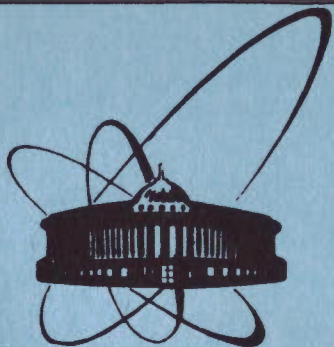


2/1184



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

1-84-240

М.Х.Аникина, Г.Л.Варденга, М.Газдзицкий,
А.И.Голохвастов, К.К.Гудима, К.И.Йовчев,
Е.С.Кузнецова, Ю.Лукстиньш, Э.О.Оконов,
Т.Г.Останевич, В.Д.Тонеев, С.А.Хорозов

АССОЦИАТИВНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ
БЫСТРЫХ ФРАГМЕНТОВ, ВЫЛЕТАЮЩИХ НАЗАД
В ЯДРО-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

Направлено в журнал "Ядерная физика"

1984

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о механизме образования быстрых фрагментов, вылетающих в заднюю полусферу при взаимодействии частиц или ядер с ядрами, остается еще далеко не выясненным. Стремление получить как можно более разностороннюю информацию для решения этого вопроса приводит к появлению экспериментов, исследующих связь между частицами, вылетающими назад, и характером множественных процессов. В большей части таких экспериментов рассматриваются взаимодействия адронов с легкими ядрами-мишенями^{/1/}.

В^{/2/} было изучено взаимодействие протонов и пионов как с легкой, так и с тяжелой группой ядер фотозмусии. В ядро-ядерных взаимодействиях проблемы связи адронов, вылетающих назад, с другими частицами рассматривались в реакциях He с фотозмусией^{/3/} и для взаимодействий разных частиц-снарядов /от p до ^{12}C / с ядрами тантала^{/4/}. Что касается модельных расчетов, то предсказания для корреляций быстрых фрагментов назад с другими частицами делались пока только в рамках каскадной модели и применительно к адрон-ядерным взаимодействиям^{/5,6/}.

В нашей работе приводятся результаты исследования взаимосвязи быстрых фрагментов, вылетающих назад, с сопровождающими их π^- -мезонами и выбитыми из мишени протонами для нескольких комбинаций взаимодействующих ядер. Рассмотрены как неупругие, так и "центральные" столкновения*. Это дает возможность проследить, как меняется характер зависимостей при изменении размеров сталкивающихся ядер и числа нуклонов, участвующих в столкновении.

Полученная экспериментальная информация проанализирована в рамках Дубненской версии каскадной модели^{/7/}.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

Экспериментальный материал получен при облучении стримерной камеры СКМ-200^{/8/} ядрами ^4He , ^{12}C и ^{16}O с начальным импульсом 4,5 ГэВ/с/нуклон. Исследуются столкновения с чистыми мишенями C , Ne , Cu и Pb . Измерены импульсные и угловые характеристики

* "Центральными" мы называем столкновения, которые не имеют заряженных фрагментов /стриппинговых частиц/ с импульсом более 3 ГэВ/с/ z (z - заряд частицы), вылетевших вперед в конусе 4° .

всех положительных частиц, имеющих импульс более 300 МэВ/с, угол вылета более 120° и угол наклона к горизонтальной плоскости менее 30° . Протоны и дейтроны идентифицированы при визуальной оценке ионизации.

Сведения о статистике изученных взаимодействий, точности измерений и идентификации частиц приведены в^{/9/}. Мы будем в дальнейшем обозначать символом \bar{p} протоны, а символом \bar{F} - сумму всех фрагментов /протонов, дейтронов и ядер трития/ с перечисленными выше характеристиками. Для всех изученных взаимодействий мы располагаем данными о числе сопровождающих π^- -мезонов, о числе стриппинговых частиц для неупругих взаимодействий, а для части взаимодействий - информацией о числе выбитых протонов, об импульсных и угловых характеристиках π^- -мезонов. Основная часть этих данных опубликована в работах^{/10-14/}.

