

P1-2010-134

Е. Н. Кладницкая¹, А. С. Галоян¹, О. В. Рогачевский^{1,2},
В. В. Ужинский¹, Л. В. Чхаидзе³

ХАРАКТЕРИСТИКИ dC -, αC - И CC -ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ
В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЦЕНТРАЛЬНОСТИ СОУДАРЕНИЙ
ПРИ ИМПУЛЬСЕ 4,2 ГэВ/ c НА НУКЛОН

¹Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

²Петербургский институт ядерной физики РАН, Гатчина

³Институт физики высоких энергий Тбилисского государственного университета

Кладницкая Е. Н. и др.

P1-2010-134

Характеристики dC -, αC - и CC -взаимодействий
в зависимости от центральности соударений
при импульсе 4,2 ГэВ/с на нуклон

Представлены средние значения импульсов, поперечных импульсов, бы-
строт и углов вылета π -мезонов и протонов, образующихся в dC -, αC - и CC -
взаимодействиях при импульсе налетающих частиц 4,2 ГэВ/с на нуклон, для
групп событий с различной степенью центральности соударений. Для оценки
центральности соударений использовалось число протонов — участников соуда-
рений.

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера
и А. М. Балдина ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2010

Kladnitskaya E. N. et al.

P1-2010-134

Dependences of Kinematical Characteristics
for Secondary Particles in dC , αC and CC Interactions
on Event Collision Centrality at Incident Momentum 4.2 GeV/c per Nucleon

We present the centrality dependence of momenta, transverse momenta, rapidities
and polar angles distributions for π mesons and protons in dC , αC and CC inter-
actions at incident momentum 4.2 GeV/c per nucleon. As a measure for collision
centrality the number of proton participants in the event has been taken. The mean
values of all variables are obtained at different centralities of collisions.

The investigation has been performed at the Veksler and Baldin Laboratory of
High Energy Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2010

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе представлены результаты детального анализа множественности и кинематических характеристик заряженных вторичных частиц, рожденных во взаимодействиях легких ядер (d, α, C) с ядрами углерода при импульсе 4,2 ГэВ/нуклон, в зависимости от степени центральности соударений и от массы налетающего ядра. Ввиду обширности представленного экспериментального материала сравнение с теоретическими моделями будет проведено в последующих работах. Ранее в работах [1] было проведено аналогичное исследование для pC -реакций при импульсе налетающего протона 4,2 ГэВ/с. Полученные результаты подводят итог многолетних работ сотрудничества по исследованиям на 2-метровой пузырьковой пропановой камере ЛВЭ ОИЯИ [2–6] по $A^{12}C$ взаимодействиям при 4,2 ГэВ/нуклон.

Полученные экспериментальные данные исключительно важны для выяснения вопроса, как меняется механизм AC -взаимодействий при переходе от периферических соударений к центральным с изменением массы налетающего ядра. Представленные экспериментальные данные также могут быть применены для предсказаний физических результатов новых экспериментов по адрон-ядерным и ядро-ядерным взаимодействиям, в частности, для будущих экспериментов MPD в ОИЯИ [7] и CBM в GSI [8]. И, безусловно, эти экспериментальные данные полезны для параметризации и усовершенствования существующих моделей-генераторов адрон-ядерных и ядро-ядерных событий.

Ниже представлены новые экспериментальные данные о множественностях протонов, π^\pm -мезонов, стриппинговых частиц и многозарядных фрагментов, их кинематические характеристики — средние значения полных и поперечных импульсов, быстроты и полярные углы, а также некоторые их распределения как во всех событиях, так и в группах, выделенных по степени центральности соударений.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Экспериментальный материал получен на 2-метровой пропановой пузырьковой камере ЛВЭ ОИЯИ, помещенной в магнитное поле с напряженностью 1,5 Тл и облученной в пучках протонов, дейтронов, α -частиц и ядер ^{12}C с импульсом 4,2 ГэВ/с на нуклон на синхрофазотроне ОИЯИ. Для выделения событий неупругих (p, d, α, C)-столкновений из полного ансамбля

взаимодействий этих ядер с пропаном (C_3H_8) использовались критерии, описанные в [9]. Процедура введения поправок на число вторичных частиц и их импульсных и угловых характеристик, а также «весов» на положительно заряженные частицы с импульсом больше 0,5 ГэВ/с подробно описана в [9]. Напомним, что по условиям эксперимента (без измерения ионизации положительно заряженных частиц) π^+ -мезоны и протоны надежно идентифицируются до импульса 0,5 ГэВ/с. Статистика зарегистрированных событий представлена в табл. 1.

Таблица 1. Число зарегистрированных событий

Ядро-мишень	p	d	α	C
C_3H_8	12757	9016	22975	39544
C	8971	5807	13319	20594

В анализируемых ансамблях pC -, dC -, αC -, CC -взаимодействий среди вторичных частиц выделялись π^+ -, π^- -мезоны, испарительные протоны ($0,15 < p < 0,3$ ГэВ/с)*, стриппинговые частицы ($p > 3$ ГэВ/с и $\theta < 4^\circ$) и протоны-участники ($p > 0,3$ ГэВ/с без стриппинговых частиц). Рассматривались также протоны-участники с импульсом в интервале 0,3–0,75 ГэВ/с, это, в основном, протоны-участники из ядра-мишени.

За меру степени центральности AC -взаимодействий принята величина Q , которая определялась как $Q = n_+ - n_- - n_{p^{исп}} - n^{стрип}$, где n_+ и n_- — число положительно и отрицательно заряженных частиц в событии соответственно, $n_{p^{исп}}$ — число испарительных протонов, а $n^{стрип}$ — число стриппинговых фрагментов ядра-снаряда. Величина Q коррелирует с величиной параметра соударения сталкивающихся ядер. Степень центральности взаимодействия возрастает с увеличением Q .

