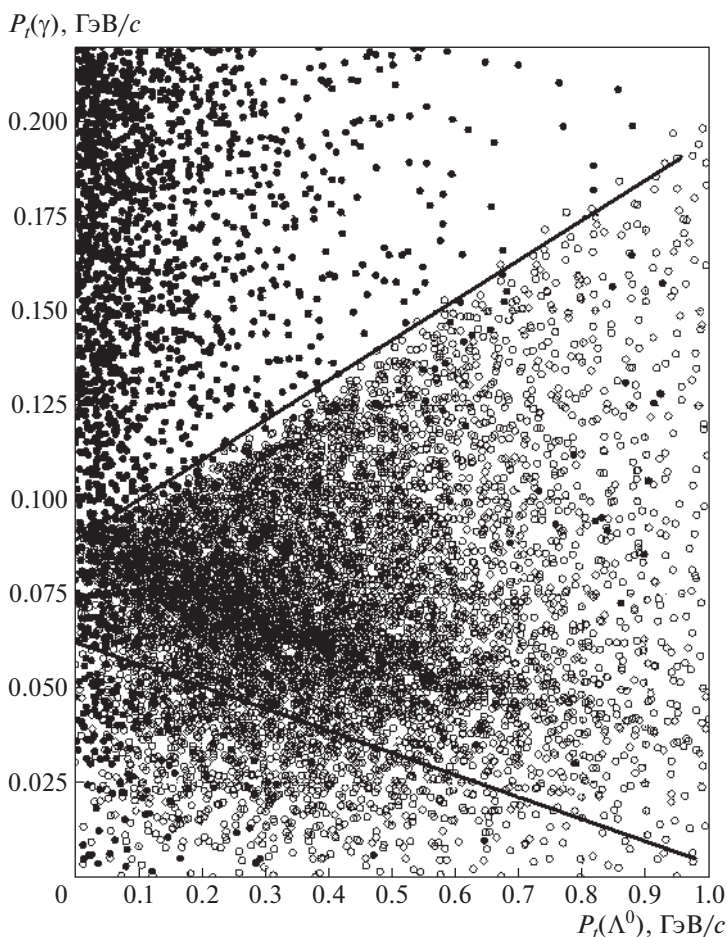


Рис. 2. Плот МК-событий для определения критериев отбора — зависимость поперечных импульсов Λ^0 и γ (● — эксперимент, ○ — моделирование). Линии ограничивают используемые в эксперименте области для выделения распадов Σ^0 .

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 событий (C), 13070 событий (Si), 6356 событий (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 (гистограмма без штриховки). 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 (гистограмма со штриховкой). 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.

