

СЕЧЕНИЯ $K^\pm N$ -РАССЕЯНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ КУМУЛЯТИВНЫХ КАОНОВ В АТОМНЫХ ЯДРАХ

© 2019 г. В. Ф. Переседов*

*Лаборатория физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина,
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия*

Поступила в редакцию 29.06.2018 г.; после доработки 27.08.2018 г.; принята к публикации 27.08.2018 г.

Для количественных оценок влияния вторичных взаимодействий кумулятивных K^+ - и K^- -мезонов на величины их выходов из разных атомных ядер в pA -взаимодействиях при энергиях протонов 9–10 и 15–70 ГэВ нужны сечения каон-нуклонного рассеяния. Подготовка этих сечений для программы моделирования является первоочередной работой, которая была выполнена для интервала импульсов K -мезонов, равного 0.35–2.75 ГэВ/с.

DOI: 10.1134/S0044002719010136

1. ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является изложение алгоритма подготовки сечений каон-нуклонного рассеяния, которые использовались в программе моделирования вторичных рассеяний кумулятивных K^+ - и K^- -мезонов в атомных ядрах [1]. Эти расчеты позволили провести сравнение измеренных в экспериментах отношений выходов кумулятивных K^+ - и K^- -мезонов с предсказаниями модели [2] дополнительного коллективного моря кварк-антикварковых пар в атомных ядрах.

Процессы рождения кумулятивных K^+ - и K^- -мезонов при больших значениях масштабной кумулятивной переменной Ставинского x_S [3] изучались в pA -рассеянии для широкого интервала массовых чисел $A = 9-208$, углов $\theta \approx 168^\circ-90^\circ$ и при энергиях протонных пучков $E_0 = 9-10$ и 15–70 ГэВ. Эти эксперименты ставились на установках ДИСК, ФАС и СКА на ускорителях ОИЯИ, ИТЭФ и ИФВЭ [4–8]. Сечения, измеренные для высоких по возможностям этих установок импульсов K -мезонов и больших углов θ в задней полусфере, которым соответствовали наибольшие достижимые тогда значения переменной x_S , представляли большой интерес и были важны и нужны для дальнейшего развития теории этих процессов.

При максимальных импульсах K -мезонов ~ 1.5 ГэВ/с, которые на пределе возможностей регистрировались в этих экспериментах, значения переменной x_S составляли величину $x_S \approx 3.3$, т.е. были не такими большими, как бы хотелось

теоретикам и экспериментаторам. В обозримом будущем эта тематика останется актуальной, будут ставиться новые более совершенные эксперименты, продолжит совершенствоваться теория этих процессов, а моделирование поможет лучше их понимать.

2. ВЫБОР РАБОЧЕГО ИНТЕРВАЛА ИМПУЛЬСОВ И СЕЧЕНИЯ $K^\pm N$ -РАССЕЯНИЯ

База данных сечений каон-нуклонного рассеяния была разработана для интервала импульсов K -мезонов $p_{\min}-p_{\max} = 0.35-2.75$ ГэВ/с, где величины p_{\min} и p_{\max} соответствуют нижней и верхней границам выбранного рабочего интервала импульсов программы моделирования.

Величина p_{\min} определяется минимальным значением импульса, при котором в базе данных имеются все нужные сечения. Из-за отсутствия некоторых сечений для интервала импульсов 0–0.35 ГэВ/с не удастся установить $p_{\min} < 0.35$ ГэВ/с. Это обстоятельство тем не менее не приводит к фатальным последствиям, так как при импульсе $p_{\min} \approx 0.35$ ГэВ/с и угле $\theta \approx 180^\circ$ значение переменной $x_S \approx 1.3$, что не исключает возможности моделирования вторичных взаимодействий кумулятивных K^+ - и K^- -мезонов, начиная с близких к единице значений x_S в интервале $x_S \approx 1.3-3$, который представлял для нас интерес.

Величина p_{\max} определяется выбором между двумя его возможными значениями: минимальным

*E-mail: dor77@yandex.ru

необходимым и максимальным приемлемым. При выборе первого из них должна в значимой мере обеспечиваться приемлемая, на уровне 15–20%, точность расчетов. Выбор второго значения может способствовать повышению точности, но оно достигается с трудом, так как при этом требуется учет и описание все большего числа неупругих реакций, что не всегда возможно из-за фрагментарности или отсутствия в этом интервале импульсов нужных экспериментальных данных.

Для обеспечения приемлемой точности моделирования по импульсу K -мезонов программный интервал импульсов 0–2.75 ГэВ/с был разбит на 110 одинаковых бинов шириной 0.025 ГэВ/с. Значение импульса в центре i -го бина определялось по формуле

$$p_i \text{ (ГэВ/с)} = 0.0125 + (i - 1) \times 0.025, \quad (1)$$

где $i = 1-110$.

В соответствии с квантовыми числами K -мезона и его партнера-нуклона в программе реализовано моделирование K^+p -, K^+n - и K^-p -, K^-n -рассеяний, для описания которых требуются перечисленные ниже полные (tot), упругие (el) и неупругие (in) сечения, а также сечения упругой перезарядки (ce):

$$\sigma_{\text{tot}}(K^+p) = \sigma_{\text{el}}(K^+p) + \sigma_{\text{in}}(K^+p), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}}(K^+n) &= \sigma_{\text{el}}(K^+n) + \\ &+ \sigma_{\text{ce}}(K^+n \rightarrow \bar{K}^0p) + \sigma_{\text{in}}(K^+n), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{tot}}(K^-p) &= \sigma_{\text{el}}(K^-p) + \\ &+ \sigma_{\text{ce}}(K^-p \rightarrow \bar{K}^0n) + \sigma_{\text{in}}(K^-p), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\sigma_{\text{tot}}(K^-n) = \sigma_{\text{el}}(K^-n) + \sigma_{\text{in}}(K^-n). \quad (5)$$

Эти сечения были найдены и скомпилированы из работ [9–15], после чего они были отфитированы. Контроль достоверности их фитов осуществлялся с использованием критерия χ^2 и на основе графической визуализации результатов. Если зависимость экспериментально измеренного сечения от импульса K -мезона p не была сложной, то для ее параметризации использовались полиномы

$$\sigma(p) \approx \sum a_k p^{k-1}. \quad (6)$$

Оптимальные значения их степени и параметров a_k определялись в результате серии фитов, для чего использовалась программа минимизации функционалов Fumili [16]. При фитировании более сложных сечений наряду с полиномами использовались функции Гаусса, Лоренца, логнормальные и другие. В ряде случаев для лучшего описания сечений

использовалось разбиение интервалов их представления по импульсу на более узкие промежутки. После окончания фитирования все используемые в программе для интервала импульсов 0.35–2.75 ГэВ/с сечения были пересчитаны в числовой табулированный вид и внесены в ее базу данных. Кроме этого, были также параметризованы и необходимые для моделирования дифференциальные сечения упругих KN -рассеяний.