2. МНОЖЕСТВЕННОСТЬ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ В dC -, αC - И CC -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

Средние множественности вторичных частиц в dC -, αC -, CC -взаимодействиях в зависимости от Q представлены в табл. 2–4**. Можно видеть, что средние множественности π^+ -, π^- -мезонов $\langle n_{\pi^+} \rangle$ и $\langle n_{\pi^-} \rangle$, протонов-участников $\langle n_{p^{уч}} \rangle$, а также полная множественность всех заряженных частиц $\langle n_{ch} \rangle$, возрастают с увеличением Q , т.е. при переходе от периферических AC -взаимодействий к более центральным. Возрастают средние множественности рассматриваемых частиц и с увеличением массы ядра-снаряда.

*Протоны с импульсом $p < 150$ МэВ/с в пропановой камере не регистрируются из-за малой длины пробега (< 2 мм). Их число для C -, dC -, αC - и CC -событий определялось по недостающему заряду в событии.

**Таблица для pC -взаимодействий опубликована в [1].

Таблица 2. Средние множественности частиц в d -С-взаимодействиях при импульсе 4,2 ГэВ/с на нуклон в зависимости от степени центральности взаимодействия Q

Параметр	0	1	2	3	4	5	≥ 6	Все события
$N_{\text{собр.}} \%$	4,27(7,3)	1433 (24,7)	2041 (35,2)	1083 (18,6)	517 (8,9)	215 (3,7)	91 (1,6)	5807 (100)
$\langle n_{\pm} \rangle$	3,76 \pm 0,06	3,58 \pm 0,04	3,94 \pm 0,04	5,29 \pm 0,06	6,60 \pm 0,09	7,63 \pm 0,14	8,45 \pm 0,27	4,52 \pm 0,03
$\langle n_{\pi^-} \rangle$	0,984 \pm 0,030	0,663 \pm 0,014	0,574 \pm 0,013	0,692 \pm 0,024	0,865 \pm 0,039	0,89 \pm 0,06	0,71 \pm 0,09	0,686 \pm 0,009
$\langle n_{\pi^+} \rangle$	0,214 \pm 0,015	0,474 \pm 0,011	0,694 \pm 0,012	0,990 \pm 0,026	1,30 \pm 0,05	1,62 \pm 0,07	2,02 \pm 0,15	0,704 \pm 0,008
$\langle n_{p^{ch}} \rangle$	0,683 \pm 0,025	1,236 \pm 0,015	1,910 \pm 0,015	2,729 \pm 0,029	3,53 \pm 0,05	4,23 \pm 0,08	4,92 \pm 0,016	2,104 \pm 0,014
$0,15 \leq p < 0,3$, ГэВ/с	0,966 \pm 0,036	0,618 \pm 0,018	0,584 \pm 0,016	0,706 \pm 0,029	0,845 \pm 0,041	0,85 \pm 0,07	0,77 \pm 0,12	0,710 \pm 0,010
$0,3 \leq p < 0,75$, ГэВ/с	0,269 \pm 0,018	0,422 \pm 0,012	0,707 \pm 0,013	1,25 \pm 0,03	1,73 \pm 0,05	2,30 \pm 0,09	3,00 \pm 0,16	0,919 \pm 0,011
$\langle n_{p^{ch}} \rangle$	0,909 \pm 0,021	0,591 \pm 0,011	0,178 \pm 0,007	0,175 \pm 0,012	0,063 \pm 0,011	0,05 \pm 0,02	0,04 \pm 0,02	0,319 \pm 0,006
$p < 0,15$ ГэВ/с	5,21	4,74	4,21	3,10	2,13	1,15	-0,004	3,85

Таблица 3. Средние множественности частиц в ^4He -взаимодействиях при импульсе 4,2 ГэВ/с на нуклон в зависимости от степени центральности взаимодействия Q

