

МЕХАНИЗМЫ РОЖДЕНИЯ Ξ -ГИПЕРОНОВ АНТИКАОНАМИ НА НУКЛОНАХ С УЧЕТОМ ВЫСОКОСПИНОВЫХ РЕЗОНАНСОВ

В.Л. Коротких, Д.Е. Ланской, Д.А. Шаров

НИИЯФ МГУ, 119991 Москва, Россия

sharov@depni.sinp.msu.ru

A phenomenological model of Ξ hyperon production from nucleons by antikaons, which includes exchanges by various Λ and Σ hyperons with spin up to $7/2$, is developed. The model successfully reproduces available experimental data on integral and differential cross sections and polarization of the reaction in the different charge channels at the center-of-mass energies from the threshold up to 3.2 GeV. The s channel exchange by high-mass and high-spin resonances is important for systematic description of all available data.

1. Введение

Хотя Ξ -гипероны были открыты вскоре после Λ - и Σ -гиперонов, информация о динамических свойствах барионов со странностью -2 до сих пор остается значительно более ограниченной. Связано это с тем, что реакции рождения Ξ -гиперонов по сравнению с рождением Λ - и Σ -гиперонов обычно сложнее, а их сечения меньше.

Рождение Ξ -гиперонов в бинарном процессе возможно на пучках каонов в реакции $\bar{K}N \rightarrow K\Xi$, которая активно исследовалась в 60-70-е годы [1,2]. Однако, поскольку пучки имели низкую интенсивность, полученная статистика была мала, а параметры реакций извлекались с большой погрешностью. Известен ряд теоретических работ (например, [3,4]), в которых обсуждались возможные механизмы реакции $\bar{K}N \rightarrow K\Xi$ и отмечены некоторые интересные закономерности, однако попыток единого описания всей совокупности или хотя бы значительной части экспериментальных данных до настоящего времени не предпринималось.

Можно надеяться, что в ближайшие годы физика Ξ -гиперонов выйдет на качественно новый уровень благодаря развитию экспериментальной базы. Изучение фоторождения Ξ -гиперонов в реакции $\gamma p \rightarrow K^+ K^+ \Xi^-$ уже сейчас активно идет в Джефферсоновской лаборатории (США) [5]. Хотя сечения электромагнитного рождения, разумеется, малы, возможности ускорительного комплекса CEBAF позволяют получить весьма детальную информацию о реакции. Мощный пучок антикаонов, который вскоре должен быть получен на ускорительном комплексе J-PARC (Япония), позволит выполнить исследование рождения Ξ -гиперонов на ядрах и получить информацию о ΞN -взаимодействии из свойств Ξ -гиперядер [6], о которых до настоящего времени известно очень мало.

Таким образом, разработка теоретических подходов, позволяющих описать различные реакции рождения Ξ -гиперонов и понять их механизмы, становится актуальной задачей. В настоящей работе мы представляем анализ всей совокупности данных о реакции $\bar{K}N \rightarrow K\Xi$ в диапазоне энергий от порога до 3.2 ГэВ в системе центра масс в различных зарядовых каналах.

Информация, извлеченная из реакции $\bar{K}N \rightarrow K\Xi$, может быть далее использована для анализа данных по фоторождению Ξ -гиперонов.

2. Модель

Для вычисления амплитуд и сечений используется стандартная диаграммная техника. Простейшие диаграммы для реакции $\bar{K}N \rightarrow K\Xi$ представлены на рис. 1. Т.к. не существует мезонов с двойной странностью, одномезонный t-канальный обмен невозможен. Поэтому мы строим модель на основе s- и u-канальных механизмов.

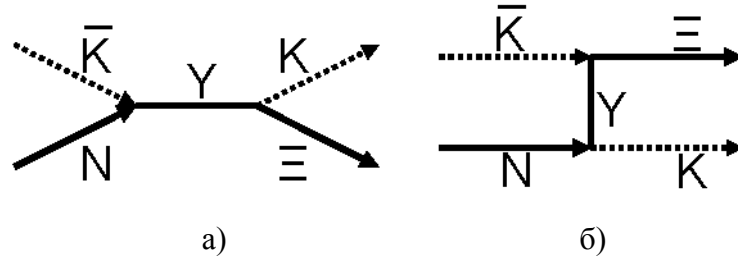


Рис. 1. Диаграммы процесса $\bar{K}N \rightarrow K\Xi$, соответствующие s- и u-каналам. Y обозначает обмениваемый барион: Λ - или Σ -гиперон.

