

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



СЗ46.46
Л-99

14/VI-76
P1 - 9591

2224/2-76

В.И.Ляшенко, Д.Б.Понтекорво, И.В.Фаломкин, Ю.А.Щербаков, М.Альбу, Т.Анжелеску, О.Балеа, А.Михул, Ф.Никитиу, А.Сэрару, Ф.Балестра, Р.Гарфаньини, Г.Пираджино, К.Гуаральдо, Р.Скримальо

СЕЧЕНИЕ ДВОЙНОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ

$\pi^+ + {}^4\text{He} \rightarrow \pi^- + 4p$ ПРИ ЭНЕРГИЯХ

ПИОНОВ 98, 135, 145 И 156 МЭВ

1976

В.И.Ляшенко, Д.Б.Понтекорво, И.В.Фаломкин,
Ю.А.Щербаков М.Альбу,¹ Т.Анжелеску,¹ О.Балеа,¹
А.Михул,¹ Ф.Никитиу,¹ А.Сэрару,¹ Ф.Балестра,²
Р.Гарфаньини,² Г.Пираджино,²
К.Гуаральдо,³ Р.Скримальо³

СЕЧЕНИЕ ДВОЙНОЙ ПЕРЕЗАРЯДКИ

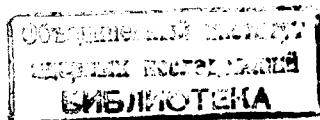
$\pi^+ + {}^4\text{He} \rightarrow \pi^- + 4p$ ПРИ ЭНЕРГИЯХ

ПИОНОВ 98, 135, 145 И 156 МЭВ

¹ Институт атомной физики, Бухарест.

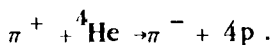
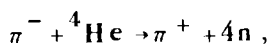
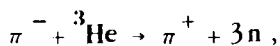
² Институт физики Туринского университета, Турин.
Национальный институт ядерной физики, Туринская
секция, Италия.

³ Национальные лаборатории во Фраскати, Италия.



Введение

Существование процесса двойной перезарядки пионов на ядрах было впервые доказано экспериментально в 1963 году в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ^{/1/}. Исследование такого процесса позволяет получить новую информацию о взаимодействии пионов с ядрами и нуклонами в сложных ядрах^{/2/}. Экспериментальных данных о двойной перезарядке имеется не так много, особенно это замечание относится к легким ядрам^{/3-6/}. При исследованиях двойной перезарядки на ядрах гелия-3 и гелия-4 большой интерес представляет также возможность изучения нуклонных систем из трех или четырех одинаковых нуклонов и поисков связанных состояний этих нуклонов, в реакциях:



Ранее нами было измерено полное сечение двойной перезарядки положительных пионов с энергией 100 МэВ на ядрах гелия-4^{/7/}, настоящая работа является продолжением ранее начатых исследований.

Ядро гелия-4 является самым легким из ядер, на которых возможен процесс двойной перезарядки положительных пионов. Таким образом, при исследованиях на этом ядре мы изучаем процесс в самом "элементарном" виде. С этой точки зрения изучение двойной перезарядки π^{+} -мезонов на ядре гелия-4 занимает особое положение.

Интересно отметить, что в результате этой реакции получается пять заряженных частиц. Этот факт существенно увеличивает достоверность идентификации события, особенно при использовании камерной методики.