Средние относительные ошибки, которые были рассчитаны для использованных в наших расчетах сечений $\sigma_{\text{tot}}(K^+p)$, $\sigma_{\text{el}}(K^+p)$, $\sigma_{\text{in}}(K^+p)$, $\sigma_{\text{tot}}(K^-p)$, $\sigma_{\text{el}}(K^-p)$, $\sigma_{\text{ce}}(K^-p \rightarrow \bar{K}^0n)$, $\sigma_{\text{in}}(K^-p)$, $\sigma_{\text{tot}}(K^+n)$, $\sigma_{\text{el}}(K^+n)$, $\sigma_{\text{ce}}(K^+n \rightarrow \bar{K}^0p)$, $\sigma_{\text{in}}(K^+n)$, $\sigma_{\text{tot}}(K^-n)$, $\sigma_{\text{el}}(K^-n)$, $\sigma_{\text{in}}(K^-n)$, равны соответственно 2.2, 4.6, 6.4, 2.3, 10.7, 8.1, 20.7, 1.3, 19.6, 6.6, 17, 6.0, 10.3, 12% и приводятся здесь лишь для общего представления. Чаще всего это статистические ошибки, приводимые авторами экспериментальных работ без включения в них систематических погрешностей, которые для некоторых сечений могут быть существенно больше указанных выше значений.

3. СЕЧЕНИЯ K^+p -РАССЕЯНИЯ

Экспериментально измеренные полные $\sigma_{\text{tot}}(K^+p)$, упругие $\sigma_{\text{el}}(K^+p)$, неупругие $\sigma_{\text{in}}(K^+p)$ и табулированные сечения показаны на рис. 1–3 в зависимости от импульса K^+ -мезонов в лабораторной системе координат (ЛСК) и, как видно, приемлемо согласуются между собой. Значения неупругих сечений были получены с помощью вычитания:

$$\sigma_{\text{in}}(K^+p) \approx \sigma_{\text{tot}}(K^+p) - \sigma_{\text{el}}(K^+p). \quad (7)$$

В литературе эти неупругие сечения приводятся лишь для узкого интервала импульсов K^+ -мезонов 0.8–1.2 ГэВ/с, который соответствует начальному участку их роста, где они хорошо согласуются с расчетными значениями (7).

Поэтому сравнение результатов расчетов (7) для импульсов 1.2–2.75 ГэВ/с с неупругими сечениями, полученными в какой-либо из представленных в справочниках работ, было желательным. Такая возможность представилась благодаря найденным в работе [17] расчетным и экспериментальным данным. Теоретический анализ K^+p -рассеяния производился в ней с помощью парциальных волн до импульсов K^+ -мезонов ~ 3 ГэВ/с. Расчетные сечения $\sigma_{\text{in}}(K^+p)$, полученные в [17] и в нашей работе, с хорошей точностью на уровне 2–4% согласуются между собой, и на рис. 3 показаны только результаты наших расчетов. При этом сечения $\sigma_{\text{in}}(K^+p)$, цитируемые в [17] и измеренные для

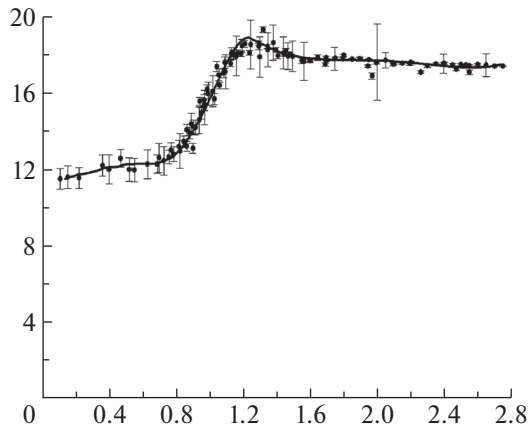


Рис. 1. Экспериментально измеренные (точки) и расчетные (кривая) полные сечения $\sigma_{\text{tot}}(K^+p)$ (в ед. мбн) в зависимости от импульса K^+ -мезонов в ГэВ/с.

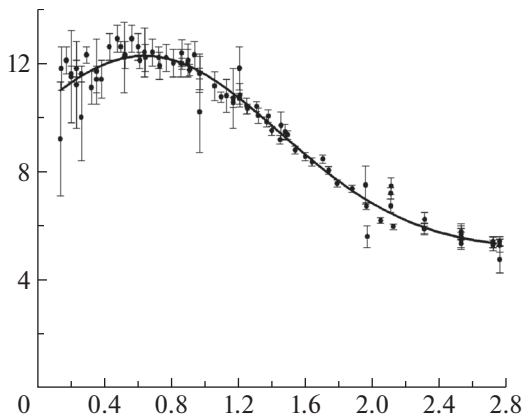


Рис. 2. Экспериментально измеренные (точки) и расчетные (кривая) упругие сечения $\sigma_{\text{el}}(K^+p)$ (в ед. мбн) в зависимости от импульса K^+ -мезонов в ГэВ/с.