После анализа результатов моделирования в

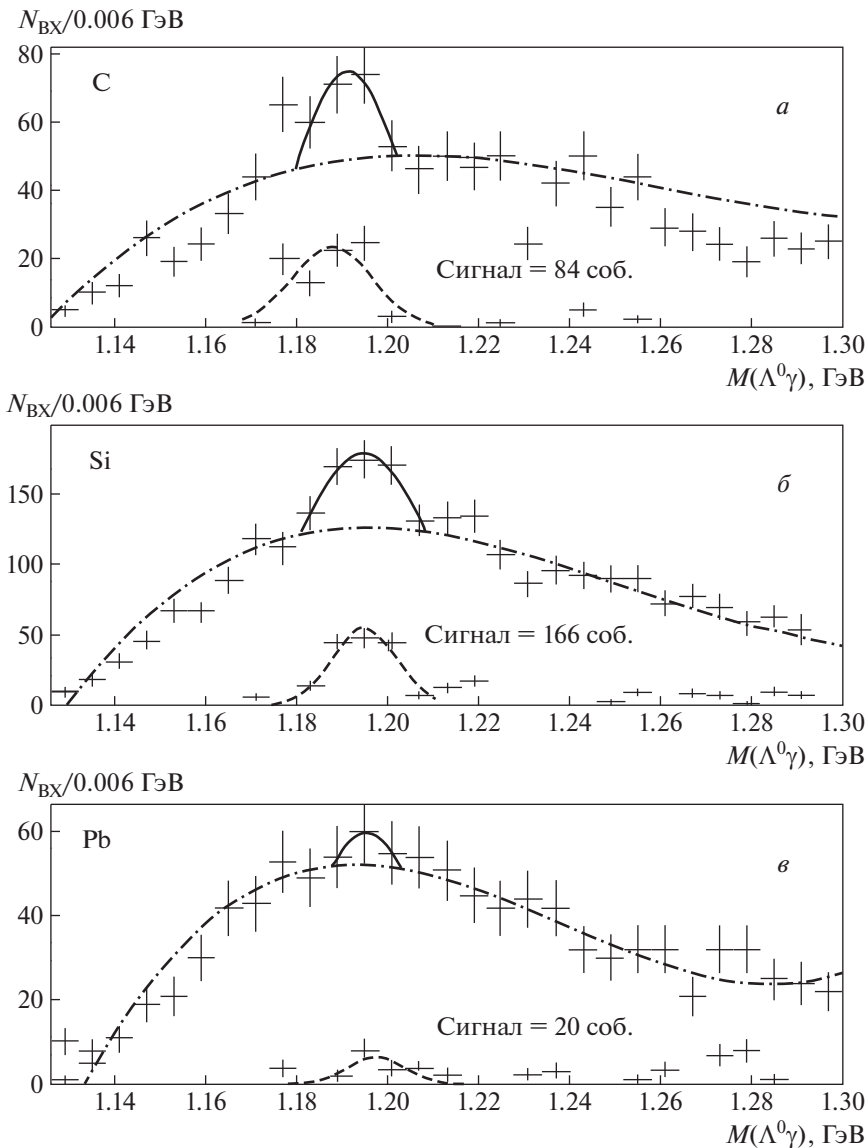


Рис. 3. Массовые спектры системы $(\Lambda^0\gamma)$ для разных мишеней (*а* — С, *б* — Si, *в* — Pb) после применения критериев отбора (см. текст). Сплошной линией обозначена аппроксимация сигнала функцией Гаусса, штрихпунктирной линией — аппроксимация фона полиномом 3-й степени. Внизу рисунка — разность двух гистограмм (сигнал–фон) и ее аппроксимация функцией Гаусса (штриховая кривая).

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

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

Таблица 2. Отношения выходов Σ^0/Λ^0 , ошибки = $(\text{стат.}^2 + \text{сист.}^2)^{1/2}$

Мишень	$N_s(\Lambda^0)$	$N_s(\Sigma^0)$, соб.	$\varepsilon(\gamma)$	Σ^0/Λ^0
С	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

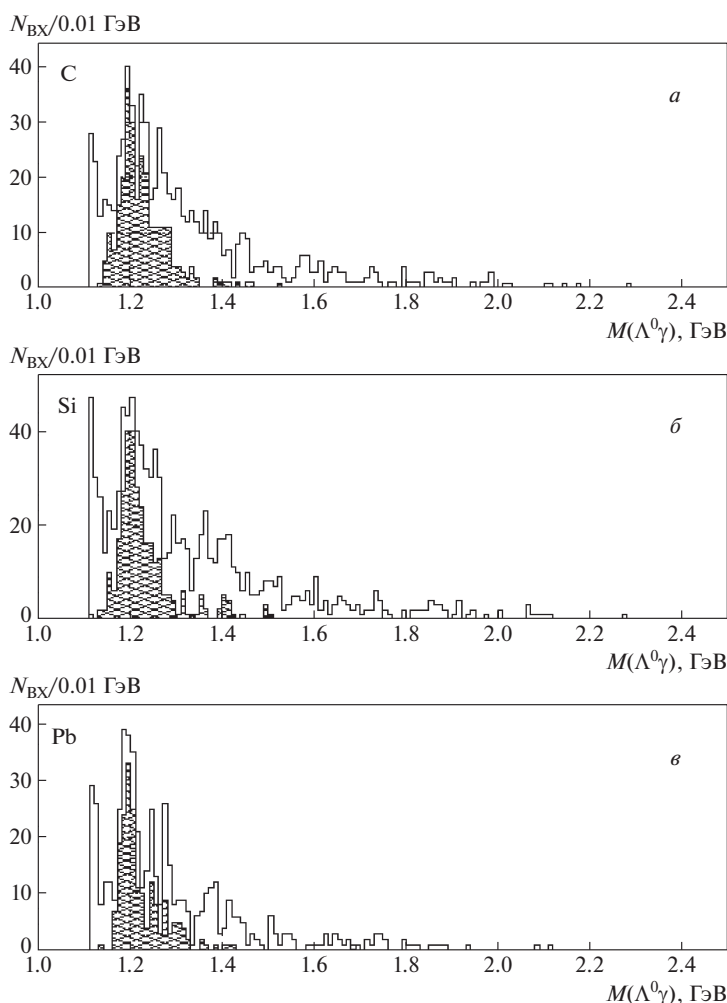


Рис. 4. Массовые МК-спектры системы $(\Lambda^0\gamma)$ для восстановленных в ДЕГА γ -квантов до и после (заштриховано) применения критериев отбора для мишеней: а — С, б — Si, в — Pb.