Аппаратура и постановка эксперимента

В наших исследованиях мы использовали гелиевую стримерную камеру высокого давления ^{8,9}, которая служила одновременно и мишенью и детектором. Пучок пионов вводился в камеру, запуск которой производился в случае попадания вторичного пиона в один из окружающих ее сцинтилляционных счетчиков годоскопа ^{10,11}. Полученные фотографии просматривались, и среди большого числа упругих и неупругих взаимодействий пионов с ядрами гелия обнаруживались характерные пятилучевые звезды, которые могли являться случаями двойной перезарядки. Частицы с различной ионизацией оставляют следы разной плотности /если эти следы лежат в плоскости, близкой к горизонтальной/ и, таким образом, хорошо различаются сильно и слабо ионизирующие частицы. Камера имела стенки достаточной толщины для того, чтобы протоны от исследуемой реакции практически не достигали запускаящего камеру годоскопа. Следы частиц, попадающих в годоскоп, лежат в плоскостях, близких к горизонтальной, поэтому в этом случае мы можем по ионизации отличить след пиона от следа протона. Во всех обнаруженных пятилучевых звездах, идентифицированных в дальнейшем как события двойной перезарядки, след пиона был направлен в один из счетчиков годоскопа, т.е. запуск камеры был обусловлен вторичным пионом. На *рис. 1* показана фотография пятилучевой звезды /случай двойной перезарядки/ в двух проекциях.

Экспозиции камеры, наполненной гелием-4, были проведены в пучках положительных пионов с энергией 98, 135, 145 и 156 МэВ. При этих же энергиях /за исключением 135 МэВ/ камера экспонировалась с наполнением гелием-3 с целью измерения различных фоновых процессов /на ядрах гелия-3 двойная перезарядка положительных пионов не идет/. Средние значения энергий были измерены