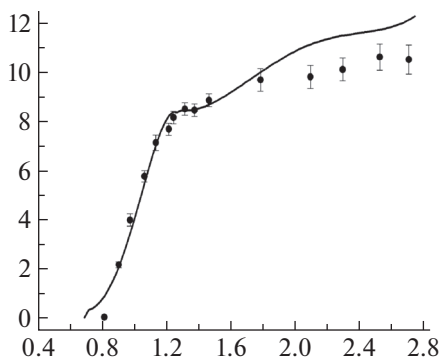


Рис. 3. Экспериментально измеренные (точки) и расчетные (кривая) полные неупругие сечения $\sigma_{\text{in}}(K^+p)$ (в ед. мбн) в зависимости от импульса K^+ -мезонов в ГэВ/с.

импульсов K^+ -мезонов 1.1–1.4 и 1.8–2.7 ГэВ/с, с хорошей ~ 5 и приемлемой $\sim (10-14)\%$ точностями,

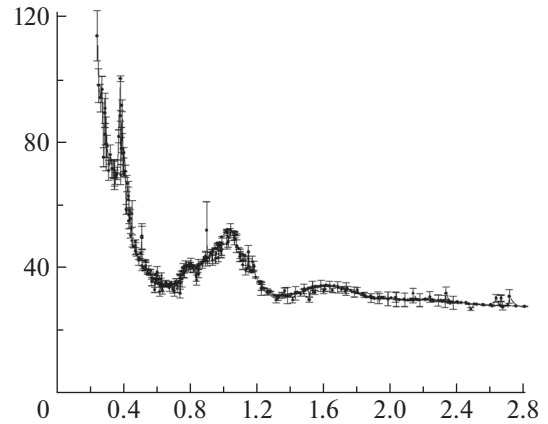


Рис. 4. Экспериментально измеренные (точки) и расчетные (кривая) полные сечения $\sigma_{\text{tot}}(K^-p)$ (в ед. мбн) в зависимости от импульса K^- -мезонов в ГэВ/с.

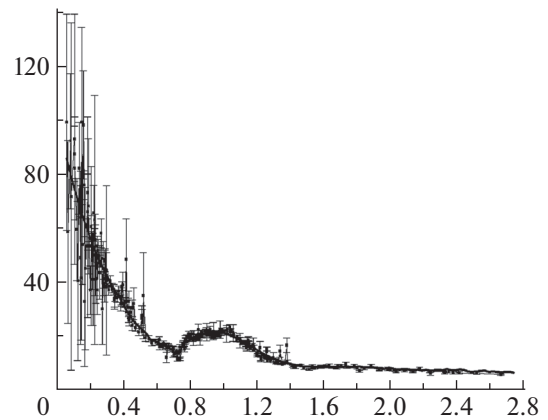


Рис. 5. Экспериментально измеренные (точки) и расчетные (кривая) упругие сечения $\sigma_{\text{el}}(K^-p)$ (в ед. мбн) в зависимости от импульса K^- -мезонов в ГэВ/с.

как это видно из рис. 3, согласуются с расчетом. Различия на уровне точности 10–14% при импульсах 1.8–2.7 ГэВ/с авторы [17] на основании их анализа связывают с возможной погрешностью цитируемых ими экспериментальных данных.

4. СЕЧЕНИЯ K^-p -РАССЕЯНИЯ

Экспериментально измеренные и расчетные полные $\sigma_{\text{tot}}(K^-p)$, упругие $\sigma_{\text{el}}(K^-p)$, упругой перезарядки $\sigma_{\text{ce}}(K^-p \rightarrow \bar{K}^0 n)$, неупругие $\sigma_{\text{in}}(K^-p)$ сечения показаны на рис. 4–7 в зависимости от импульса K^- -мезонов в ГэВ/с.

Расчетные и экспериментально измеренные сечения на рис. 4–6 приемлемо согласуются между собой. Расчет неупругих сечений, представленных на рис. 7, производился с помощью вычитания:

$$\sigma_{\text{in}}(K^-p) \approx \sigma_{\text{tot}}(K^-p) - \quad (8)$$

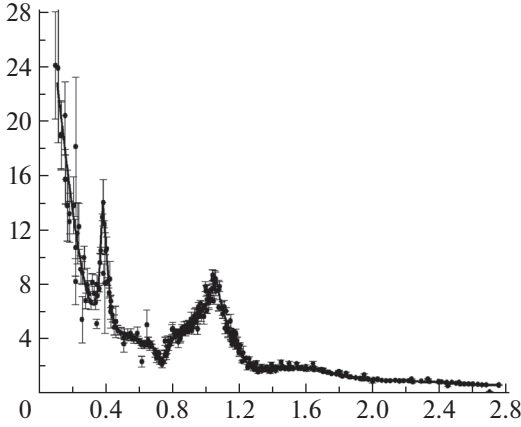


Рис. 6. Экспериментально измеренные (точки) и расчетные (кривая) сечения упругой перезарядки $\sigma_{\text{ce}}(K^-p \rightarrow \bar{K}^0n)$ (в ед. мбн) в зависимости от импульса K^- -мезонов в ГэВ/с.

$$- \sigma_{\text{el}}(K^-p) - \sigma_{\text{ce}}(K^-p \rightarrow \bar{K}^0n).$$

Количество имеющихся для интервала импульсов 0–2.75 ГэВ/с экспериментальных данных мало для надежного сравнения с расчетными сечениями (8), поведение которых в зависимости от импульса K^- -мезонов, как видно из рис. 7, является не очень простым. Тем не менее сравнение даже с мало представительной выборкой экспериментальных данных все-таки позволяет приближенно оценить степень качественного согласия расчета с экспериментом, которое, как это видно из рис. 7, в принципе, есть.

5. СЕЧЕНИЯ K^+n -РАССЕЯНИЯ

Экспериментально измеренные и расчетные полные $\sigma_{\text{tot}}(K^+n)$, упругие $\sigma_{\text{el}}(K^+n)$, упругой пе-

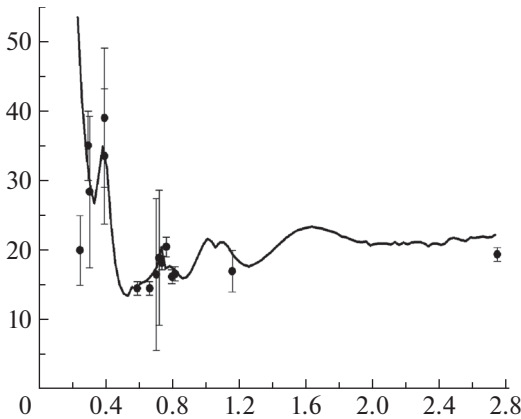


Рис. 7. Экспериментально измеренные (точки) и расчетные (кривая) полные неупругие сечения $\sigma_{\text{in}}(K^-p)$ (в ед. мбн) в зависимости от импульса K^- -мезонов в ГэВ/с.