Мы рассматриваем три зарядовых канала, для которых имеются экспериментальные данные:

$$K^- p \rightarrow K^+ \Xi^-, \quad (1)$$

$$K^- p \rightarrow K^0 \Xi^0, \quad (2)$$

$$K^- n \rightarrow K^0 \Xi^-, \quad (3)$$

В процесс (1) могут давать вклад u- и s-канальные обмены как Λ - так и Σ -гиперонами; в процессе (2) u-канальный обмен Λ -гипероном запрещен; в процессе (3) невозможен s-канальный обмен Λ -гипероном.

Для вершин $B(1/2^+)Y(1/2)K(0^-)$ используем эффективные лагранжианы с псевдовекторной связью:

$$L = \frac{f_{BYK}}{m_\pi} \bar{B} \gamma_\mu \Gamma Y \partial^\mu K + h.c., \quad (4)$$

где $\Gamma = \gamma_5$ для $Y(1/2^+)$ или $\Gamma = 1$ для $Y(1/2^-)$.

Для вершин $B(1/2^+)Y(3/2)K(0^-)$ связь описывается лагранжианом вида:

$$L = \frac{f_{BYK}}{m_\pi} \bar{B} \Gamma Y_\mu \partial^\mu K + h.c., \quad (5)$$

где $\Gamma = 1$ для $Y(3/2^+)$ или $\Gamma = \gamma_5$ для $Y(3/2^-)$.

Для вершин $B(1/2^+)Y(5/2)K(0^-)$ и $B(1/2^+)Y(7/2)K(0^-)$ лагранжианы строятся аналогично.

Пропагатор для барионов со спином $1/2$ имеет стандартную форму. Для барионов со спинами $3/2$ и $5/2$ мы использовали пропагаторы из работ [7] и [8] соответственно. Для пропагатора частицы со спином $7/2$ мы использовали полученное нами выражение. Явные формулы для этих пропагаторов довольно громоздки и здесь не приводятся.

Формфактор для каждой диаграммы выбран в гауссовском виде $F(q)=\exp(-q^2/Q^2)$, где q - 3-импульс обмениваемого бариона, а Q – параметр обрезания.

3. Результаты и обсуждение

Мы выполнили прямую подгонку параметров модели (произведения констант связи $f_Y=f_{KNY}f_{K\Xi Y}$ и параметры обрезания) под экспериментальные интегральные и дифференциальные сечения реакций (1) и (2). Данные по реакции (3), крайне скудные и с большими ошибками, использовались лишь для проверки модели. В процедуру подгонки не включались также весьма грубые данные по поляризации.

Для начала мы включили в модель обмен только Λ - и Σ - гиперонами в основных состояниях. Уже это позволило воспроизвести основные качественные черты данных. Описание существенно улучшается, если включить также обмен двумя резонансами со спином $3/2$: $\Sigma(1385)$ и $\Lambda(1520)$. Дальнейшее увеличение числа подпороговых (порог реакции равен 1812-1819 МэВ в зависимости от зарядового канала) резонансов, например, добавление $\Lambda(1405)$, не дает заметного эффекта.

При учете u - и s -канальных обменов Λ -, Σ -, $\Sigma(1385)$ -, и $\Lambda(1520)$ -гиперонами наилучшее полученное значение $\chi^2=1105$ при 374 экспериментальных точках. Модель хорошо описывает энергетическую зависимость интегрального сечения, форму дифференциального сечения. Однако заметный пик вперед, наблюдаемый в дифференциальных сечениях реакции (2), модель в данном варианте не описывает. Модель также занижает значение интегрального сечения в области $\sqrt{s}=1.9-2.1$ ГэВ. Мы видим, что возможности модели с учетом обмена только подпороговыми резонансами ограничены, и пытаемся улучшить качество описания данных, включая в расчет резонансы, лежащие выше порога.