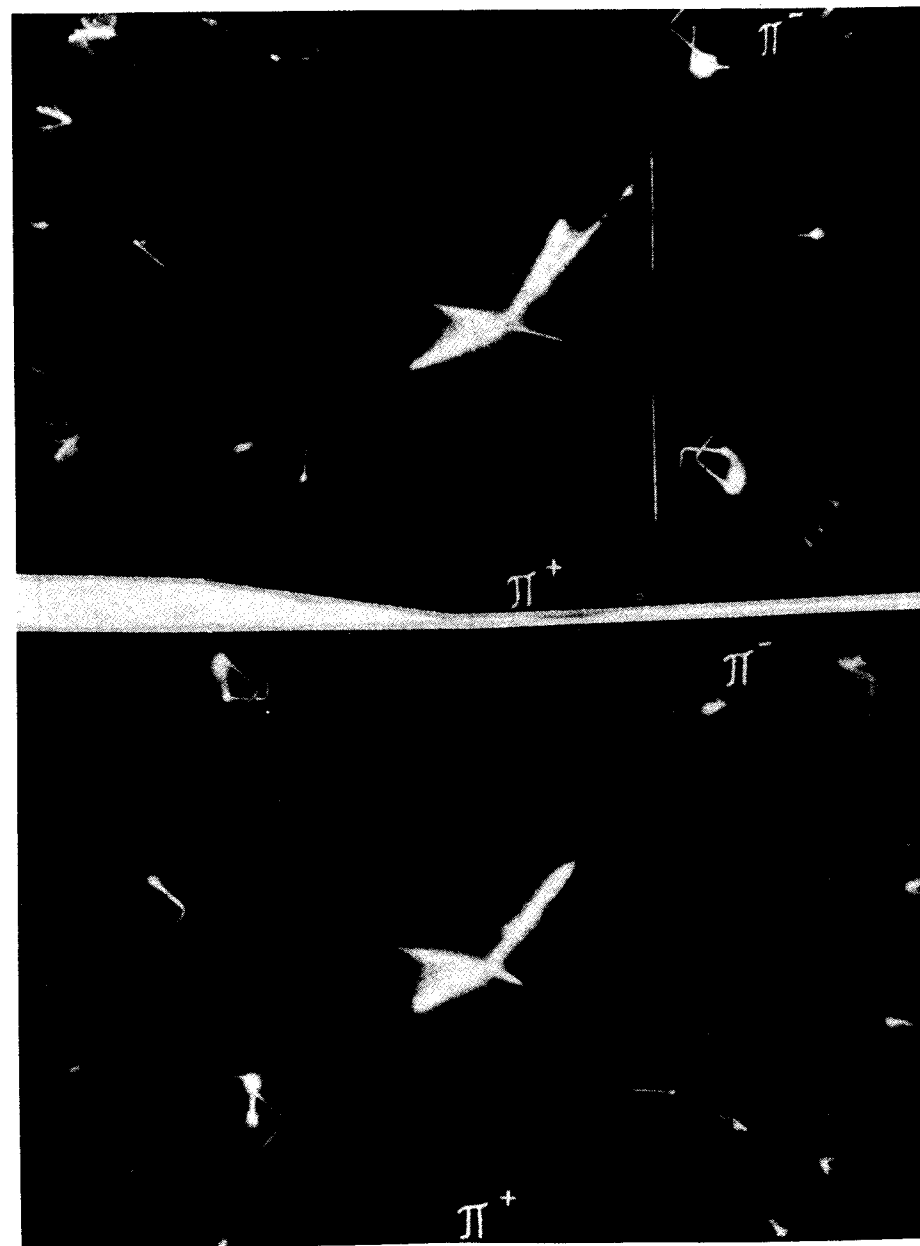


Рис. 1. Фотография событий двойной перезарядки положительно заряженного пиона на ядре гелия-4 /в двух проекциях/.

E_x	N	θ_L	θ_P	N	θ_L	θ_P
156	1	36 ± 2	67 ± 2	3	128 ± 2	61 ± 2
			27 ± 2			50 ± 5
			102 ± 2			54 ± 2
			132 ± 2			105 ± 2
	2	118 ± 2	66 ± 3			
			70 ± 5			
			47 ± 2			
			112 ± 4			

Таблица 2

Число событий и сечения двойной перезарядки при различных энергиях; E_x - кинетическая энергия первичных пионов (МэВ); n_1 - число обнаруженных пятилучевых звезд; n_2 - число пятилучевых звезд после вычитания фона по результатам экспозиции с гелием-3; n - число случаев двойной перезарядки (по результатам кинематического анализа); σ - сечение двойной перезарядки (мбн).

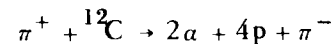
E_x	n_1	n_2	n	σ
40/13/				$< 0,002$
98	17	10	9	$0,30 \pm 0,10$
135	12		7	$0,29 \pm 0,11$
145	6	5	4	$0,34 \pm 0,17$
156	9	7	3	$0,13 \pm 0,07$
475/3/				$1,20 \pm 0,21$

рассматривались с помощью стереолупы. В таблице приводятся также сечения, указанные в работах ^{/3,13/}.

Сравним наши данные с результатами по двойной перезарядке пионов, полученными на углероде ^{/14/}. В районе энергии пионов 138 МэВ величина сечения оказалась равной

$$\sigma(C) = 1,24 \pm 0,38 \text{ мбн.}$$

При этом было установлено, что сечение процесса



составляет 62% от полного сечения двойной перезарядки, т.е. составляет $\sim 0,8$ мбн. Мы видим, что наиболее важным в двойной перезарядке на углероде является этот канал, так что можно предположить, что перезарядка происходит в основном на α -кластерах ядра углерода. Сечение перезарядки на каждом из α -кластеров ядра углерода составляет в каждом случае /исходя из экспериментального значения $0,8$ мбн для канала $\pi^+ + {}^{12}\text{C} \rightarrow 2\alpha + 4p + \pi^-$, грубо говоря, $0,2-0,3$ мбн. Эти оценки хорошо согласуются со значениями сечений, измеренных нами на ядрах гелия.