Вариант каскадной модели^{/7/}, использованный для расчетов, наряду с быстрой каскадной стадией, включает в себя также последующие стадии предравновесной и равновесной эмиссии частиц из возбужденных ядер-остатков. Процессы квазиупругого внутриядерного перераспределения быстрых протонов практически не дают вклада в интересующую нас область $\theta_{\bar{F}} > 120^\circ$ ^{/5/}. Выбранное обрезание по импульсу фрагмента $p_{\bar{F}} > 300$ МэВ/с значительно ограничивает вклад процессов равновесной эмиссии /"испарения"/ протонов и в меньшей мере - дейтронов и ядер трития. При этом в реакциях на легких и тяжелых мишенях вклады испарительных частиц различны.

Основными процессами, приводящими к эмиссии быстрых фрагментов назад, являются в каскадной модели процессы неупругого /т.е. обязательно включающего столкновения с рождением пионов/ перераспределения, процесс рождения и последующего поглощения пиона двухнуклонным ядерным кластером^{/5/} и предравновесный распад возбужденных ядер^{/15/}. Образование сложных фрагментов за счет коалесценции быстрых нуклонов не учтено в данной версии модели.

Далее с экспериментом будет сопоставляться лишь общее число фрагментов, летящих назад, без разделения их на протоны, дейтроны или тритоны. Статистика "теоретических" звезд для ряда взаимодействий сопоставима с экспериментальной, а в большей части случаев - в 1,5 ÷ 3 раза больше. При сравнении с опытом в расчетах точно учтены критерии идентификации частиц и отбора событий.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис.1 показана зависимость средней множественности π^- -мезонов $\langle n_- \rangle$ от числа фрагментов $n_{\bar{F}}$ ($\langle n_- \rangle (n_{\bar{F}})$) для разных комбинаций сталкивающихся ядер. Можно отметить следующие характерные черты этой зависимости:

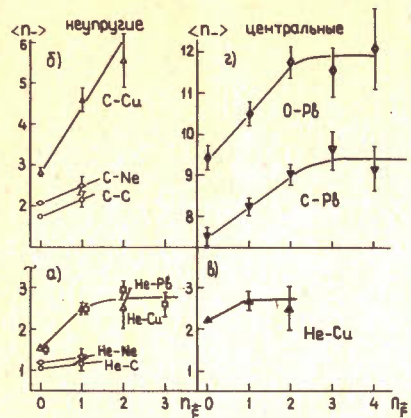


Рис.1. Зависимость средней множественности π^- -мезонов $\langle n_- \rangle$ от числа фрагментов назад n_F /а, б - неупругие взаимодействия, в, г - "центральные"/. Кривые проведены на глаз, как и в следующих рисунках.

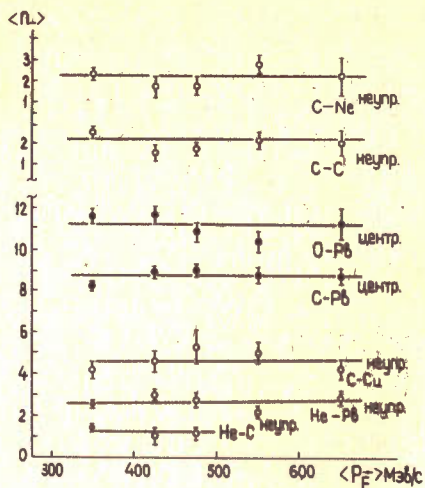


Рис.2. Зависимость средней множественности π^- -мезонов $\langle n_- \rangle$ от среднего импульса фрагмента, вылетающего назад $\langle p_F^+ \rangle$.

1. Для неупругих столкновений она заметно усиливается при переходе от легких ядер-мишеней (C, Ne) к более тяжелым (Cu, Pb). При образовании в столкновении одного фрагмента назад $\langle n_{-1} \rangle$ возрастает в $1,1 \div 1,2$ раза на легких мишенях, и в $1,6 \div 1,7$ раз - на тяжелых.
2. Утяжеление ядра-снаряда /во всяком случае от He до C/ не влияет на относительный прирост $\langle n_- \rangle$.
3. При столкновениях на тяжелых мишенях зависимость $\langle n_- \rangle$ от n_F^+ практически исчезает при $n_F^+ > 1$ в случае He - A_T и при $n_F^+ > 2$ - в случае C(O) - A_T -взаимодействий; где A_T - атомный вес ядра-мишени.
4. Для "центральных" взаимодействий на тяжелых мишенях $\langle n_- \rangle$ сохраняет зависимость от n_F^+ , хотя она гораздо слабее, чем для неупругих столкновений.

