

## КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ В КУМУЛЯТИВНЫХ АДРОН- И ЯДРО-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

Н.Ангелов, В.Б.Любимов, Р.Тогоо

Изучены процессы кластеризации вторичных частиц в  $\pi^-C$  ( $P_{\pi^-} = 40$  ГэВ/с),  $pC$ ,  $pTa$  ( $P_p = 10$  ГэВ/с) - и в  $CC$ ,  $CTa$  ( $P = 4,2$  ГэВ/сN) - взаимодействиях, сопровождающихся испусканием кумулятивных протонов и  $\pi^-$ -мезонов. Найдено, что кластерам с кумулятивными адронами соответствуют большие температуры и другие структуры фрагментирующих систем, чем кластерам без этих адронов. Исследование проведено при помощи двухметровой пропановой камеры Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

### Clusterization of Secondary Particles in Cumulative Hadron and Nucleus-Nucleus Interactions

N.Angelov, V.B.Lyubimov, R.Togoo

Clusterization processes of secondary particles in  $\pi^-C$  ( $P_{\pi^-} = 40$  GeV/c),  $pC$ ,  $pTa$  ( $P_p = 10$  GeV/c) and in  $CC$ ,  $CTa$  ( $P = 4,2$  GeV/cN) interactions accompanying the emission of cumulative protons and  $\pi^-$ -mesons have been studied. It is found that higher temperatures and other structures of fragmentating systems correspond more to the clusters with cumulative hadrons than to the ones without hadrons. The investigations have been performed using the 2 m propane bubble chamber at the Laboratory of High Energies, JINR.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Изучение процессов кластеризации вторичных частиц в ядерных взаимодействиях с рождением кумулятивных адронов выявило ряд интересных особенностей, связанных как с характером образования этих адронов, так и с их свойствами<sup>/1,2/</sup>. В частности, оказалось, что кумулятивным адронам, образующимся через кластеры и не связанным с ними, соответствуют разные структуры фрагментирующих систем, кластеры с кумулятивными адронами выделяются среди всех кластеров по своим энергетическим характеристикам и т.д.<sup>/2/</sup>. В то же время процессы кластеризации всех вторичных частиц в кумулятивных взаимодействиях не имеют существенных особенностей в сравнении со всеми неупругими ядерными столкновениями<sup>/1/</sup>. Эти результаты имеют большое значение для понимания природы кумулятивных явлений, поэтому в настоящей

работе вопросы кластеризации с участием кумулятивных адронов исследованы более детально.

## Методика

В работе использовался набор экспериментальных данных по адрон- и ядро-ядерным взаимодействиям, полученным с помощью двухметровой пропановой камеры Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Данные по статистике этих взаимодействий и соответствующие ссылки на работы с методическими подробностями отбора и анализа событий приведены в табл. 1.

Таблица 1. Статистика исследованных взаимодействий

Тип взаимодействия	Первичная энергия	Число событий	Ссылка
$\pi^-C$	40 ГэВ/с	8791	/6/
$pC$	10 ГэВ/с	4729	/7/
$CC$	4,2 ГэВ/сМ	4291	/8/
$pTa$	10 ГэВ/с	1748	/9/
$сТа$	4,2 ГэВ/сМ	1960	/10/

Среди этих событий отбирались взаимодействия, сопровождающиеся испусканием одного или нескольких кумулятивных адронов (кумулятивные взаимодействия). К кумулятивным адронам относились  $\pi^\pm$ -мезоны с кумулятивным числом  $X > 0,6$  и протоны с  $X > 1,8^*$ .

Окончательно для анализа использовались только те кумулятивные взаимодействия, в которых обнаруживался хотя бы один кластер. Выделение кластеров производилось в пространстве переменных  $b'_{ik} = (m_i m_k / m_0^2) b_{ik}$ , где  $b_{ik} = -(u_i - u_k)^2$  ( $u_i, u_k$  - четырехскорости рассматриваемых частиц,  $m_i, m_k$  - их массы,  $m_0$  - атомная единица массы). Методика выделения кластеров подробно изложена в работах <sup>/1,2,4/</sup>, а также в <sup>/5/</sup>. Здесь же отметим, что выделение кластеров

\*Из соображений лучшей статистической обеспеченности в  $\pi^-C$ -взаимодействиях к кумулятивным относились протоны с  $X > 1,6$ .