На рис. 2 показаны значения экспериментально измеренных сечений двойной перезарядки положительных пионов на ядрах гелия-4 при различных энергиях по всем имеющимся данным. На том же рисунке приводится расчетная кривая ^{/2,13/} /коридор ошибок заштрихован/ для реакции $\pi^- + {}^4\text{He} \rightarrow \pi^+ + 4n$. Сечение этой реакции не должно в принципе заметно отличаться от сечения нашей реакции $\pi^+ + {}^4\text{He} \rightarrow \pi^- + 4p$. Расчеты были проделаны с использованием модели парных корреляций. На рис. 3 показаны измеренные угловые дифференциальные сечения нашей реакции, усредненные для всего интервала энергий пионов $98 \div 156$ МэВ. Там же нанесена расчетная кривая ^{/131/} /модель парных корреляций/ при энергии 140 МэВ, причем значения по оси ординат уменьшены в 10 раз. Таким образом, расчетные значения примерно в 10 раз превышают экспериментально измеренные. Форма кривой, можно

Таблица I

Результаты измерений событий двойной перезарядки; E_x - кинетическая энергия первичных пионов (МэВ); \mathcal{N} - номер события; θ_x и θ_p - углы (в градусах) вылета вторичного пиона и каждого из четырех протонов, соответственно (по отношению к направлению движения первичного пиона).

E_x	\mathcal{N}	θ_x	θ_p	\mathcal{N}	θ_x	θ_p
98	1	29 \pm 2	102 \pm 2	6	141 \pm 2	32 \pm 2
			22 \pm 2			41 \pm 2
			92 \pm 2			66 \pm 3
			95 \pm 2			245 \pm 3
2	63 \pm 2	76 \pm 2	143 \pm 2	7	102 \pm 2	27 \pm 4
			32 \pm 2			32 \pm 2
			100 \pm 5			60 \pm 4
			161 \pm 2			60 \pm 4
3	85 \pm 2	69 \pm 2	148 \pm 2	8	85 \pm 5	29 \pm 3
			52 \pm 5			78 \pm 4
			60 \pm 3			107 \pm 2
			87 \pm 2			95 \pm 3
4	106 \pm 2	131 \pm 2	164 \pm 3	9	95 \pm 3	10 \pm 2
			52 \pm 3			89 \pm 3
			22 \pm 3			95 \pm 4
			76 \pm 2			114 \pm 2
5	113 \pm 4	114 \pm 2	106 \pm 2	114 \pm 2	106 \pm 2	24 \pm 2
			24 \pm 2		33 \pm 2	
			33 \pm 2			

E_x	\mathcal{N}	θ_x	θ_p	\mathcal{N}	θ_x	θ_p
135	1	39 \pm 2	84 \pm 3	5	131 \pm 2	133 \pm 4
			13 \pm 3			27 \pm 2
			90 \pm 5			42 \pm 2
			110 \pm 2			74 \pm 2
2	43 \pm 2	101 \pm 3	101 \pm 3	6	144 \pm 2	45 \pm 3
			48 \pm 3			18 \pm 4
			81 \pm 3			89 \pm 4
			110 \pm 5			
135	3	103 \pm 3	70 \pm 4	7	163 \pm 2	142 \pm 3
			56 \pm 4			100 \pm 4
			55 \pm 4			20 \pm 5
			141 \pm 2			72 \pm 5
4	110 \pm 2	111 \pm 3	74 \pm 4	111 \pm 3	74 \pm 4	35 \pm 5
			35 \pm 5			92 \pm 3
			92 \pm 3			
145	1	31 \pm 2	154 \pm 5	3	87 \pm 3	61 \pm 5
			6 \pm 3			33 \pm 4
			33 \pm 3			80 \pm 2
			44 \pm 3			113 \pm 4
2	60 \pm 2	41 \pm 2	41 \pm 2	4	127 \pm 5	62 \pm 2
			50 \pm 2			47 \pm 2
			100 \pm 5			57 \pm 5
			136 \pm 4			99 \pm 4

с точностью 1-2 МэВ, разброс частиц пучка по энергиям составлял 5%. Эти измерения были выполнены с помощью стримерной камеры в магнитном поле. Частицы пучка проходили через эту камеру, их следы фотографировались, а затем измерялись радиусы кривизны следов и определялись импульсы и энергии этих частиц. Всего через камеру-мишень было пропущено $1,9 \cdot 10^8$ пионов и получено 270 000 фотографий. Один случай упругого рассеяния приходился, грубо говоря, на 100 фотографий, а случай двойной перезарядки - на 10^4 фотографий.