Параметр	0	1	2	3	4
$N_{\text{соб}}, \%$	720 (5,4)	2364 (17,7)	3309 (24,8)	2625 (19,8)	1891 (14,2)
$\langle n_{\pm} \rangle$	$4,00 \pm 0,05$	$4,16 \pm 0,03$	$5,01 \pm 0,03$	$6,38 \pm 0,04$	$7,89 \pm 0,06$
$\langle n_{\pi^-} \rangle$	$0,777 \pm 0,018$	$0,630 \pm 0,009$	$0,678 \pm 0,010$	$0,938 \pm 0,016$	$1,250 \pm 0,025$
$\langle n_{\pi^+} \rangle$	$0,181 \pm 0,010$	$0,452 \pm 0,007$	$0,720 \pm 0,009$	$1,034 \pm 0,014$	$1,414 \pm 0,022$
$\langle n_p \rangle$	$0,515 \pm 0,017$	$1,227 \pm 0,009$	$2,022 \pm 0,011$	$2,983 \pm 0,019$	$3,928 \pm 0,027$
$\langle n_{\bar{p}} \rangle$	$1,10 \pm 0,03$	$0,605 \pm 0,13$	$0,578 \pm 0,012$	$0,767 \pm 0,018$	$0,851 \pm 0,024$
$\langle n_{p^{уч}} \rangle$ $0,3 \leq p < 0,75$ ГэВ/с	$0,16 \pm 0,01$	$0,458 \pm 0,008$	$0,635 \pm 0,009$	$0,965 \pm 0,016$	$1,381 \pm 0,025$
$\langle n^{\text{ср}} \rangle$ $Z = 1$	$0,85 \pm 0,03$	$0,837 \pm 0,010$	$0,913 \pm 0,007$	$0,608 \pm 0,011$	$0,436 \pm 0,014$
$\langle n^{\text{ср}} \rangle$ $Z = 2$	$0,556 \pm 0,016$	$0,407 \pm 0,006$	$0,096 \pm 0,004$	$0,052 \pm 0,004$	$0,014 \pm 0,003$
$\langle n_{\text{исп}} \rangle$ $p < 0,15$ ГэВ/с	5,00	4,70	4,25	3,45	2,60
Параметр	5	6	7	8	Все события
$N_{\text{соб}}, \%$	1260 (9,5)	714 (5,4)	323 (2,4)	116 (0,9)	13319 (100)
$\langle n_{\pm} \rangle$	$9,30 \pm 0,08$	$10,42 \pm 0,10$	$11,37 \pm 0,14$	$12,2 \pm 0,2$	$6,39 \pm 0,02$
$\langle n_{\pi^-} \rangle$	$1,47 \pm 0,03$	$1,62 \pm 0,005$	$1,77 \pm 0,07$	$1,75 \pm 0,011$	$0,968 \pm 0,007$
$\langle n_{\pi^+} \rangle$	$1,81 \pm 0,04$	$2,15 \pm 0,05$	$2,59 \pm 0,07$	$2,67 \pm 0,13$	$0,980 \pm 0,007$
$\langle n_p \rangle$	$4,80 \pm 0,004$	$5,62 \pm 0,06$	$6,31 \pm 0,08$	$7,36 \pm 0,014$	$2,895 \pm 0,013$
$\langle n_{\bar{p}} \rangle$	$0,919 \pm 0,029$	$0,83 \pm 0,04$	$0,62 \pm 0,05$	$0,31 \pm 0,07$	$0,767 \pm 0,007$
$\langle n_{p^{уч}} \rangle$ $0,3 \leq p < 0,75$ ГэВ/с	$1,82 \pm 0,04$	$2,21 \pm 0,05$	$2,54 \pm 0,008$	$3,16 \pm 0,13$	$1,045 \pm 0,007$
$\langle n^{\text{ср}} \rangle$ $Z = 1$	$0,286 \pm 0,014$	$0,196 \pm 0,016$	$0,090 \pm 0,017$	$0,04 \pm 0,02$	$0,642 \pm 0,005$
$\langle n^{\text{ср}} \rangle$ $Z = 2$	$0,006 \pm 0,002$	$0,003 \pm 0,002$	$0,003 \pm 0,003$	0,00	$0,140 \pm 0,002$
$\langle n_{\text{исп}} \rangle$ $p < 0,15$ ГэВ/с	1,64	0,82	0,17	$0,6 \pm 0,11$	3,40

Таблица 4. Средние множественности частиц в СС-взаимодействиях при импульсе 4,2 ГэВ/с на нуклон в зависимости от степени центральности взаимодействия Q

Параметр	0	1	2	3	4	5	6
$N_{\text{собр.}} \%$	760 (3,7)	2510 (12,2)	3438 (16,7)	2898 (14,1)	2398 (11,6)	2027 (9,9)	1712 (8,3)
$\langle n_{\pm} \rangle$	$4,95 \pm 0,05$	$5,01 \pm 0,03$	$6,21 \pm 0,03$	$8,18 \pm 0,04$	$9,77 \pm 0,05$	$11,47 \pm 0,07$	$13,04 \pm 0,08$
$\langle n_{\pi^-} \rangle$	$0,870 \pm 0,018$	$0,607 \pm 0,009$	$0,663 \pm 0,009$	$0,950 \pm 0,014$	$1,240 \pm 0,021$	$1,572 \pm 0,028$	$1,96 \pm 0,04$
$\langle n_{\pi^+} \rangle$	$0,208 \pm 0,009$	$0,432 \pm 0,006$	$0,676 \pm 0,007$	$0,979 \pm 0,012$	$1,330 \pm 0,018$	$1,652 \pm 0,024$	$2,03 \pm 0,03$
$\langle n_{p^{ns}} \rangle$	$0,594 \pm 0,016$	$1,240 \pm 0,009$	$2,061 \pm 0,009$	$3,098 \pm 0,015$	$4,056 \pm 0,022$	$5,078 \pm 0,029$	$6,07 \pm 0,04$
$\langle n_p \rangle$							
$0,15 \leq p < 0,3$ ГэВ/с	$1,076 \pm 0,023$	$0,531 \pm 0,010$	$0,520 \pm 0,010$	$0,666 \pm 0,014$	$0,744 \pm 0,019$	$0,886 \pm 0,023$	$0,875 \pm 0,026$
$\langle n_p \rangle$							
$0,3 \leq p < 0,75$ ГэВ/с	$0,228 \pm 0,010$	$0,519 \pm 0,007$	$0,642 \pm 0,08$	$0,880 \pm 0,013$	$1,105 \pm 0,019$	$1,350 \pm 0,025$	$1,56 \pm 0,01$
$\langle n_p \rangle$							
$Z = 1$	$0,891 \pm 0,027$	$0,862 \pm 0,012$	$1,008 \pm 0,012$	$1,315 \pm 0,018$	$1,40 \pm 0,03$	$1,46 \pm 0,03$	$1,50 \pm 0,03$
$\langle n_p \rangle$							
$Z \geq 2$	$1,314 \pm 0,013$	$1,339 \pm 0,006$	$1,282 \pm 0,005$	$1,169 \pm 0,008$	$1,011 \pm 0,011$	$0,817 \pm 0,013$	$0,601 \pm 0,014$