Интересно отметить, что множественности π^- -мезонов, будучи связаны с числом фрагментов, вылетевших назад, не зависят от того, с какими импульсами эти фрагменты вылетают /см.рис.2/. Здесь $\langle p_F^+ \rangle$ - средний импульс фрагментов в одном столкновении.

Сравнение экспериментальной зависимости $\langle n_- \rangle (n_F^+)$ с рассчитанной в каскадной модели дано на рис.3. Моделированным точкам приписаны ошибки, обусловленные статистикой рассчитанных событий. Каскадная модель правильно описывает характер зависимости, воспроизводя все отмеченные выше особенности. Независимость $\langle n_- \rangle$ от импульса фрагментов назад также воспроизводится путем расче-

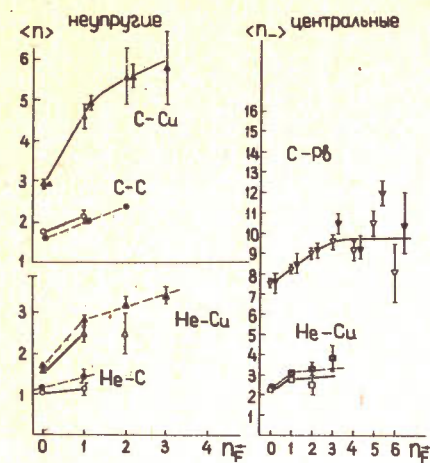


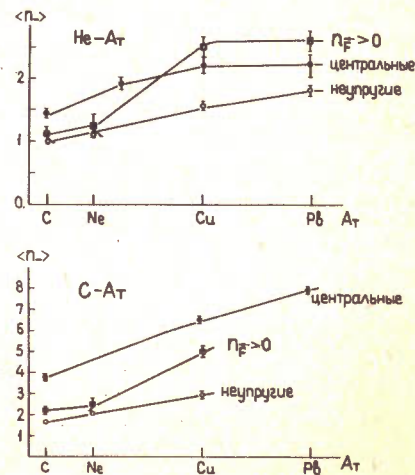
Рис.4. Зависимость средней множественности π^- -мезонов $\langle n_- \rangle$ от атомного номера ядра-мишени A_T для неупругих (o) столкновений /11-13/, для "центральных" (●) из /11-13/, для неупругих с $n_F^+ > 0$ (■).

тов. Модель несколько завышает абсолютный выход π^- -мезонов. Это расхождение уже отмечалось ранее при анализе $\langle n_- \rangle$ в ядроядерных столкновениях /12/.

Разберем теперь подробнее связь степени центральности взаимодействия и образования фрагментов, вылетающих назад. Необходимо подчеркнуть, что понятие "центральности" при описанном выше критерии отбора /см.сноску на стр.1/ аналогично понятию взаимодействия с участием многих нуклонов снаряда. При этом происходит, конечно, отбор событий с малыми параметрами удара, но для разных комбинаций взаимодействующих ядер он имеет разную степень жесткости /см.рис.5/. Так как $\langle n_- \rangle$ пропорциональна числу провзаимодействовавших нуклонов снаряда /см., например, /16/, она может служить экспериментально определяемой мерой степени центральности взаимодействия. Тогда анализ рис.1 приводит нас к следующим выводам:

1. Применяя два критерия - отсутствие стриппинговых частиц и присутствие одного испущенного назад фрагмента, - мы усиливаем жесткость отбора центральных столкновений /следствие пункта 4/.
2. Выбирая среди неупругих взаимодействий события с двумя /для He- A_T / и тремя /для C(O)- A_T / фрагментами назад, мы от-

Рис.3. Та же зависимость, что на рис.1. Сравнение эксперимента с каскадной моделью. Светлые точки - эксперимент, зачерненные - модель.