Таблица 2. Число отобранных для анализа событий

Тип взаимодействия	$N_1$	$N_2$	$N_{tot}$
$P^-C$	158	92	250
$pC$	401	215	616
$CC$	53	67	120
$pTa$	25	32	57
$CTa$	51	64	115

производилось только в событиях с числом вторичных заряженных частиц  $n_{\pm} \geq 4$ , причем из рассмотрения исключались медленные протоны с импульсом  $P < 250$  МэВ/с, а также стриппинговые частицы в событиях, где они могут быть (ядро-ядерные взаимодействия). Статистика отобранных взаимодействий ( $N_{tot}$ ) приведена в табл. 2. В этой таблице отдельно указано число событий с кластерами, содержащими кумулятивные адроны ( $N_1$ ), и число событий, в которых кумулятивные адроны оказались не связанными с кластерами ( $N_2$ ).

## Результаты

Обозначим круг вопросов, которые были рассмотрены с использованием отобранных взаимодействий. Это прежде всего энергетические особенности распада кластеров, которые были изучены при помощи структурных функций  $F(T_k) \equiv E d^3\sigma/dP^3$ , где  $T_k$  - кинетическая энергия частиц кластера в его системе покоя. Эти функции имеют экспоненциальный вид и поэтому аппроксимировались выражением  $F(T_k) \sim \exp(-T_k/T_0)$  с целью получения значений параметров  $T_0$ , которые имеют смысл температуры распада кластеров. Получены значения этих параметров для всех частиц рассмотренных кластеров, отдельно для  $\pi^-$ -мезонов и протонов из этих кластеров,

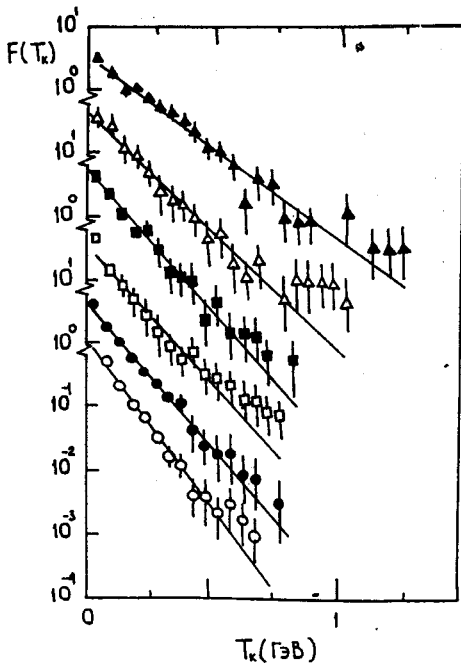


Рис.1.  $F(T_k)$  - распределения  $\pi^-$ -мезонов (темные точки) и протонов (светлые точки) для кластеров из  $pC$ -взаимодействий ( $\Delta$  - первый,  $\blacksquare$  - второй,  $\circ$  - третий типы кластеров)

а также их зависимости от числа кластеров в событии и числа частиц в кластерах.

Рассмотрено поведение структурных функций  $F(X_s)$  и  $F(b_{kc})$ . Здесь  $X_s$  - доля четырехимпульса ядра-мишени, уносимая кластером,  $b_{kc}$  - «расстояние» кластера от ядра-мишени в пространстве относительных четырехскоростей  $b_{ik}$ . Эти функции

характеризуют структуру фрагментирующих на кластеры систем и степень их возбуждения. Для кумулятивных адронов проанализированы структурные функции  $F(X)$ , где  $X$  - кумулятивное число рассматриваемого адрона. Эти функции отражают структуру фрагментирующих на кумулятивные адроны систем.

Все результаты получены для трех групп кластеров. Первая группа - это кластеры, содержащие кумулятивные адроны, во вторую вошли кластеры без кумулятивных адронов, но из событий, в которых обнаружен кластер с кумулятивным адроном (события с числом кластеров  $n_{кл} \geq 2$ ) и, наконец, третья группа - это кластеры без кумулятивных адронов в событиях, где кумулятивные адроны оказались не связанными с кластерами («свободные» кумулятивные адроны).

Рассмотрим эти результаты. В качестве примера на рис. 1 показаны  $F(T_k)$ -распределения  $\pi^-$ -мезонов и протонов из указанных трех типов кластеров, выделенных в  $pC$ -взаимодействиях. Общие данные по полученным значениям параметров для частиц из трех типов кластеров, выделенных из всех рассмотренных взаимодействий, приведены в табл. 3. В этой таблице даны значения параметров  $T_0$  для всех частиц кластеров, а также отдельно для  $\pi^-$ -мезонов и протонов.