В компиляции свойств элементарных частиц [9] перечислено 8 Λ - и Σ -резонансов с массой 1.89-2.35 ГэВ, обнаруженных с высокой степенью достоверности. Ни для одного из этих резонансов не установлены относительные вероятности распада на ΞK , и только для двух из них известны верхние границы. По-видимому, для всех этих резонансов данные вероятности малы. Однако, поскольку сечения реакции $\bar{K}N \rightarrow K\Xi$ также малы, даже с маленькими вероятностями распада надпороговые резонансы могут давать существенный вклад в эту реакцию.

Мы пробовали включать в расчет различные наборы надпороговых резонансов и установили, что наилучшее описание достигается при учете s -канальных обменов резонансами $\Lambda(2100, J^P=7/2^-)$ и $\Sigma(2030, J^P=7/2^+)$. Таким образом, в окончательном варианте модель включает u - и s -канальные обмены Λ -, Σ -, $\Sigma(1385)$ -, и $\Lambda(1520)$ -гиперонами и s -канальные обмены $\Lambda(2100)$ - и $\Sigma(2030)$ -гиперонами. Свободными параметрами модели являются: 6 произведений констант связи $f_Y=f_{KNY}f_{K\Xi Y}$ и 2 параметра обрезания Q и Q_R для подпороговых и надпороговых частиц соответственно.

Наилучшее описание данных моделью достигается при следующих значениях параметров: $f_{\Lambda} = -0.140$, $f_{\Sigma} = -0.261$, $f_{\Lambda(1520)} = 0.806$, $f_{\Sigma(1385)} = 0.035$, $f_{\Lambda(2100)} = 0.041$, $f_{\Sigma(2030)} = 0.015$, $Q = 0.987$, $Q_R = 0.523$. При этом $\chi^2 = 984$. Интегральные и дифференциальные сечения реакций (1) и (2) при таких значениях параметров, в сравнении с результатами, полученными при учете u - и s -канальных обменов Λ -, Σ -, $\Sigma(1385)$ -, и $\Lambda(1520)$ -гиперонами представлены на рис. 2 и 3.