Таблица 4. Продолжение

Параметр	7	8	9	10	≥ 11	Все события
$N_{\text{собр.}} \%$	1510 (7,3)	1170 (5,7)	946 (4,6)	646 (3,1)	577 (2,8)	20592 (100)
$\langle n_{\pm} \rangle$	14,47±0,09	15,95±0,10	17,14±0,12	18,05±0,14	18,87±0,15	10,18±0,03
$\langle n_{\pi^-} \rangle$	2,27±0,04	2,57±0,05	2,84±0,05	3,07±0,07	3,13±0,07	1,439±0,007
$\langle n_{\pi^+} \rangle$	2,45±0,04	2,85±0,05	3,24±0,05	3,75±0,07	4,07±0,08	1,462±0,007
$\langle n_{p^{IV}} \rangle$	7,00±0,05	7,97±0,05	8,88±0,06	9,62±0,074	10,64±0,09	4,429±0,015
$0,15 \leq p < 0,3$ $\Gamma_{\text{ЭВ}}/c$	0,86±0,03	0,87±0,03	0,76±0,03	0,60±0,04	0,41±0,03	0,739±0,005
$0,3 \leq p < 0,75$ $\Gamma_{\text{ЭВ}}/c$	1,81±0,04	1,98±0,04	2,09±0,04	2,22±0,06	2,35±0,06	
$\langle n_p \rangle$ $Z = 1$	1,42±0,03	1,37±0,03	1,23±0,03	0,92±0,03	0,57±0,03	1,204±0,06
$\langle n_p \rangle$ $Z \geq 2$	0,48±0,02	0,33±0,02	0,20±0,02	0,088±0,011	0,045±0,010	0,906±0,004

Рассмотрим особенности зависимостей $\langle n_{\pi^-} \rangle$ и $\langle n_{\pi^+} \rangle$ от Q . Если значения $\langle n_{\pi^-} \rangle$ и $\langle n_{\pi^+} \rangle$ для всех dC -, αC -, CC -событий совпадают как следствие изотопной симметричности этих ядер, то при конкретных значениях Q картина иная. События с $Q = 0$ обусловлены нейтрон-нейтронными столкновениями. Как показывают значения $\langle n_{\pi^-} \rangle$ и $\langle n_{\pi^+} \rangle$ в этих событиях, в них преобладает реакция $nn \rightarrow n\pi^-$. С меньшей вероятностью идет реакция $nn \rightarrow nn\pi^+\pi^-$. В событиях с $Q = 1$ (pn -взаимодействия) тоже $\langle n_{\pi^-} \rangle$ больше $\langle n_{\pi^+} \rangle$. Далее по мере перехода к более центральным взаимодействиям увеличивается превышение $\langle n_{\pi^+} \rangle$ над $\langle n_{\pi^-} \rangle$, особенно в dC -событиях. Это явление можно объяснить преобладанием трехчастичных конечных состояний в NN -взаимодействиях типа $pp \rightarrow p\pi^+$ и $pn \rightarrow pp\pi^-$, а при импульсе 4,2 ГэВ/с на нуклон $\sigma(pp \rightarrow p\pi^+)$ в три раза превышает $\sigma(pn \rightarrow pp\pi^-)$ [10]. При более низких энергиях этот эффект только усиливается. По мере увеличения массы ядра-снаряда (от d к C) разница в величинах $\langle n_{\pi^-} \rangle$ и $\langle n_{\pi^+} \rangle$ сокращается, что может быть следствием четырехчастичных и более конечных состояний (см. табл. 2–4).

Наглядное представление о зависимости средних множественностей π -мезонов от степени центральности AC -взаимодействий дает рис. 1. Можно видеть, что и $\langle n_{\pi^-} \rangle$, и $\langle n_{\pi^+} \rangle$ возрастают с увеличением Q и массы ядра-снаряда, а их зависимости от Q сближаются по мере увеличения массы ядра-снаряда.

Средние множественности протонов-участников и их зависимости от Q представлены в табл. 2–4 и на рис. 2. Видно, что $\langle n_{p^{уч}} \rangle$ по мере увеличения Q возрастают, что указывает на рост числа вторичных взаимодействий в ядре-мишени, особенно в pC - и dC -соударениях. В случае более тяжелых первичных ядер с увеличением Q повышается вероятность многократных соударений, что ведет к возрастанию $n_{p^{уч}}$. Это подтверждают данные по сред-

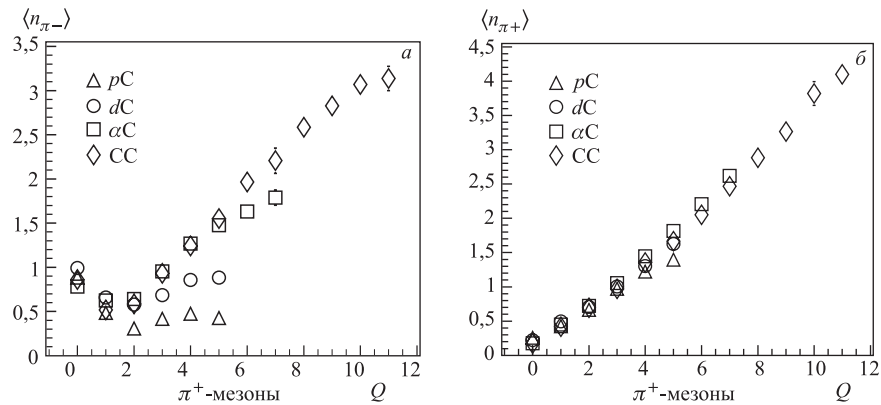


Рис. 1. Средние множественности π -мезонов в зависимости от Q

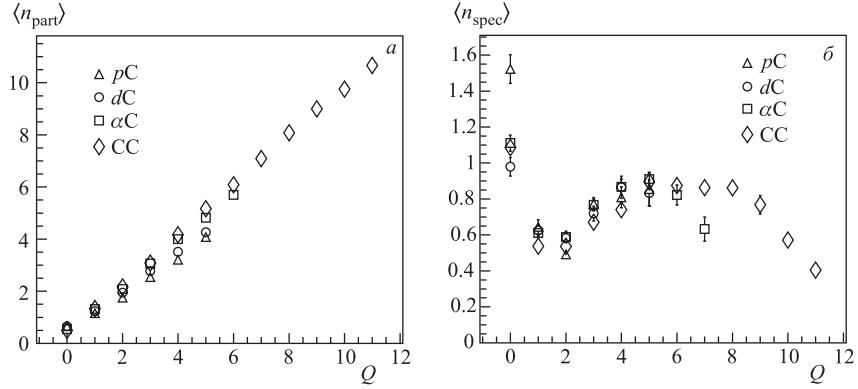


Рис. 2. Средние множественности а) протонов-участников и б) протонов-спектаторов в зависимости от Q