Таблица 3. Значения параметров  $T_0$  (МэВ) для трех типов кластеров\*

Тип взаимодействия	Тип частицы кластера	Тип кластера		
		1	2	3
пС	h	172 $\pm$ 7 (1,1)	121 $\pm$ 5 (1,4)	107 $\pm$ 4 (1,3)
	p	140 $\pm$ 26 (0,7)	156 $\pm$ 27 (0,7)	101 $\pm$ 15 (0,8)
	π <sup>-</sup>	168 $\pm$ 13 (0,8)	118 $\pm$ 8 (1,3)	100 $\pm$ 6 (0,8)
pС	h	142 $\pm$ 5 (1,2)	107 $\pm$ 4 (1,6)	93 $\pm$ 3 (1,3)
	p	123 $\pm$ 17 (0,8)	105 $\pm$ 5 (1,2)	81 $\pm$ 4 (1,2)
	π <sup>-</sup>	152 $\pm$ 8 (0,8)	111 $\pm$ 10 (1,2)	116 $\pm$ 7 (0,6)
сС	h	145 $\pm$ 8 (1,2)	64 $\pm$ 4 (1,1)	77 $\pm$ 3 (0,9)
	p	149 $\pm$ 20 (1,2)	78 $\pm$ 6 (0,5)	69 $\pm$ 4 (1,4)
	π <sup>-</sup>	151 $\pm$ 23 (0,6)	65 $\pm$ 9 (0,8)	74 $\pm$ 7 (2,0)
pCa	h	85 $\pm$ 8 (2,5)	58 $\pm$ 9 (0,8)	53 $\pm$ 4 (1,8)
	p	75 $\pm$ 7 (2,3)	50 $\pm$ 9 (0,9)	53 $\pm$ 4 (2,5)
	π <sup>-</sup>	113 $\pm$ 33 (1,3)	78 $\pm$ 3 (1,1)	80 $\pm$ 11 (0,6)
сCa	h	90 $\pm$ 5 (0,3)	56 $\pm$ 2 (2,4)	65 $\pm$ 2 (1,3)
	p	78 $\pm$ 7 (0,6)	56 $\pm$ 3 (0,8)	57 $\pm$ 2 (1,2)
	π <sup>-</sup>	78 $\pm$ 10 (0,8)	45 $\pm$ 6 (1,2)	68 $\pm$ 5 (1,0)

\*В скобках указаны значения  $\chi^2$  на одну степень свободы.

Прежде всего отметим, что значения параметров  $T_0$  для частиц из кластеров с кумулятивными адронами (первая группа кластеров) систематически больше, чем для частиц из кластеров без кумулятивных адронов (вторая и третья группы кластеров).

Значения параметров  $T_0$  для частиц из второй и третьей групп кластеров близки друг к другу. Другими словами, энергетические характеристики распада кластеров без кумулятивных адронов, но сопровождающиеся кластерами с кумулятивными адронами, оказываются близкими к соответствующим характеристикам кластеров,

Таблица 4. Среднее число нейтральных частиц в  $\pi^-$  С-взаимодействии

Рассматриваемая величина	События с кумулятивными кластерами	События со "свободным" кумулятивным адроном
$\bar{n}_{K^0}$	$0,097 \pm 0,040$	$0,304 \pm 0,074$
$\bar{n}_{\Lambda^0}$	$0,19 \pm 0,07$	$0,20 \pm 0,05$
$\bar{n}_\gamma$	$4,01 \pm 0,60$	$5,97 \pm 0,90$

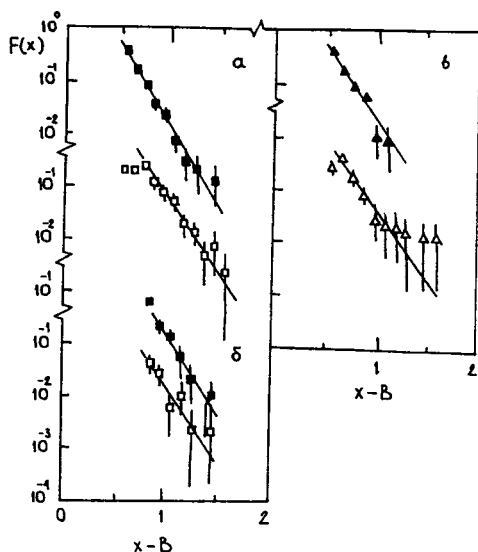


Рис.2. Структурные функции  $F(X)$  для кумулятивных адронов из кластеров (темные точки) и "свободных" кумулятивных адронов (светлые точки): а)  $\pi$ -мезоны и б) протоны из  $\rho$ -взаимодействий, в)  $\pi$ -мезоны из  $\pi^-$  С-взаимодействий;  $X$  и  $B$  - кумулятивное и барионное числа этих адронов