Измерения и критерии отбора

Пятилучевые звезды измерялись на репроекторе, который позволяет измерять длины видимых пробегов частиц и углы между следами всех частиц в пространстве. Для отбора событий двойной перезарядки использовались кинематические критерии и учитывались результаты фоновых измерений на ядрах гелия-3. Критерии отбора и возможные фоновые процессы рассмотрены и подробно описаны в нашей предыдущей работе^{/7/}. Результаты, полученные на основе индивидуального отбора событий по кинематическим критериям, при всех энергиях согласуются с результатами, полученными путем вычитания из полного числа пятилучевых звезд фона, измеренного при работе с гелием-3. Это важно, поскольку кинематические критерии не выделяют однозначно событий двойной перезарядки /в отсутствие магнитного поля для этой цели недостаточно измерения угловых корреляций и видимых пробегов/. Применение кинематического теста к пяти фоновым событиям на гелии-3 позволило отбросить четыре из них.

Изучение двойной перезарядки проводилось одновременно с измерением дифференциальных сечений упругого рассеяния пионов на ядрах гелия^{/12/}. Экспериментальная установка позволяла получить все необходимые для вычисления полных сечений двойной перезарядки величины, а именно: число пионов, прошедших через камеру, и число событий двойной перезарядки при определенной геометрической эффективности управляющего годоскопа /число

ядер гелия в эффективном объеме камеры легко вычисляется/. Камеру окружал кольцевой годоскоп из сцинтилляционных счетчиков, при этом геометрическая эффективность такова, что телесный угол, в пределах которого происходит запуск годоскопа от вторичного пиона, почти не зависит от угла рассеяния пиона Θ_π в интервале $30^\circ \leq \Theta_\pi \leq 150^\circ$.

Камера с гелием-3 и гелием-4 содержала одинаковое количество примеси углеводородов, добавляемых для улучшения работы камеры /0,2% по объему α -пинена - $C_{10}H_{16}$ /. Оценки фона^{/7/}, сделанные на основе измеренных сечений различных процессов в исследуемой нами области энергий, показали, что фоновые процессы /пятилучевые звезды, имитирующие двойную перезарядку/ идут с точностью до 30 мкбн одинаково на гелии-3 и на гелии-4.

Результаты

В табл. 1 приведены результаты измерений при различных энергиях пятилучевых звезд, идентифицированных по кинематическим критериям как события двойной перезарядки. Измерения при 98 МэВ были выполнены нами ранее, сейчас уточнено значение энергии пионов /98 МэВ вместо 100 МэВ, указанных в предыдущей работе^{/7/} /. В таблице приводятся измеренные углы вылета пиона и четырех протонов / Θ_π и Θ_p , соответственно/.

В табл. 2 приведены вычисленные значения сечений наряду с числом пятилучевых звезд и числом отобранных событий, которое было найдено как по кинематическим критериям /это число использовано для вычисления сечения/, так и методом вычитания фона по экспериментам с камерой, наполненной гелием-3. Приводится также полное число первоначально найденных пятилучевых звезд. Сечения даны с формальными статистическими ошибками. Следует отметить, что эффективность нахождения пятилучевых звезд была выше 99%, при этом при двукратном просмотре регистрировались все звезды с числом лучей больше трех, и все эти события затем дополнительно

сказать, соответствует экспериментальным измерениям, хотя статистика очень мала.

Обсуждение

Из рис. 2 видно, что наблюдается большая разница между экспериментальными и расчетными сечениями.