ней множественности мишенных протонов-участников с импульсами от 0,3 до 0,75 ГэВ/с (см. табл. 2–4). Доля этих протонов среди всех протонов участников возрастает в pC -, dC -, αC -соударениях с увеличением Q . В то же время в CC -взаимодействиях это отношение уменьшается с 38 % при $Q = 0$ до 22 % в событиях с $Q > 10$. Можно сделать вывод, что в CC -взаимодействиях основной вклад в n_{p^m} с импульсами от 0,3 до 0,75 ГэВ/с дают первичные соударения нуклонов.

Выход испарительных протонов ($0,15 < p_{\text{исп}} < 0,3$ ГэВ/с) возрастает по мере увеличения степени центральности AC -взаимодействий от $Q = 2$, достигает плато и уменьшается в αC - и CC -событиях с наибольшим числом протонов-участников (см. табл. 2–4).

Рассматривались также средние множественности стриппинговых фрагментов ядра-снаряда (см. табл. 2–4). Средние значения однозарядных стриппинговых фрагментов для dC - и αC -взаимодействий уменьшаются по мере увеличения числа нуклонов, вовлеченных в процесс взаимодействия. Уменьшается с ростом Q и среднее число многозарядных фрагментов в αC - и CC -взаимодействиях. Наибольший выход $n_{Z \geq 2}^{\text{стрипп}}$ при $Q \leq 2$ обуславливает плато в распределении $\langle n_{Z=1}^{\text{стрипп}} \rangle$ в этом интервале Q . Слабая зависимость $\langle n_{Z=1}^{\text{стрипп}} \rangle$ от Q при $Q > 2$ в CC -событиях связана с падением вероятности образования стриппинговых фрагментов с $Z > 2$ по мере роста Q .

Знание множественности стриппинговых фрагментов с $Z = 1$ и $Z = 2$ дает возможность определить среднее число нуклонов-участников из налетающих ядер d и α , а для ядер с равным числом протонов и нейтронов узнать и среднее число протонов-участников и, следовательно, определить отношение $\langle n_{\pi^-} \rangle$ и $\langle n_{\pi^+} \rangle$ к $\langle n_p^{\text{уч}} \rangle$ из ядра-снаряда (табл. 5)

Таблица 5. Среднее число пионов на нуклон-участник налетающего ядра

Тип взаимодействия	$\langle N^{уч} \rangle^{снар}$	$\langle N_{\pi^-} \rangle / \langle N^{уч} \rangle^{снар}$	$\langle N_{\pi^+} \rangle / \langle N^{part} \rangle^{proj}$
pC	1	$0,407 \pm 0,006$	$0,706 \pm 0,007$
dC	$1,36 \pm 0,05$	$0,504 \pm 0,016$	0,518
HeC	$2,16 \pm 0,05$	$0,448 \pm 0,013$	0,453
CC	$4,43 \pm 0,03$	$0,325 \pm 0,003$	0,330

Таблица 6. Среднее число пионов в нуклон-нуклонных взаимодействиях

Тип взаимодействия	$\langle N_{\pi^-} \rangle^{tot}$	$\langle N_{\pi^+} \rangle^{tot}$
pp	0,18	0,64
np	0,42	0,42
pN	0,30	0,53
nn	0,64	0,18
nN	0,53	0,30
NN	0,42	0,42

Из таблицы видно, что эти отношения уменьшаются с увеличением массы ядра-снаряда. Сравнение полученных отношений со средними множественностями π -мезонов в элементарных NN -соударениях (табл. 6) [10] позволяет оценить вклад вторичных взаимодействий в $\langle n_{\pi^-} \rangle$ и $\langle n_{\pi^+} \rangle$. Сравнение данных табл. 5 и 6 позволяет сделать вывод, что наибольший вклад в $\langle n_{\pi^-} \rangle$ (35 %) и в $\langle n_{\pi^+} \rangle$ (~ 40 %) от вторичных взаимодействий имеет место в pC -взаимодетствиях, в dC (~ 25 %) и (~ 10 %) в αC . Такой подход для CC -событий не позволяет сделать заключение о вкладе вторичных взаимодействий в полученные значения по $\langle n_{\pi^-} \rangle$ и $\langle n_{\pi^+} \rangle$.

По полученным данным о средних множественностях π^- и π^+ -мезонов и протонов-участников были определены отношения $\langle n_{\pi^-} \rangle / \langle n_{p^{уч}} \rangle$ и $\langle n_{\pi^+} \rangle / \langle n_{p^{уч}} \rangle$ в зависимости от Q для pC -, dC -, αC - и CC -взаимодетствиях, которые представлены в табл. 7, 8. Для самых легких ядер-снарядов (p, d, α) величина

Таблица 7. Зависимость среднего числа π^- -мезонов на нуклон-участник от Q

Параметр		1	2	3	4	5
$\langle n_{\pi^-} \rangle / \langle n_{p^{уч}} \rangle$	dC	.678	.300	.254	.245	.21
	αC	.626	.335	.314	.318	.306
	CC	.617	.322	.307	.306	.310