сопровождающихся испусканием «свободных» кумулятивных адронов. Все это можно рассматривать как указание на то, что «свободные» кумулятивные адроны также образуются через кластеры, состоящие в основном из нейтральных частиц ( $\pi^0$ -мезонов, нейтронов и т.д.), которые наша методика не выделяет. Этот вывод подтверждается, в частности, повышенной долей нейтральных странных частиц и  $\gamma$ -квантов в событиях, соответствующих образованию третьей группы кластеров. Соответствующие данные по числу этих частиц для  $\pi^-$  С-взаимодействий приведены в табл. 4. Характерно в этом плане поведение структурных функций  $F(X)$ , которые для «свободных» и «кластерных» кумулятивных адронов из  $\rho$ С- и  $\pi^-$  С-взаимодействий показаны на рис. 2\*. Эти функции имеют экс-

\*При получении данных, представленных на рис.2, в кластерном анализе событий использовались медленные протоны с  $P < 250$  МэВ/с.

Таблица 5. Значения параметров  $\langle X \rangle$  структурных функций  $F(X) \sim \exp(-X/\langle X \rangle)$  кумулятивных адронов из  $pC$ - и  $\pi^-C$ -взаимодействий\*

Тип взаимодействия	Тип кумулятивного адрона		$\langle x \rangle$
	$p^\pm$	из кластера "свободный"	
$pC$	$p^\pm$	из кластера "свободный"	$0,14 \pm 0,01$ (0,6) $0,15 \pm 0,01$ (0,4)
	$p$	из кластера "свободный"	$0,15 \pm 0,04$ (0,1) $0,14 \pm 0,03$ (0,8)
$\pi^-C$	$\pi^-$	из кластера "свободный"	$0,12 \pm 0,01$ (0,7) $0,13 \pm 0,03$ (0,3)

\*В скобках указаны значения  $\chi^2$  на одну степень свободы.

Таблица 6. Значения параметров  $T_0$  (МэВ) в трех типах кластеров из  $\pi^-C$ - и  $pC$ -взаимодействий в зависимости от числа кластеров ( $n_{кл}$ ) и числа частиц в них ( $n_\pm$ )\*

Тип взаимодействия, $n_{кл}, n_\pm$			Тип кластеров		
			1	2	3
$\pi^-C$	$n_{кл}$	1	$175 \pm 8$ (0,3)	-	$124 \pm 10$ (0,3)
		2	$171 \pm 8$ (0,7)	$129 \pm 6$ (1,5)	$104 \pm 7$ (1,6)
		$\geq 3$	$146 \pm 17$ (1,5)	$88 \pm 7$ (1,6)	$93 \pm 7$ (0,7)
	$n_\pm$	2	$141 \pm 33$ (1,9)	$60 \pm 11$ (2,5)	-
		3	$130 \pm 14$ (1,0)	$98 \pm 9$ (1,4)	$78 \pm 8$ (1,5)
		$\geq 4$	$203 \pm 11$ (1,0)	$155 \pm 10$ (1,0)	$118 \pm 5$ (0,7)
$pC$	$n_{кл}$	1	$132 \pm 6$ (1,6)	-	$92 \pm 5$ (0,5)
		2	$136 \pm 4$ (1,6)	$109 \pm 4$ (0,9)	$86 \pm 4$ (1,1)
		$\geq 3$	$122 \pm 11$ (0,2)	$87 \pm 10$ (0,8)	$84 \pm 10$ (1,0)
	$n_\pm$	2	$182 \pm 35$ (1,6)	$57 \pm 10$ (1,0)	$88 \pm 19$ (0,4)
		3	$140 \pm 10$ (1,1)	$89 \pm 7$ (0,7)	$80 \pm 10$ (1,0)
		$\geq 4$	$131 \pm 4$ (1,6)	$108 \pm 5$ (1,0)	$93 \pm 3$ (0,6)

\*В скобках указаны значения  $\chi^2$  на одну степень свободы.