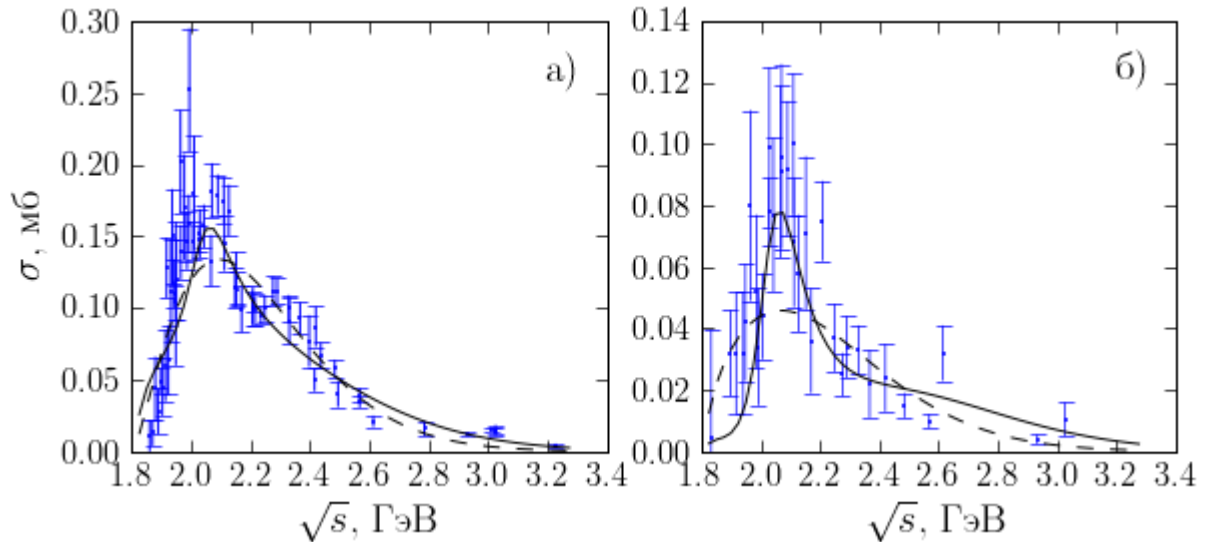


Рис. 2. Интегральные сечения σ в зависимости от энергии в системе центра масс \sqrt{s} для реакций а) $K^- p \rightarrow K^+ \Xi^-$ и б) $K^- p \rightarrow K^0 \Xi^0$. Кривые показывают результаты модельных расчетов: пунктирная кривая показывает наилучшее приближение при учете обменов только подпороговыми частицами, сплошная кривая – при учете обменов как подпороговыми частицами, так и надпороговыми резонансами $\Lambda(2100)$ и $\Sigma(2030)$.

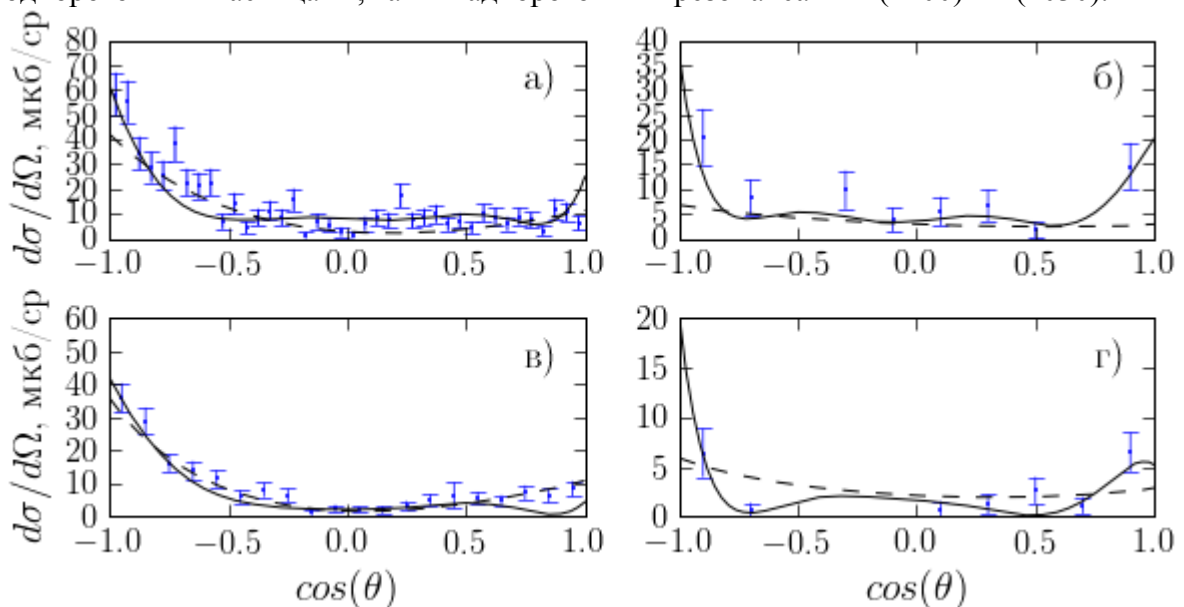


Рис. 3. Дифференциальные сечения $d\sigma/d\Omega$ в зависимости от косинуса угла вылета каона в системе центра масс $\cos(\theta)$ для реакций $K^- p \rightarrow K^+ \Xi^-$ при $\sqrt{s} = 2.02$ ГэВ (а) и $\sqrt{s} = 2.27$ ГэВ (в) и реакции $K^- p \rightarrow K^0 \Xi^0$ при $\sqrt{s} = 2.02$ ГэВ (б) и $\sqrt{s} = 2.27$ ГэВ (г). Кривые показывают результаты модельных расчетов: пунктирная кривая показывает наилучшее приближение при учете обменов только подпороговыми частицами, сплошная кривая – при учете обменов как подпороговыми частицами, так и надпороговыми резонансами $\Lambda(2100)$ и $\Sigma(2030)$.