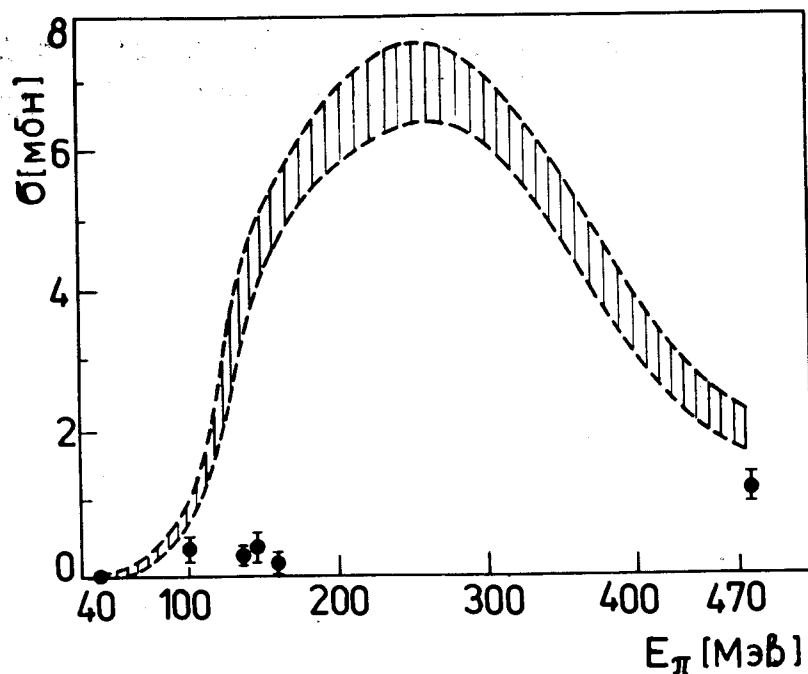


Рис. 2. Зависимость сечения двойной перезарядки положительно заряженных пионов на ядрах гелия-4 от кинетической энергии пионов /в лабораторной системе координат/ - экспериментальные точки и расчетная кривая ^{2/}. Первая и последняя экспериментальные точки взяты из работ ^{13,3/} /при энергиях 40 и 485 МэВ/.

Следует отметить, что в этих расчетах по модели парных корреляций не учитывался эффект поглощения и вычисления выполнялись в импульсном приближении. На расчетной кривой видно наличие характерного максимума при энергиях

~250 МэВ, свойственного процессам с проявлением эффектов первого барионного резонанса Λ_{33} . Полученные экспериментальные данные не позволяют заключить, что в этой области энергий имеет место какое-либо резонансное поведение сечений.