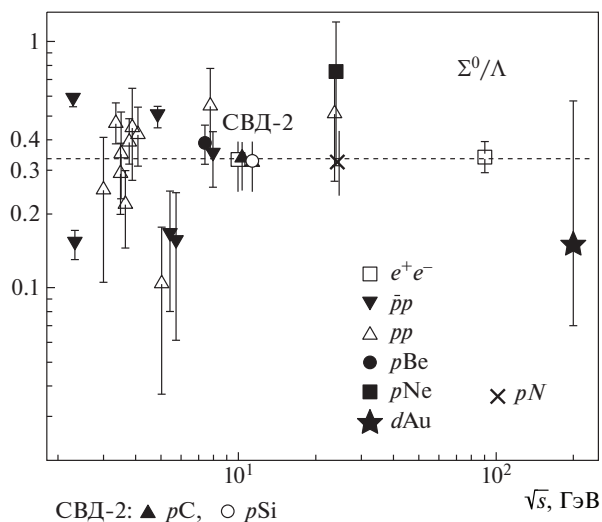


Рис. 5. Зависимость отношения выходов Σ^0/Λ^0 от энергии в с.ц.м. из работы [5] с добавлением результатов, полученных на установке СВД-2, и результата для pN из [6]. Штриховая линия показывает величину отношения $\Sigma^0/\Lambda^0 = 1/3$.

отмечены результаты, полученные на установке СВД-2 для мишеней из углерода и кремния (рис. 5). Результат для свинца не показан по причине его статистической необеспеченности.

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 (С), 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. S. Wheaton and J. Cleymans, *J. Phys. G* **31**, 1069 (2005); hep-ph/0407174.
2. T. S. Biró and J. Zimányi, *Nucl. Phys. A* **395**, 525 (1983).
3. T. S. Biró, P. Lévai, and J. Zimányi, *Phys. Lett. B* **347**, 6 (1995).
4. S. E. Vance, M. Gyulassy, and X.-N. Wang, *Phys. Lett. B* **443**, 45 (1998).
5. G. Van Buren (for the STAR Collab.), *J. Phys. G* **31**, 1127 (2005); *Rom. Rep. Phys.* **58**, 069 (2006); <https://arxiv.org/abs/nucl-ex/0512018>
6. B. S. Yuldashev, S. M. Aliev, M. A. Alimov, K. K. Artykov, S. O. Edgorov, S. V. Inogamov, A. V. Khaneles, E. A. Kosonowski, S. L. Lutpullaev, N. Rasulov, T. P. Rodionova, K. T. Turdaliev, E. Turumov, A. A. Yuldashev, R. J. Loveless, and D. D. Reeder, *Phys. Rev. D* **43**, 2792 (1991).
7. N. Zhigareva and A. Stavinskiy (Baldin ISHEPP XXIV), *EPJ Web Conf.* **204**, 03016 (2019); <https://doi.org/10.1051/epjconf/201920403016>
8. А. А. Киряков, В. М. Роньжин, Препринт № 2020-04, ИФВЭ (Протвино, 2020).
9. S. Golovnya, *J. Instrum.* **9**, C09016 (2014).
10. В. В. Авдейчиков, А. Н. Алеев, Е. Н. Ардашев, С. Г. Базиладзе, Г. А. Богданова, А. М. Вишневская, В. Ю. Волков, А. П. Воробьев, А. Г. Воронин, С. Н. Головня, В. Ф. Головкин, С. А. Горохов, Я. В. Гришкевич, П. Ф. Ермолов, Е. Г. Зверев, С. А. Зоткин и др., *ПТЭ*, № 1, 14 (2013) [*Instrum. Exp. Tech.* **56**, 9 (2013)].
11. В. Н. Рядовиков (от имени Сотрудничества СВД-2), *ЯФ* **75**, 1050 (2012) [*Phys. At. Nucl.* **75**, 989 (2012)].

MEASUREMENT OF THE Σ^0/Λ^0 RATIO IN pA INTERACTIONS AT 70 GeV

A. P. Vorobiev¹⁾, A. A. Kiryakov¹⁾, V. M. Ronjin¹⁾, V. N. Ryadovikov¹⁾, Yu. P. Petukhov²⁾

¹⁾*NRC “Kurchatov Institute — IHEP, Protvino, Russia*

²⁾*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

The active target with C, Si and Pb plates was irradiated in 70-GeV proton beam at U-70 accelerator. The signal (270 events) from $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$ decays was selected in 10695 events with Λ^0 and γ using gamma-detector data. The following 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 other experiments is presented.