бираем такие столкновения, где провзаимодействовали все нуклоны снаряда и образование π^- -мезонов прекратилось /следствие пункта 3/.

Связь образования фрагментов с центральностью удара прослеживается также на рис.4, где представлены $\langle n \rangle$ в зависимости от массы ядра-мишени A_T для трех групп взаимодействий: 1/ всех неупругих /данные из /11-13//, 2/ "центральных" /11-13/, и 3/ неупругих, содержащих вылетающие назад фрагменты. Видно, что в случае взаимодействия с легкими мишенями (C, Ne), число π^- -мезонов в группе звезд с фрагментами примерно такое же, как и в неупругих столкновениях. Но для тяжелых мишеней /Cu и Pb/ оно близко к $\langle n \rangle$ в "центральных" взаимодействиях. Это можно объяснить тем, что на легких мишенях вероятность центрального удара существенно меньше, чем на тяжелых*. Поэтому, невзирая на то, что множественность фрагментов в "центральных" столкновениях выше, чем в неупругих /см./9//, в реакциях на C и Ne большая часть их обрывается в нецентральных взаимодействиях. В реакциях же на Cu и Pb отбор звезд с фрагментами позволяет выделять взаимодействия, близкие к "центральным".

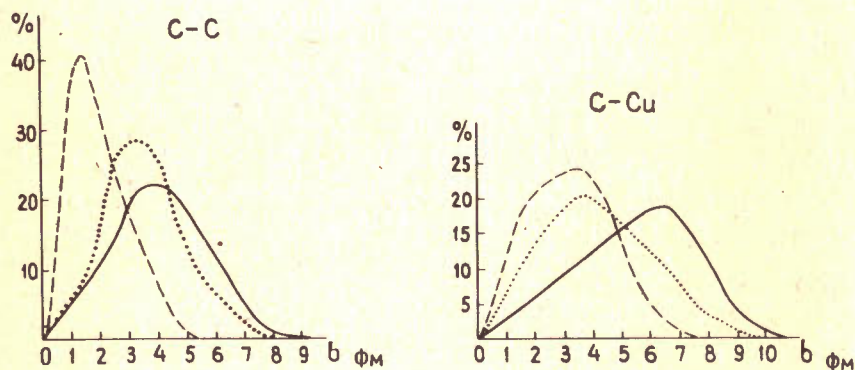


Рис.5. Распределения по параметру удара "b" для трех типов взаимодействия: сплошная линия - все неупругие, пунктирная - "центральные", точечная - неупругие с $p_F > 0$. Каждая кривая нормирована на единицу.

Сказанное выше можно проиллюстрировать рассчитанными в каскадной модели распределениями параметра удара "b" для трех перечисленных выше групп звезд /рис.5/. Видно, что среднее значение "b" группы звезд с фрагментами для C-C-взаимодействий близко

* Так, например, по данным нашего эксперимента, критерий отсутствия заряженных стриппинговых частиц в переднем конусе 4° отбирает 2% звезд из неупругих C-C-взаимодействий, 10% - из C-Cu и 50% - из Ne-Pb взаимодействий.

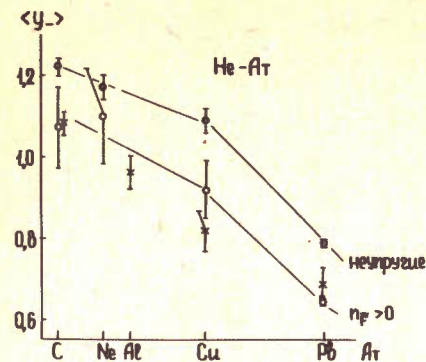


Рис.6. Зависимость средней скорости π^- -мезонов $\langle u \rangle$ от атомного номера ядра-мишени A_T для неупругих (●) столкновений /11/, "центральных" (x), из /11/ и для неупругих с $p_F > 0$ (○).

к среднему "b" неупругих столкновений, а для C-Cu - к среднему "b" "центральных" столкновений. Изменение степени центральности взаимодействия /среднего "b"/ для различных выборок приводит к различию и в средней множественности пионов.