Параметр		6	7	8	9	10	11
$\langle n_{\pi^-} \rangle / \langle n_{p^{уч}} \rangle$	dC	.15					
	αC	.288	.281	.24			
	CC	.323	.324	.322	.320	.319	.295

Таблица 8. Зависимость среднего числа π^+ -мезонов на нуклон-участник от Q

Параметр	1	2	3	4	5	
$\langle n_{\pi^+} \rangle / \langle n_{p^+} \rangle$	pC	.395	.379	.382	.378	.349
	dC	.379	.363	.363	.368	.383
	α C	.366	.356	.347	.360	.377
	CC	.351	.328	.316	.328	.325

Параметр	6	7	8	9	10	11
$\langle n_{\pi^+} \rangle / \langle n_{p^+} \rangle$	pC	.310				
	dC	.390				
	α C	.383	.410	.363		
	CC	.334	.350	.358	.365	.389

$\langle n_{\pi^-} \rangle / \langle n_{p^+} \rangle$ с увеличением степени центральности уменьшается. Этот процесс замедляется с увеличением массы налетающего ядра. Для СС-взаимодействий с $Q > 1$ среднее число π^- -мезонов на среднее число протонов-участников не зависит от Q . Наибольшей величиной $\langle n_{\pi^-} \rangle / \langle n_{p^+} \rangle$ выделяются периферические взаимодействия с $Q = 1$, обусловленные протон-нейтронными соударениями. Отношение $\langle n_{\pi^+} \rangle / \langle n_{p^+} \rangle$ слабо зависит от степени центральности для всех изучаемых взаимодействий (табл. 8), различие не более 20%. При сравнении отношений $\langle n_{\pi^-} \rangle / \langle n_{p^+} \rangle$ и $\langle n_{\pi^+} \rangle / \langle n_{p^+} \rangle$ для dC-, α C- и СС-взаимодействий обнаружена их полная независимость от типа сталкивающихся ядер. Отношения $\langle n_{\pi^-} \rangle / \langle n_{p^+} \rangle$ естественно совпадают с $\langle n_{\pi^+} \rangle / \langle n_{p^+} \rangle$ в dC-, α C- и СС-взаимодействиях.

3. КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Зависимости средних значений импульсов (p), поперечных импульсов (p_t), полярных углов (θ) и быстрот (y) π -мезонов от параметра Q представлены на рис. 3, 4.

На рис. 3, а и 4, а наглядно видно уменьшение средних импульсов π^- - π^+ -мезонов с возрастанием степени центральности pC-, dC-, α C- и СС-взаимодействий, что подтверждает сделанный выше вывод о роли вторичных взаимодействий в ядре-мишени. С увеличением массы ядра-снаряда вклад вторичных взаимодействий в статистику вторичных частиц уменьшается, о чем свидетельствует приближение значений средних импульсов π -мезонов при максимальных Q к p_π при $Q = 1, 2$ (см. рис. 3, а, 4, а). В итоге в СС-соударениях средние импульсы π -мезонов практически не зависят от Q . Для средних углов вылета π -мезонов наблюдается обратная зависимость от A по сравнению с $\langle p_\pi \rangle$ (см. рис. 3, в, 4, в). Наименьшие значения θ_π обнаружены при малых Q для всех AC-взаимодействий. По мере увеличения Q $\langle \theta_{\pi^-} \rangle$ и

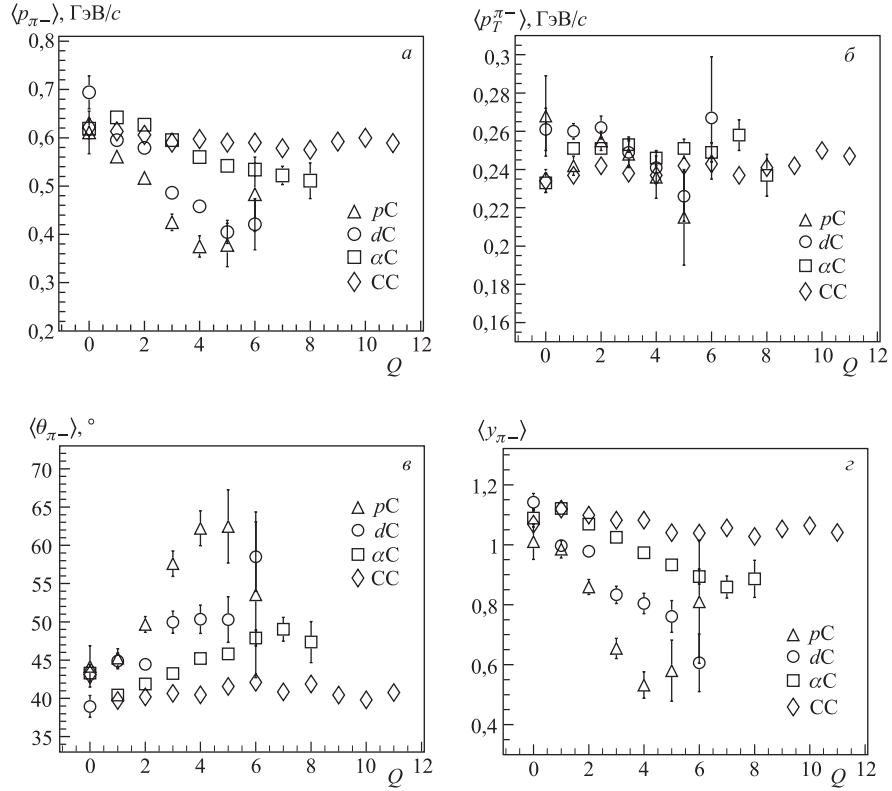


Рис. 3. Зависимость средних характеристик π^- -мезонов от Q

$\langle \theta_{\pi^+} \rangle$ мезонов возрастают в pC -, dC -, αC -соударениях. В CC -взаимодействиях $\langle \theta_{\pi^\pm} \rangle$, как и $\langle p_{\pi^\pm} \rangle$, от Q практически не зависят.