резарядки $\sigma_{\text{ce}}(K^+n \rightarrow \bar{K}^0p)$, неупругие $\sigma_{\text{in}}(K^+n)$ сечения показаны на рис. 8–11.

Расчетные полные сечения $\sigma_{\text{tot}}(K^+n)$ для интервала импульсов K^+ -мезонов 0.35–2.75 ГэВ/с были получены вычитанием экспериментально измеренных сечений $\sigma_{\text{tot}}(K^+d)$ и $\sigma_{\text{tot}}(K^+p)$, связанных между собой уравнением

$$\sigma_{\text{tot}}(K^+n) \approx \sigma_{\text{tot}}(K^+d) - \sigma_{\text{tot}}(K^+p) + \left(\frac{1}{4\pi}\right) \sigma_{\text{tot}}(K^+p) \sigma_{\text{tot}}(K^+n) \langle r_d^{-2} \rangle, \quad (9)$$

где $\langle r_d^{-2} \rangle \approx 2.6 \times 10^{25} \text{ см}^{-2}$ — обратная величина среднеквадратичного радиуса дейтрона. Решение уравнения (9) для сечения $\sigma_{\text{tot}}(K^+n)$ с учетом глауберовской поправки на затенение нуклонов в дейтроне имеет вид

$$\sigma_{\text{tot}}(K^+n) \approx \frac{\sigma_{\text{tot}}(K^+d) - \sigma_{\text{tot}}(K^+p)}{1 - 0.0021 \cdot \sigma_{\text{tot}}(K^+p)}. \quad (10)$$

Сравнение расчетных сечений $\sigma_{\text{tot}}(K^+n)$ с имеющимися в [13] сечениями для импульсов в интервале 0.77–2.75 ГэВ/с показано на рис. 8.

Упругие сечения $\sigma_{\text{el}}(K^+n)$ для импульсов 0.64–1.51 и 2.97 ГэВ/с получены вычитанием сечений по формуле

$$\sigma_{\text{el}}(K^+n) \approx \sigma_{\text{qel}}(K^+d \rightarrow K^+pn) - \sigma_{\text{el}}(K^+p). \quad (11)$$

Для импульсов $p < 0.64$ ГэВ/с есть небольшое количество измеренных с достаточно большими ошибками экспериментальных данных [9]. Сравнение расчетных сечений $\sigma_{\text{el}}(K^+n)$ с сечениями, полученными на основе имеющихся в [13] и [9], для импульсов 0–1.5 и 2.97 ГэВ/с показано на рис. 9.

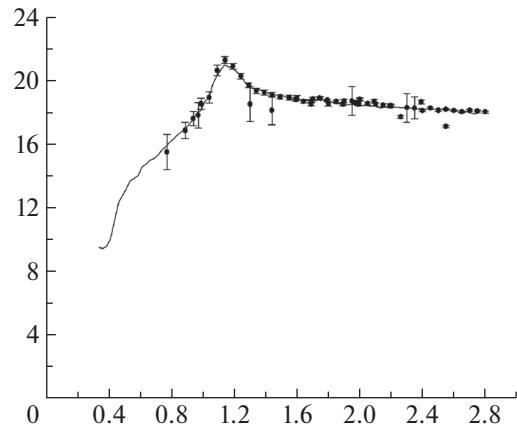


Рис. 8. Экспериментально измеренные (точки) и расчетные (кривая) полные сечения $\sigma_{\text{tot}}(K^+n)$ (в ед. мбн) в зависимости от импульса K^+ -мезонов в ГэВ/с.

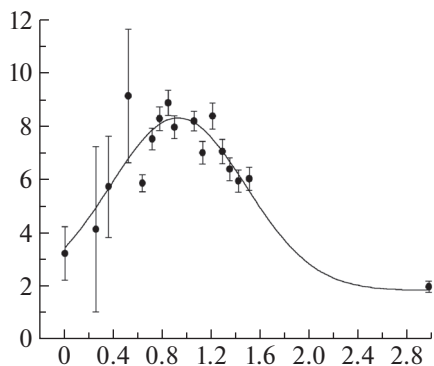


Рис. 9. Экспериментально измеренные (точки) и расчетные (кривая) упругие сечения $\sigma_{el}(K^+n)$ (в ед. мбн) в зависимости от импульса K^+ -мезонов в ГэВ/с.

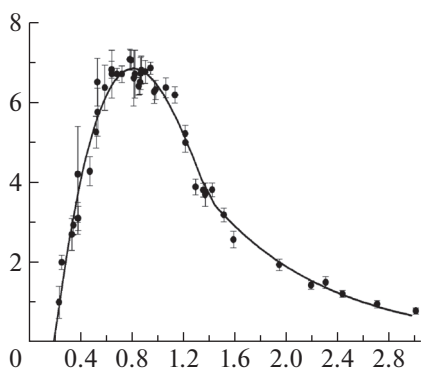


Рис. 10. Экспериментально измеренные (точки) и расчетные (кривая) сечения упругой перезарядки $\sigma_{ce}(K^+n \rightarrow \bar{K}^0p)$ (в ед. мбн) в зависимости от импульса K^+ -мезонов в ГэВ/с.

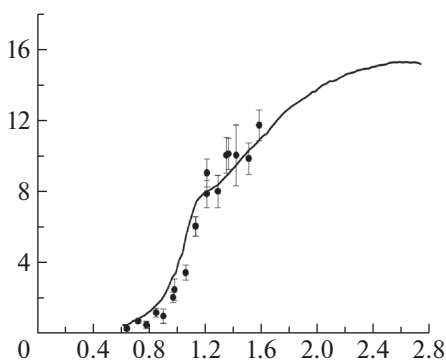


Рис. 11. Экспериментально измеренные (точки) и расчетные (кривая) неупругие сечения $\sigma_{in}(K^+n)$ (в ед. мбн) в зависимости от импульса K^+ -мезонов в ГэВ/с.