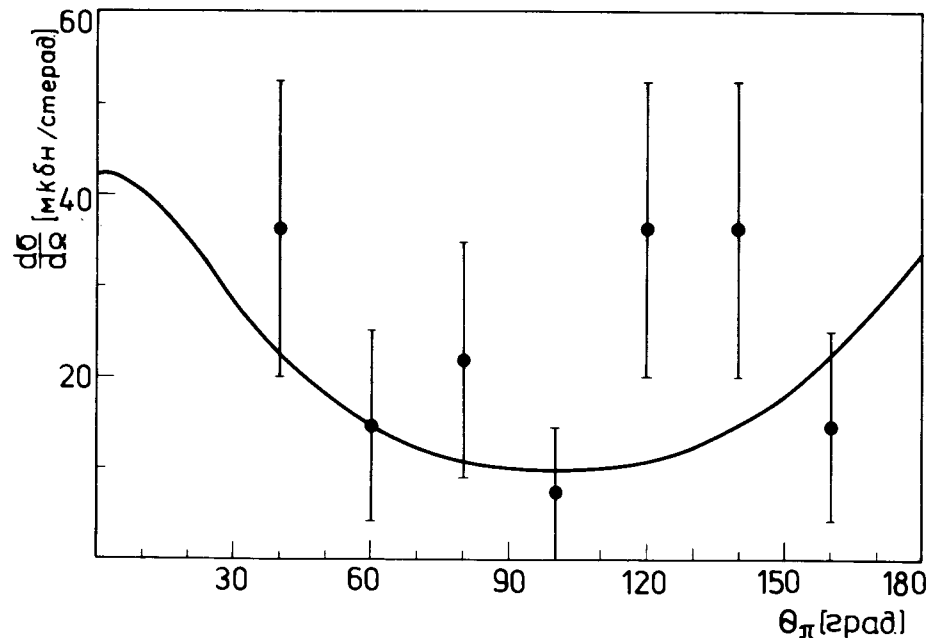


Рис. 3. Дифференциальные сечения реакции двойной перезарядки $\pi^+ + {}^4\text{He} \rightarrow \pi^- + 4p$ при энергиях пионов 98 и 156 МэВ. Значения ординат расчетной кривой ^{13/} уменьшены в 10 раз.

Недавно появилась работа ^{15/}, в которой делается оценка теоретической зависимости сечений двойной перезарядки на основе теории обменных токов. В этом случае расчеты предсказывают монотонный рост сечения в диапазоне импульсов начальных пионов от 100 до 600 МэВ/с. Нет признаков наличия какого-либо максимума при энергии ~250 МэВ, как это следует из модели парных корреляций ^{2,13/}. На рис. 4 показана энергетическая зависимость полного сечения реакции, вычисленная в работе ^{15/}, а также приведены экспериментальные точки.

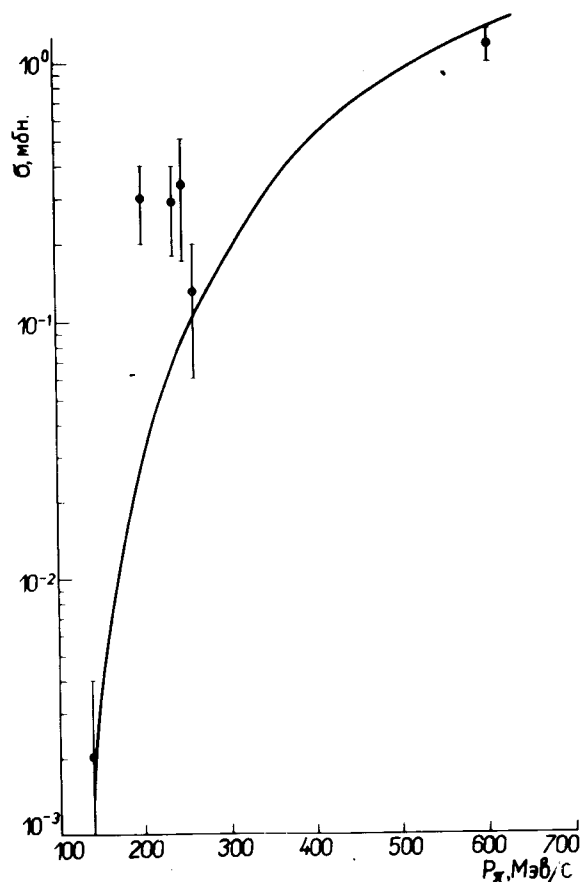


Рис. 4. Сечение реакции $\pi^+ + {}^4\text{He} \rightarrow \pi^- + {}^4\text{He}$ в зависимости от импульса пионов - экспериментальные точки и расчетная кривая по модели обменных токов¹⁵.

Следует заметить, что расчетная кривая проходит при малых энергиях через точку, полученную всего по одному событию. В наших измерениях оценки неопределенности, связанной с фоном, показывают, что здесь могут быть ошибки порядка 20-30%, т.е. расхождение при 200 МэВ/с вряд ли может быть объяснено неточностью эксперимента. При повышении энергии наши данные, как видно, ближе подходят к теоретической кривой. На наш взгляд, было бы очень удивительно, если бы в рамках

теории обменных мезонных токов можно было удовлетворительно объяснить энергетическую зависимость полных сечений - слишком много допущений делается даже при ее использовании. В настоящее время можно отметить, что имеется грубое качественное согласие между этой теорией и опытом и нужны дальнейшие эксперименты и более аккуратное рассмотрение различных диаграмм, которые могут проявляться в процессе двойной перезарядки.