Такая корреляция между средними импульсами π -мезонов и их средним углом вылета приводит к слабой зависимости от Q средних поперечных импульсов π -мезонов для всех изучаемых нами AC -взаимодействий (см. рис. 3, б). Для $\langle p_t \rangle$ π^+ -мезонов отмечен слабый ($\sim 10\%$) рост с увеличением Q . Подавляющее большинство π -мезонов имеют поперечный импульс до $0,5$ ГэВ/с, тем не менее жесткие соударения, приводящие к образованию π -мезонов с большим p_t ($0,5-1$ ГэВ/с), имеют место в рассматриваемых взаимодействиях. Представление о зависимости средних быстрот π -мезонов от параметра соударения изучаемых AC -соударений дают рис. 3, г и 4, г. Можно видеть, что в периферических pC -, dC -, αC -столкновениях ($Q < 2$) π -мезоны образуются преимущественно в центральной области быстрот ($y = 1-1,1$). По мере увеличения параметра соударения происходит смещение $\langle y \rangle$ в область меньших

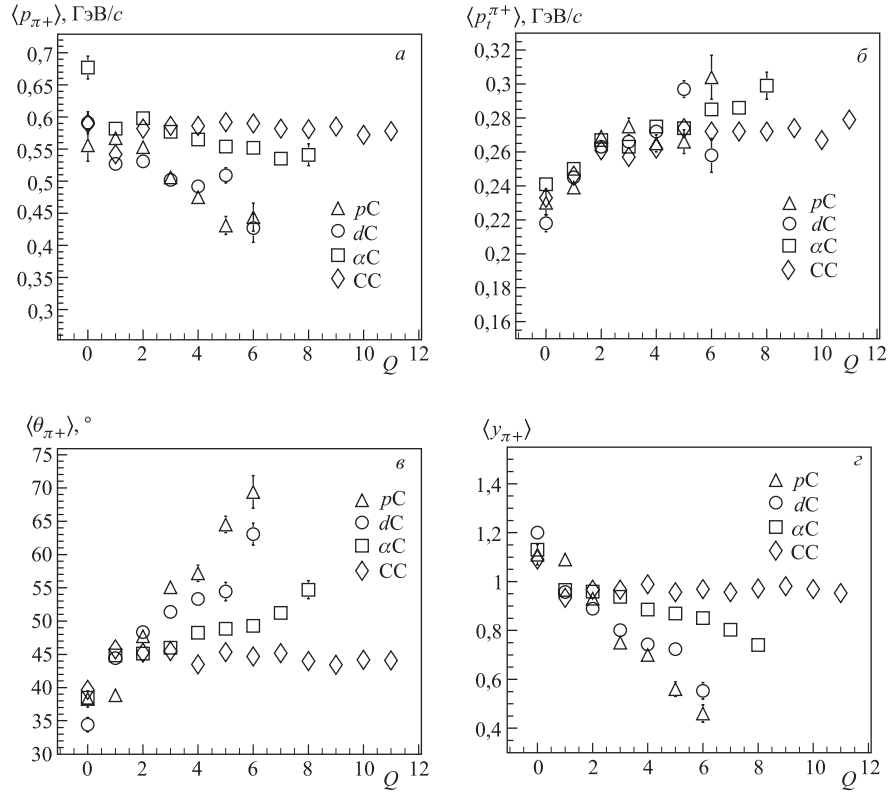


Рис. 4. Зависимость средних характеристик π^+ -мезонов от Q

значений, видимо, за счет π -мезонов, образовавшихся во вторичных нуклон-нуклонных соударениях (это явно видно для pC -взаимодействий). В CC -соударениях и $\langle y_{\pi^+} \rangle$ и $\langle y_{\pi^-} \rangle$ практически не зависят от Q .

Рассмотрим теперь влияние степени центральности AC -соударений на кинематические характеристики протонов-участников. По рис. 5, $a-g$ можно проследить изменения $\langle p \rangle$, $\langle p_l \rangle$, $\langle \theta \rangle$ протонов-участников с возрастанием Q . В pC -, dC -, αC -соударениях средний импульс протонов-участников убывает по мере перехода от периферических к более центральным взаимодействиям. Сказывается увеличение доли мишенных протонов среди полного числа протонов-участников. С увеличением массы ядра-снаряда степень (скорость) убывания уменьшается, так как уменьшается доля протонов-участников из мишени в полном числе протонов-участников. Об этом свидетельствует возрастание среднего импульса протонов-участников при всех Q при переходе от pC - к CC -взаимодействиям. В dC -, αC - и CC -соударениях при $Q < 2$, где преобладают nn - и np -взаимодействия, средняя множественность