Расчетные величины сечений упругой перезарядки, для которых выполняется приближенное равенство

$$\sigma_{ce}(K^+n \rightarrow \bar{K}^0p) \approx \sigma_{ce}(K^+d \rightarrow \bar{K}^0pp), \quad (12)$$

и измеренные для импульсов 0.2–2.75 ГэВ/с сечения, как видно из рис. 10, достаточно хорошо согласуются между собой.

Неупругие сечения $\sigma_{in}(K^+n)$ получены вычитанием по формуле

$$\sigma_{in}(K^+n) \approx \sigma_{tot}(K^+n) - \sigma_{el}(K^+n) - \sigma_{ce}(K^+n \rightarrow \bar{K}^0p). \quad (13)$$

Их значения, как видно из рис. 11, приемлемо согласуются с достаточно надежно измеренными сечениями для импульсов K^+ -мезонов 0.64–1.6 ГэВ/с.

6. СЕЧЕНИЯ K^-n -РАСSEЯНИЯ

Расчетные значения $\sigma_{tot}(K^-n)$ получены вычитанием сечений $\sigma_{tot}(K^-d)$ и $\sigma_{tot}(K^-p)$, связанных между собой уравнением

$$\sigma_{tot}(K^-n) \approx \frac{\sigma_{tot}(K^-d) - \sigma_{tot}(K^-p)}{1 - 0.0021\sigma_{tot}(K^-p)}. \quad (14)$$

Сравнивая их с экспериментально измеренными сечениями $\sigma_{tot}(K^-n)$ на рис. 12, отметим, что для импульсов K^- -мезонов 0.6–2.45 ГэВ/с они приемлемо, на уровне 5–15%, согласуются между собой.

Экспериментально измеренные упругие сечения $\sigma_{el}(K^-n)$ имеются в [13] лишь для импульсов K^- -мезонов 0.62–1.18 и 3.0 ГэВ/с (рис. 13), чего недостаточно для расчета сечений $\sigma_{el}(K^-n)$ в интервалах 0.35–0.62 и 1.18–2.75 ГэВ/с. Для решения этой проблемы требовались приемлемые, на уровне точности 15–20%, оценки сечений $\sigma_{el}(K^-n)$ для импульсов 0.35–0.61 и 1.20–2.75 ГэВ/с. Нужные нам значения вспомогательных упругих сечений $\sigma_{el}(K^-d)$ получены в [18] в формализме Фаддеева–Попова в приближении неявных гиперонных каналов в том числе и для импульсов 0.06, 0.09 и 0.12 ГэВ/с, близких к первому из указанных выше интервалов, что позволило для них рассчитать сечения

$$\sigma_{el}(K^-n) \approx \sigma_{qel}(K^-d \rightarrow K^-pn) - \sigma_{el}(K^-p). \quad (15)$$

Величины этих импульсов меньше значения $p_{min} = 0.35$ ГэВ/с, но их включение в фит вместе с другими имеющимися в нашем распоряжении данными позволило сделать его более надежным. Другое важное для нас предсказание вида зависимости упругих дифференциальных сечений $d\sigma_{el}(0^\circ)/d\Omega$ от импульса K^- -мезонов в интервале 0.3–1.75 ГэВ/с при фиксированном угле $\theta_{LS} \approx 0^\circ$ (светлые точки на рис. 13) содержится в [19].

Для расчета с его помощью упругих сечений $\sigma_{el}(K^-n)$ кривая $d\sigma_{el}(0^\circ)/d\Omega$ была оцифрована

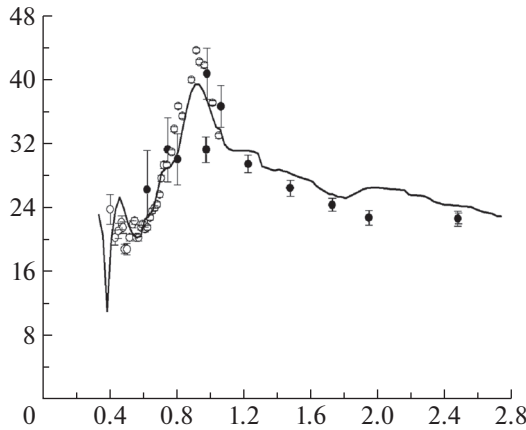


Рис. 12. Экспериментально измеренные (точки) и расчетные (кривая) полные сечения $\sigma_{\text{tot}}(K^-n)$ (в ед. мбн) в зависимости от импульса K^- -мезонов в ГэВ/с.

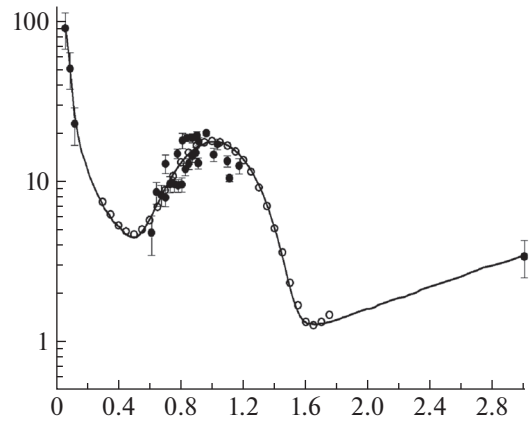


Рис. 13. Экспериментально измеренные (точки) и расчетные (кривая) упругие сечения $\sigma_{\text{el}}(K^-n)$ (в ед. мбн) в зависимости от импульса K^- -мезонов в ГэВ/с.