Чтобы установить, проявляется ли /и каким образом/ эффект первого барионного резонанса Δ_{33} в процессе двойной перезарядки пионов на гелии, необходимо улучшить статистику и более подробно экспериментально исследовать энергетическую зависимость сечения двойной перезарядки в интервале энергий пионов 100-300 МэВ. Пока по имеющимся экспериментальным данным такого эффекта не видно. Следует отметить, что в исследованиях по двойной перезарядке на углероде^{14/} максимум в сечении при энергии пионов ~ 250 МэВ, связанный с проявлением эффектов резонанса, не обнаружен. Измеренные на углероде полные сечения двойной перезарядки при энергиях 138 МэВ / $\sigma = 1,24 \pm 0,38$ мбн/ и 204 МэВ / $\sigma = 1,85 \pm 0,38$ МэВ/ различаются недостаточно сильно.

Литература

1. Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, В.М. Сидоров, В.А. Ярба. Препринт ОИЯИ, Р-1474, Дубна, 1963; ЖЭТФ, 46, 817 /1964/.
2. F. Becker, Yu. A. Batusov. Riv. Nuovo Cim., 1, N 3, 309 (1971).
3. N. Carayannopoulos, J. Head, K. Kwak, J. Manweiler, R. Stumpf. Phys. Rev. Lett., 20, 1215 (1968).
4. J. Sperinde, D. Fredrickson, R. Hinkins, V. Perez-Mendez, B. Smith. Phys. Lett., 32B, 185 (1970).
S. Sperinde, D. Fredrickson, V. Perez-Mendez. Nucl. Phys., B78, 345 (1974).
5. L. Gilly, M. Jean, R. Meunier, M. Spighel, J. P. Stroot, P. Duteil, A. Rode. Phys. Lett., 19, 335 (1965).
6. L. Kaufman, V. Perez-Mendez, J. Sperinde. Phys. Rev., 175, 1358 (1968).

7. I.V.Falomkin, M.M.Kulyukin, V.I.Lyashenko, G.B.Pontecorvo et al. *Nuovo Cim.*, 22A, 333 (1974).
8. I.V.Falomkin, M.M.Kulyukin, G.B.Pontecorvo, Yu.A.Shcherbakov. *Nuovo Cim.*, 34, 1394 (1964).
9. I.V.Falomkin, V.M.Korolyov, M.M.Kulyukin, V.I.Lyashenko, G.B.Pontecorvo, Yu.A.Shcherbakov. *Lett. Nuovo Cim.*, 5, 757 (1972).
10. I.V.Falomkin, M.M.Kulyukin, V.I.Lyashenko, A.G.Petrov, G.B.Pontecorvo, Yu.A.Shcherbakov. *Inst. Symp. on Nuclear Electronics, Versailles, Sept. 1968, v.1, p. 16 - 1.*
11. I.V.Falomkin, M.M.Kulyukin, V.I.Lyashenko, F.Nichitiu, G.Piragino, G.B.Pontecorvo, Yu.A.Shcherbakov, *Lett. Nuovo Cim.*, 3, 461 (1962).
12. I.V.Falomkin, M.M.Kulyukin, V.I.Lyashenko, G.B.Pontecorvo, Yu.A.Shcherbakov, M.Albu, T.Besliu, A.Mihul, F.Nichitiu, R.Garfanini, G.Piragino. *Nuovo Cim.*, 21A, 168 (1974).
13. F.Becker, C.Schmit. *Nucl.Phys.*, B18, 607 (1970).
14. J.P.Massue, Y.Sakamoto, Yu.A.Batusov, P.Guer. *Nucl.Phys.*, B29, 515 (1971).
15. J.F.Germond, C.Wilkin. *Lett.Nuovo Cim.*, 13, 605 (1975).

Рукопись поступила в издательский отдел
4 марта 1976 года.