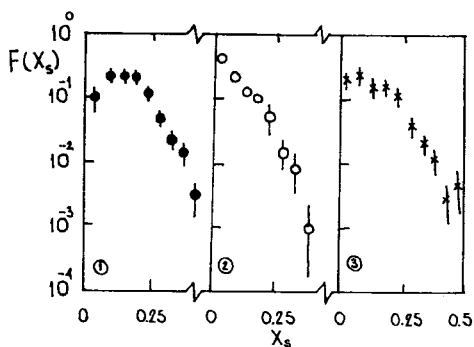


Рис.3.  $F(X_s)$  – распределения для трех типов кластеров (1, 2, 3) из  $pC$ -взаимодействий

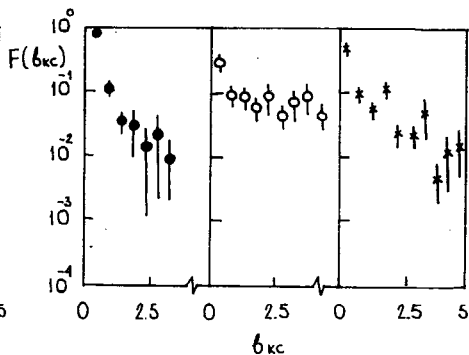


Рис.4.  $F(b_{kc})$  – распределения для трех типов кластеров (1, 2, 3) из  $pC$ -взаимодействий

понициальный вид с приблизительно одинаковыми показателями наклонов (см. табл. 5), т.е. демонстрируют одинаковые структуры систем, фрагментирующих на кумулятивные адроны. Таким образом, число кумулятивных адронов, связанных с кластерами, больше, чем это указано в табл. 2, возможно, на число событий, обозначенных в этой таблице индексом  $N_2$ .

Для всех частиц из кластеров, выделенных в  $\pi^-C$ - и  $pC$ -взаимодействиях, в табл. 6 приведены значения параметров  $T_0$  в зависимости от числа кластеров в событии, а также от числа частиц в них. Для многокластерных систем заметна тенденция уменьшения значений параметров  $T_0$ . Четкой зависимости значений  $T_0$  от числа частиц в кластере не наблюдается.

И, наконец, отметим, что кластеры с кумулятивными адронами отличаются от кластеров без этих адронов по свойствам структурных функций  $F(X_s)$  и  $F(b_{kc})$ . Для  $\pi^-C$ - и  $pC$ -взаимодействий они показаны на рис. 3 и 4. Таким образом, кластеры с кумулятивными адронами и кластеры без этих адронов связаны с разными структурами фрагментирующих систем и разными степенями их возбуждения.

## Заключение

Сформулируем основные выводы из проделанного анализа.

1. В кластерах с кумулятивными адронами наблюдаются большие температуры, чем в кластерах без этих адронов.



2. Можно считать, что кумулятивные адроны объединяются в кластеры значительно чаще, чем это следует из анализа, основанного только на данных по вторичным заряженным частицам.

3. Кластерам с кумулятивными адронами и без них соответствуют разные структуры фрагментирующих систем и разные степени их возбуждений.

Авторы благодарны А.А. Кузнецову за обсуждение и ценные советы.

## Литература

1. Ангелов Н. и др. - В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, № 5 (38)-89, Дубна, 1989, с.11.
2. Ангелов Н. и др. - В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, № 4 (43)-90, Дубна, 1990, с.20.
3. Baldin A.M. - JINR, E1-82-472, Dubna, 1982.
4. Ангелов Н. и др. - В сб.: Краткие сообщения ОИЯИ, № 9 (41)-90, Дубна, 1990, с.4.
5. Ангелов Н. и др. - ЯФ, 1991, т.54, с.316.
6. Абдурахимов А.У. и др. - ОИЯИ, 1-6967, Дубна, 1973.
7. Агакишиев Г.Н. и др. - ЯФ, 1986, т.44, с.1495.
8. Ахабабян Н. и др. - ЯФ, 1983, т.37, с.938.
9. Агакишиев Г.Н. и др. - ЯФ, 1987, т.45, с.423.
10. Ангелов Н. и др. - ЯФ, 1981, т.33, с.1046.

Рукопись поступила 18 ноября 1991 года.