для 30 значений импульса в интервале 0.3–1.75 ГэВ/с. Сечения $d\sigma_{\text{el}}(0^\circ)/d\Omega$ и имеющиеся экспериментально измеренные для импульсов 0.61–1.17 ГэВ/с упругие сечения $\sigma_{\text{el}}^{\text{exp}}(K^-n)$ отличаются только размерными множителями:

$$R \approx \sigma_{\text{el}}^{\text{exp}}(K^-n)/[d\sigma_{\text{el}}(0^\circ)/d\Omega]. \quad (16)$$

Их среднее по этому интервалу импульсов значение $R \approx 1.25 \pm 0.28$ использовалось нами для расчета упругих сечений в интервале импульсов K^- -мезонов 0.3–1.75 ГэВ/с в соответствии с формулой

$$\sigma_{\text{el}}(K^-n) \approx (d\sigma_{\text{el}}(0^\circ)/d\Omega)R. \quad (17)$$

Значения же упругих расчетных сечений для полного интервала импульсов 0.35–2.75 ГэВ/с (кривая на рис. 13) были получены в результате фитирования всех сечений, имеющихся для импульсов 0.06–3.0 ГэВ/с, как измеренных экспериментально, так и полученных дополнительно расчетным путем.

Расчетные неупругие сечения (рис. 14) были получены вычитанием упругих сечений из полных:

$$\sigma_{\text{in}}(K^-n) \approx \sigma_{\text{tot}}(K^-n) - \sigma_{\text{el}}(K^-n). \quad (18)$$

Они с точностью 5–25% согласуются с имеющимися лишь для небольшого интервала импульсов 0.7–1.17 ГэВ/с экспериментальными данными. Поэтому представленное на рис. 14 сравнение оказывается не очень информативным.

7. УГЛОВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ СЕЧЕНИЙ УПРУГОГО $K^\pm N$ -РАССЕЯНИЯ

Обсуждаемая нами база данных содержит также и параметризации упругих дифференциальных сечений $d\sigma_{\text{el}}^{K^\pm N}(p, \cos \theta^*)/d\Omega^*$ в зависимости от $\cos \theta^*$ для ряда импульсов K^+ - и K^- -мезонов в

ЛСК, которые должны быть надежными и удобными для использования в программе моделирования. Символом * здесь, как и принято, обозначена система центра масс — СЦМ. При этом под надежностью параметризаций подразумевается приемлемое по точности на уровне 15–20% описание с их помощью наиболее важных черт упругих рассеяний, что обеспечивается использованием для них должного количества экспериментальных данных и их достоверным фитированием с помощью полиномов:

$$\frac{d\sigma_{\text{el}}^{K^\pm N}(p_j, \cos \theta^*)}{d\Omega^*} \approx \sum_{i=1}^{i_{\text{max}}(K^\pm N)} C_i^{K^\pm N}(p_j)(\cos \theta^*)^{i-1}. \quad (19)$$

При этом полученные в результате серии фитов для конкретных импульсов K^- -мезонов p_j оптимальные

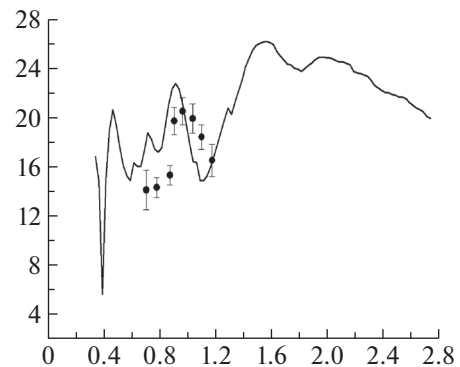


Рис. 14. Экспериментально измеренные (точки) и расчетные (кривая) полные неупругие сечения $\sigma_{\text{in}}(K^-n)$ (в ед. мбн) в зависимости от импульса K^- -мезонов в ГэВ/с.

Таблица 1. Неупругие реакции $K^+ + N \rightarrow K^+ + X$

Реакция	Порог, ГэВ/с	$\sigma(p_{\max})$, мбн	$\sigma(2.75)$, мбн
$K^+p \rightarrow K^+p\pi^+\pi^0\pi^-$	1.110	1.33 (6.80)	0.45
$K^+p \rightarrow K^+p\pi^+\pi^-$	0.822	2.50 (2.65)	2.27
$K^+p \rightarrow K^{*0}(890)p\pi^+ \rightarrow K^+\pi^-p\pi^+$	1.393	0.72 (3.50)	0.47
$K^+p \rightarrow K^+p\pi^0$	0.503	2.00 (1.36)	1.20
$K^+p \rightarrow K^{*+}(890)p \rightarrow K^+\pi^0p$	1.074	1.95 (1.55)	1.25
$K^+p \rightarrow K^+n\pi^+$	0.519	1.50 (1.96)	0.95
$K^+p \rightarrow K^{*0}(890)\Delta^{*++}(1236) \rightarrow K^+\pi^-p\pi^+$	1.757	2.37 (3.00)	1.40
$K^+p \rightarrow K^+\Delta^{*+}(1236) \rightarrow K^+p\pi^0$	0.860	1.14 (1.30)	0.26
$K^+p \rightarrow K^+\Delta^{*+}(1236) \rightarrow K^+n\pi^+$	0.860	0.97 (1.21)	0.24
$K^+n \rightarrow K^+p\pi^-$	0.511	4.28 (1.59)	2.45
$K^+n \rightarrow K^{*0}(890)p \rightarrow K^+\pi^-p$	1.083	3.63 (1.40)	1.70
$K^+n \rightarrow K^{*+}(890)n \rightarrow K^+\pi^0n$	1.075	0.62 (3.00)	0.61

Таблица 2. Неупругие реакции $K^- + N \rightarrow K^- + X$

Реакция	Порог, ГэВ/с	$\sigma(p_{\max})$, мбн	$\sigma(2.8)$, мбн
$K^-p \rightarrow K^-p\pi^+\pi^0\pi^-$	1.110	1.05 (10.5)	0.38
$K^-p \rightarrow K^-p\pi^+\pi^-$	0.822	1.36 (3.50)	1.06
$K^-p \rightarrow K^-p\pi^0$	0.503	1.85 (1.67)	1.20
$K^-p \rightarrow K^{*-}(890)p \rightarrow K^-\pi^0p$	1.074	2.55 (1.80)	1.46
$K^-p \rightarrow K^-n\pi^+$	0.519	2.64 (1.85)	1.80
$K^-p \rightarrow K^-n\pi^+\pi^+\pi^-$	1.125	0.45 (10.0)	0.16
$K^-p \rightarrow K^{*0}(890)n \rightarrow K^-\pi^+n$	1.091	3.21 (1.61)	1.15
$K^-p \rightarrow K^-\Delta^{*+}(1236) \rightarrow K^-p\pi^0$	0.860	0.52 (1.60)	0.53
$K^-p \rightarrow K^-\Delta^{*+}(1236) \rightarrow K^-n\pi^+$	0.860	1.03 (2.00)	0.86
$K^-n \rightarrow K^-p\pi^-$	0.511	2.01 (1.65)	1.06

степени полиномов $i_{\max}(K^\pm N)$ имеют значения в интервале чисел 2–6.