Добавление надпороговых резонансов $\Lambda(2100)$ и $\Sigma(2030)$ существенно улучшило описание интегральных сечений в области $\sqrt{s}=1.9-2.1$ ГэВ. В дифференциальных сечениях реакции (2) появился пик вперед в согласии с экспериментом. Рассчитанные значения поляризации стали сопоставимы с данными. Данные по реакции (3), не включенные в процедуру подгонки, также описываются неплохо.

4. Заключение

Мы разработали феноменологическую модель рождения Ξ -гиперонов антикаонами на протонах. Впервые получено систематическое и согласованное описание всего объема имеющихся данных в интервале энергий от порога до $\sqrt{s}=3.2$ ГэВ. Показано, что для описания данных, помимо u - и s -канальных обменов подпороговыми частицами Λ , Σ , $\Sigma(1385)$, и $\Lambda(1520)$, необходимо включение s -канальных обменов надпороговыми высокоспиновыми резонансами $\Lambda(2100)$ и $\Sigma(2030)$. Модель может использоваться, в частности, для предсказания сечений рождения Ξ -гиперядер в реакции (\bar{K}, K) в различных зарядовых каналах [10].

Дальнейшее изучение механизмов рождения Ξ -гиперонов связано с включением в рассмотрение реакции $\gamma p \rightarrow K^+ K^+ \Xi^-$ [5]. В единственной на эту тему теоретической работе [11] данные по реакции (\bar{K}, K) не принимаются во внимание. Следующей задачей должно стать совместное описание рождения Ξ -гиперонов каонами и фотонами.

Работа частично поддержана грантом РФФИ 08-02-00510 и грантом для ведущих научных школ НШ-485.2008.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A.Bellefon et al.* // Nuovo Cimento A. 1972. V. 7. P. 567, *J.P.Berge et al.* // Phys. Rev. 1966. V. 147. P. 945, *P.M.Dauber et al.* // Phys. Rev. 1969. V. 179. P. 1262, *W.P.Trower et al.* // Phys. Rev. 1968. V. 170. P. 1207, *D.D.Carmony et al.* // Phys. Rev., Lett. 1964. V. 12. P. 482, *T.G.Trippe and P.E.Schlein* // Phys. Rev. 1967. V. 158. P. 1334.
2. *J.Griselin et al.* // Nucl. Phys. B. 1975. V. 93. P. 189, *G.Burgun et al.* // Nucl. Phys. B. 1968. V. 8. P. 447, *J. R. Carlson et al.* // Phys. Rev. D. 1973. V. 7. P. 2533, *J.C.Scheuer et al.* // Nucl. Phys. B. 1971. V. 33. P. 61, *E.Briefel et al.* // Phys. Rev. D. 1975. V. 12. P. 1859, *F.A.Dibianca et al.* // Nucl. Phys. B 1975. V. 98. P. 137.
3. *M.E.Ebel and P.B.James* // Phys. Rev. 1967. V. 153. P. 1694.
4. *B.K.Agarwal et al.* // J. Phys. A. 1971. V. 4. P. L52-L55.
5. *L.Guo et al.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 76. P. 025208, *W. Price et al.* // Phys. Rev. C. 2005. V. 71. P. 058201
6. *T.Nagae* // Nucl. Phys. A. 2005. V. 754. P. 443.
7. *M. Benmerrouche, R. Davidson and N. Mukhopadhyay* // Phys. Rev. C 1989. V. 39. P. 2339.
8. *J. C. David, C. Fayard, G. H. Lamot, and B. Saghai* // Phys. Rev. C 1996. V. 53. P. 2613.
9. *C. Amsler et al.* // Phys. Lett. B 2008. V. 667. P. 1.
10. *V.L.Korotkikh, D.E.Lanskoy, D.A.Sharov and Y.Yamamoto* // Proc. 23rd Intern. Nucl. Phys. Conf. (Tokyo, 2007), Elsevier. 2008. V. 2. P. 176.
11. *K.Nakayama, Y.Oh and H.Haberzettl* // Phys. Rev. C. 2006. V. 74. P. 035205.