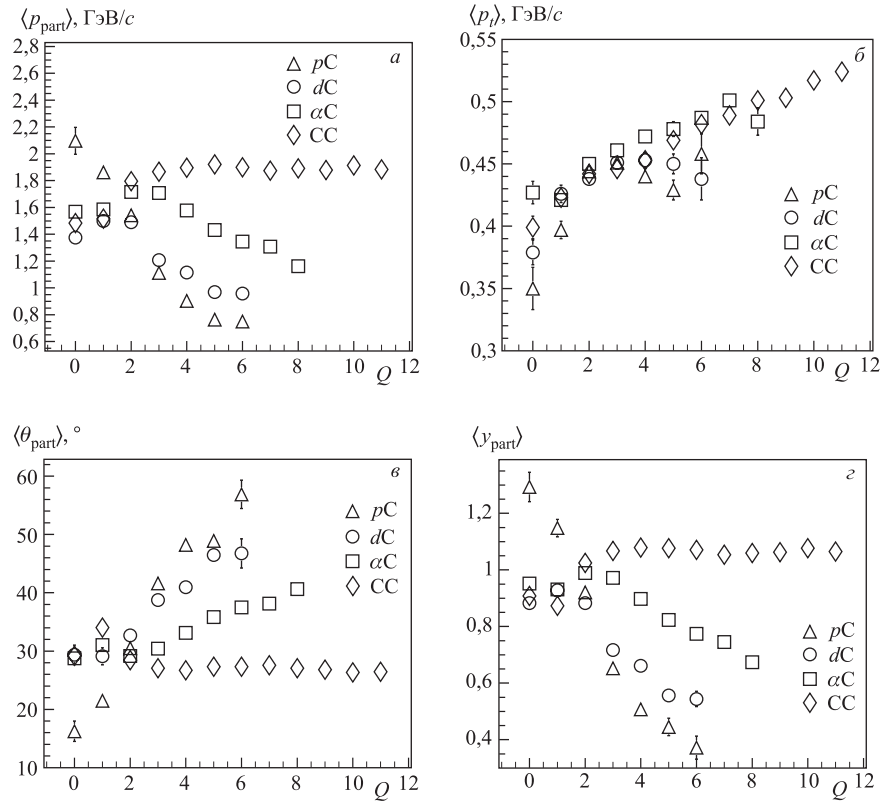


Рис. 5. Зависимость средних характеристик протонов-участников от Q

протонов-участников имеет минимальное значение. СС-взаимодействия выделяются постоянством p_t протонов-участников в интервале $Q > 2$. Не изменяются и импульсные распределения. Средние углы вылета протонов-участников в pC -, dC -, αC -столкновениях соответственно возрастают с увеличением степени центральности практически в той же степени, как и убывают средние импульсы протонов-участников. В СС-соударениях, как и следовало ожидать, при $Q < 2$ наблюдаются наибольшие углы вылета протонов-участников. Область $Q > 2$ характеризуется постоянством $\langle \theta \rangle$ протонов-участников. В распределениях $\langle p_t \rangle$ протонов-участников по Q наблюдается увеличение среднего поперечного импульса с увеличением параметра соударения сталкивающихся ядер — слабое $\sim 10\%$ в pC -, dC -взаимодействиях, и более сильное в αC - и СС-взаимодействиях, т.е. имеет место заметная зависимость p_t протонов-участников от массы ядра-снаряда.

Влияние Q и A на быстрые характеристики протонов-участников можно проследить по рис. 5, г. В периферических соударениях распределения $\langle y \rangle$ протонов-участников имеют симметричную двухпиковую структуру. С увеличением Q в pC -, dC -, αC -взаимодействиях симметрия нарушается, $\langle y \rangle$ смещается в мишенную область. В CC -взаимодействиях наблюдается при малых Q двухпиковая структура (до $Q < 6$). При больших параметрах соударения наблюдается плато.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В pC -, dC -, αC - и CC -взаимодействиях значительную долю составляют периферические соударения ($Q < 2$). Эта доля уменьшается по мере увеличения атомного веса ядра: от 73% в pC - до 33% в CC -взаимодействиях. С увеличением степени центральности соударений все больше нуклонов из ядра-снаряда и ядра-мишени вовлекается в процесс взаимодействия, что приводит к увеличению числа π -мезонов в событии. Растет вероятность возбуждения ядра-мишени, что проявляется в увеличении множественности испарительных протонов. В периферических взаимодействиях ($Q < 2$) $\langle n_{\pi^-} \rangle > \langle n_{\pi^+} \rangle$, в событиях с $Q > 2$ ситуация обратная в соответствии с сечениями соответствующих NN -взаимодействий.

2. В pC -событиях значительный вклад в $\langle n_{\pi^-} \rangle$ (30%) и $\langle n_{\pi^+} \rangle$ (40%) дают вторичные взаимодействия (см. табл. 5), в dC он составляет 20%, в αC — 7%. Для CC -соударений такую оценку сделать трудно. CC -события отличаются от других изучаемых взаимодействий постоянством отношения $\langle n_{\pi^-} \rangle / \langle n_p \rangle$ при всех Q , а $\langle n_{\pi^+} \rangle / \langle n_p \rangle$ при $Q > 1$.

3. Поведение кинематических характеристик вторичных частиц в pC , dC и αC , так же как и их множественность, может быть объяснено вкладом вторичных взаимодействий, тогда как для объяснения характеристик CC -взаимодействий нужно учитывать коллективные эффекты [11].

ЛИТЕРАТУРА

1. Галоян А. С. и др. // ЯФ. 2003. Т. 66. С. 868;
Галоян А. С. и др. // ЯФ. 2004. Т. 67. С. 273.
2. Агакишиев Г. Н. и др. // ЯФ. 1987. Т. 45. С. 1373.
3. Simic Lj. et al. // Phys. Rev. C. 1988. V. 37. P. 2064.
4. Simic Lj. et al. // Z. Phys. C. 1990. V. 48. P. 577.
5. Simic Lj. et al. // Phys. Rev. C. 1995. V. 52. P. 356.
6. Бондаренко А. И. и др. // ЯФ. 2002. Т. 65. С. 95.
7. Sissakian A. N., Sorin A. S. // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2009. V. 36. P. 064069.

8. <http://www.gsi.de/fair/experiments/CBM>
9. *Бондаренко А. И. и др.* Сообщение ОИЯИ Р1-98-292. Дубна, 1998.
10. *Particle Data Group.* *NN and ND Interactions (above 0.5 GeV/c) — a Compilation.* 1970.
11. *Chkhaidze L. et al.* // *Nucl. Phys. A.* 2007. V. 794. P. 115.

Получено 26 ноября 2010 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 21.12.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,12. Уч.-изд. л. 1,32. Тираж 365 экз. Заказ № 57198.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/