В случаях, когда в литературе отсутствовали экспериментально измеренные упругие сечения $d\sigma_{\text{el}}^{K^+n}/d\Omega^*$ или $d\sigma_{\text{el}}^{K^-n}/d\Omega^*$, но имелись подходящие по значениям импульсов p_j упругие дифференциальные сечения K^+d^- , K^+p^- или K^-d^- , K^-p^- рассеяний, то необходимые сечения рассчитывались с помощью вычитания:

$$d\sigma_{\text{el}}^{K^\pm n}(p_j, \cos \theta^*)/d\Omega^* \approx \quad (20)$$

$$\approx d\sigma_{\text{el}}^{K^\pm d}(p_j, \cos \theta^*)/d\Omega^* - d\sigma_{\text{el}}^{K^\pm p}(p_j, \cos \theta^*)/d\Omega^*.$$

Числовые значения параметров (19) были найдены

для ряда импульсов K^+ -мезонов в интервалах 0.2–1.95 ГэВ/с [12] и для K^- -мезонов в интервалах 0.44–0.8 [20], 0.61–0.94 [21], 0.78–1.23 [22, 23], 0.64–0.94 [24] и 0.62–1.18 ГэВ/с [25]. Это позволило использовать параметризации (19) для статистического розыгрыша $\cos \theta^*$ упругих рассеяний K^- -мезонов на нуклонах в ядре.

8. СЕЧЕНИЯ НЕУПРУГИХ $K^\pm N$ -РЕАКЦИЙ

Каждое из неупругих сечений $\sigma_{\text{in}}(K^+p)$, $\sigma_{\text{in}}(K^+n)$, $\sigma_{\text{in}}(K^-p)$ и $\sigma_{\text{in}}(K^-n)$ является суммой

сечений ряда конкретных неупругих реакций:

$$\sigma_{\text{in}}^{K^{\pm}N}(p) \approx \sum_{l=1}^{l_{\text{max}}(K^{\pm}N)} \sigma_{\text{in},l}^{K^{\pm}N}(p), \quad (21)$$

где $l_{\text{max}}(K^{\pm}N)$ — число неупругих реакций для $K^{\pm}N$ -рассеяний. Для рабочего интервала импульсов 0.35–2.75 ГэВ/с предварительно были рассмотрены более 40 неупругих реакций, но в конечном итоге в программе учитывались 22 реакции, сечения которых имеют значимую величину.

В табл. 1 и 2 приводится список неупругих реакций, которые учитывались в программе моделирования. В качестве дополнительной информации в них также приводятся пороги реакций по импульсу K -мезонов (в ГэВ/с), их максимальные сечения $\sigma(p_{\text{max}})$ (в ед. мбн) и соответствующие им импульсы p_{max} (в ГэВ/с), а также величины сечений (в ед. мбн) для импульсов 2.75 и 2.8 ГэВ/с.

Для параметризации сечений этих неупругих реакций в зависимости от импульса K -мезонов также использовались полиномы, после чего они были представлены в табулированном виде.

Неупругие реакции, в конечном состоянии которых наряду с протонами, нейтронами и π -мезонами имеется хотя бы один K -мезон с тем же знаком заряда, что и инициирующий ее каон, дают в рабочем интервале импульсов наиболее существенный вклад в интересующий нас процесс. Углы неупругого рассеяния K -мезонов для них разыгрываются на основе кинематики неупругих инклюзивных реакций [26]. Порог неупругой реакции, в которой рождается второй K -мезон, увеличиваются на большую величину $\Delta p_{\text{thresh}} \approx 1.3$ ГэВ/с. Иницировать такие реакции могут только кумулятивные каоны, рождающиеся в ядре с очень большими импульсами, которым соответствуют очень большие значения переменной x_S и очень малые сечения рождения. Поэтому вклад таких реакций в интересующий нас процесс на многие порядки величины меньше вклада реакций, в конечном состоянии которых имеется только один K -мезон.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После количественного и качественного анализа имеющихся в литературе для импульсов K -мезонов в интервале 0.35–2.75 ГэВ/с полных упругих и неупругих сечений $K^{\pm}N$ -рассеяний они были скомпилированы, параметризованы, отфитированы и на основе полученных фитов табулированы с шагом по импульсу 0.025 ГэВ/с для 110 значений импульса. При этом также были скомпилированы, параметризованы и отфитированы имеющиеся в том же интервале импульсов упругие дифференциальные сечения K^+N - и K^-N -рассеяний.

В результате выполненной работы для моделирования процессов вторичных взаимодействий K^+ - и K^- -мезонов в атомных ядрах была создана компактная и удобная в применении база данных. С учетом того, что изначально не было ясно, насколько это возможно для K^-N -рассеяния, решение данной задачи даже в первом приближении представляется определенным успехом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. Ф. Переседов, ЯФ **77**, 798 (2014) [Phys. Atom. Nucl. **77**, 755 (2014)].
2. A. V. Efremov, in *Proceedings of the 13th International Seminar on Relativistic Nuclear Physics and QCD, Dubna, Sept. 2–7, 1996*; hep-ph/9710411v1.
3. В. С. Ставинский, Сообщение ОИЯИ, № P2-80-767 (Дубна, 1980).
4. A. M. Baldin, V. K. Bondarev, N. Ghiordanescu, A. N. Khrenov, A. G. Litvinenko, F. N. Manyatovsky, N. S. Moroz, Yu. A. Panebratsev, M. Pentia, S. V. Rikhhvitskyet, and V. S. Stavinsky, JINR Communications, No. E1-82-472 (Dubna, 1982).
5. С. В. Бояринов, С. А. Герзон, Ю. Т. Киселев, Г. А. Лексин, А. Н. Мартемьянов, В. Л. Новиков, С. В. Семенов, Ю. В. Терехов, В. А. Шейнкман, Препринт № 5, ИТЭФ (Москва, 1987); ЯФ **46**, 1472 (1987) [Sov. J. Nucl. Phys. **46**, 871 (1987)].
6. С. В. Бояринов, И. И. Евсеев, Ю. Т. Киселев, Г. А. Лексин, А. Н. Мартемьянов, К. Р. Михайлов, С. А. Поздняков, Ю. В. Терехов, В. И. Ушаков, В. А. Шейнкман, ЯФ **57**, 1452 (1994) [Phys. Atom. Nucl. **57**, 1379 (1994)].
7. Yu. T. Kiselev, V. A. Sheinkman, A. V. Akindinov, M. M. Chumakov, A. N. Martemyanov, V. A. Smirnitsky, Yu. V. Terekhov, and E. Ya. Pariev, arXiv: 1204.2669v2.
8. О. П. Гавришук, В. Ф. Переседов, Л. С. Золин, Краткие сообщения ОИЯИ, № 4 [55]-92 (Дубна, 1992).
9. В. С. Барашенков, В. М. Мальцев, *Сечения взаимодействия элементарных частиц*, ОИЯИ ЛТФ P-724 (Дубна, 1961), с. 108.
10. G. Giacomelli, CERN-HERA-69-3 (CERN Libraries, Geneva, 02.12.1969, CM-P00048042).
11. E. Bracci, J. P. Droulez, E. Flaminio, J. D. Hansen, and D. R. O. Morrison, CERN/HERA 72-2 (CERN Libraries, Geneva, 6.10.1972, CM-P00048054).
12. U. Casadei, G. Giacomelli, P. Lugaesi-Serra, G. Mandrioli, A. M. Rossi, and F. Viaggi, CERN/HERA 75-1 (CERN Libraries, Geneva, 05.03.1975, CM-P00048051).
13. V. Flaminio, W. G. Moorhead, D. R. O. Morrison, and N. Rivoire, CERN-HERA 83-02 (CERN Libraries, Geneva, 13.12.1983, CM-P00048063).
14. С. В. Dower and G. E. Walker, Phys. Rept. **89**, 1 (1982).

15. <http://pdg.lbl.gov>; <http://pdg.web.cern.ch/pdg>;
<http://pdg.ge.infn.it>; <http://pdg.ihep.su>;
<http://wwwold.inp.nsk.su/pdg/>;
<http://ccwww.kek.jp/pdg>;
<http://hepdata.cedar.ac.uk/lbl>;
<http://durpdg.dur.ac.uk/HEPDATA>
16. V. S. Kurbatov and I. N. Silin, Nucl. Instrum. Methods A **345**, 346 (1994).
17. R. A. Arndt and L. D. Roper, Phys. Rev. D **31**, 2230 (1985).
18. L. H. Schick and B. F. Gibson, Z. Phys. A **288**, 307 (1978).
19. T. Koike and T. Harada, Nucl. Phys. A **804**, 231 (2008).
20. R. Armenteros, P. Baillon, C. Bricman, M. Ferro-Luzzi, E. Pagiola, J. O. Petersen, D. E. Plane, N. Schmitz, E. Burkhardt, H. Filthuth, E. Kluge, H. Oberlack, R. R. Ross, R. Barloutaud, P. Granet, J. Meyer, *et al.*, Nucl. Phys. B **21**, 15 (1970).
21. C. J. Adams, J. D. Davies, J. D. Dowell, G. H. Grayer, P. M. Hattersley, R. J. Homer, R. J. Howells, C. McLeod, T. J. McMahon, H. B. Van der Raay, L. Rob, C. J. S. Damerell, and M. J. Hotchkiss, Nucl. Phys. B **96**, 54 (1975).
22. B. Conforto, D. M. Harsmen, T. Lasinski, R. Levi-Setti, M. Raymund, E. Burkhardt, H. Filthuth, S. Klein, H. Oberlack, and H. Schleich, Nucl. Phys. B **34**, 41 (1971).
23. R. Armenteros, M. Ferro-Luzzi, D. W. G. S. Leith, R. Levi-Setti, A. Minten, R. D. Tripp, H. Filthuth, V. Hepp, E. Kluge, H. Schneider, R. Barloutaud, P. Granet, J. Meyer, and J.-P. Porte, Nucl. Phys. B **8**, 233 (1968).
24. K. R. Bentley, C. J. S. Damerell, J. D. Davies, J. D. Dowell, R. J. Homer, M. J. Hotchkiss, C. McLeod, T. J. McMahon, H. B. Van Der Raay, T. Rhoades, and F. Wickens, Nucl. Phys. B **129**, 387 (1977).
25. R. Armenteros, P. Baillon, P. Lexa, A. Minten, K. H. Nguen, E. Pagiola, V. Pelosi, R. Barloutaud, F. Bigata, M. Crozon, C. Louedec, J. L. Narjoux, and F. Pierre, Nucl. Phys. B **18**, 425 (1970).
26. В. И. Гольданский, Ю. П. Никитин, И. Л. Розенталь, *Кинематические методы в физике высоких энергий* (Наука, Москва, 1987).

THE CROSS SECTION FOR $K^\pm N$ SCATTERINGS FOR THE SIMULATION OF CUMULATIVE KAON INTERACTIONS IN NUCLEI

V. F. Peresedov

Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

For quantitative estimates of the influence of secondary interactions of cumulative K^+ - and K^- - mesons on the values of their outputs from different atomic nuclei in pA interactions at proton energies of 9–10 and 15–70 GeV the verified cross-sections of kaon–nucleon scattering are needed. The preparation of these cross sections for the simulation program is a priority work that was performed for the momentum interval of K mesons equal to 0.35–2.75 GeV/ c .