Разница между столкновениями ядер с легкими и тяжелыми мишенями проявляется не только в корреляциях $\langle n \rangle(p_F)$, но и в спектрах частиц. Средние импульсы летящих назад протонов $\langle p_p^+ \rangle$, усредненные во взаимодействиях с легкими (He-C, He-Ne, C-C и C-Ne) и тяжелыми мишенями (He-Cu, He-Pb, C-Cu, C-Pb центр., O-Pb центр.), равны соответственно 385 ± 10 и 450 ± 5 МэВ/с. При этом средние импульсы дейтронов не изменяются, и для указанных выше двух групп взаимодействий равны 434 ± 20 и 456 ± 10 МэВ/с. Увеличение жесткости спектра протонов при переходе к тяжелым мишеням наблюдалось ранее в адрон-ядерных экспериментах /17-18/. В каскадной модели средний импульс протонов $\langle p_p^+ \rangle$, рассчитанный для C-Cu C-Pb центр. оказался с хорошей точностью одинаковым в обоих случаях и равным 420 МэВ/с.

Проанализируем теперь некоторые импульсные характеристики сопровождающих π^- -мезонов. На рис.6 представлена зависимость средней скорости π^- -мезонов $\langle u \rangle$ от атомного номера ядра-мишени A_T . Видно, что $\langle u \rangle$ в звездах с фрагментами уменьшается по сравнению со значениями $\langle u \rangle$ для всех неупругих взаимодействий и практически совпадает с $\langle u \rangle$ в "центральных" столкновениях, особенно на тяжелых мишенях / $\langle u \rangle$ для неупругих и "центральных" взяты из /11/. Очевидно, такое поведение $\langle u \rangle$ является проявлением зависимости от степени центральности удара и роста числа перерассеяний.

Для систематизации данных удобно использовать различного рода "универсальные" зависимости. В нашей работе /9/ было показано, что средние множественности протонов, вылетающих назад в A_p -Pb и A_p -Cu взаимодействиях / A_p - атомный вес ядра-снаряда/, прямо пропорциональны числу взаимодействовавших протонов мишени

$$\bar{\nu}_T = \frac{A_T \cdot \sigma_{NAp}}{\sigma_{Ap} A_T}$$
 На рис.7 приведено это распределение для неупругих и "центральных" взаимодействий на четырех ядрах-мишенях C, Ne, Cu и Pb/. Видно, что точки ложатся на разные прямые



Рис.7. Зависимость средней множественности протонов, вылетающих назад, $\langle n_p^+ \rangle / \Omega$ от числа выбитых протонов мишени Q_T . На вставке - зависимость $\langle n_p^+ \rangle / \Omega$ от числа провзаимодействовавших протонов мишени \bar{v}_T . Точки: \circ - HeC неупр., \bullet - HeC центр., \times - CС неупр., \diamond - HeNe неупр., \blacklozenge - HeNe центр., \blacklozenge - CNe неупр., Δ - HeCu неупр., \blacktriangle - HeCu центр., ∇ - CСu неупр., \blacktriangledown - CСu центр., \square - HePb неупр., \blacksquare - HePb центр., \bullet - CPb центр., \blacklozenge - OPb центр.

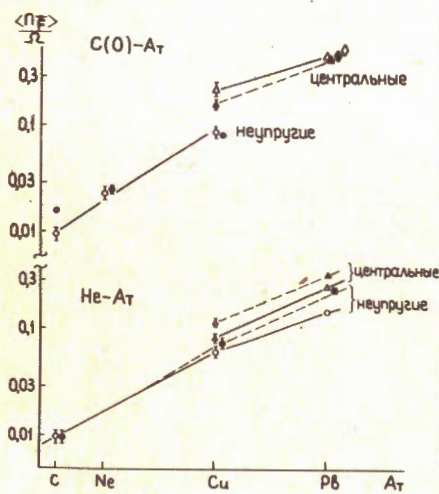


Рис.8. Зависимость средней множественности фрагментов, вылетающих назад, $\langle n_F^+ \rangle / \Omega$, от атомного веса ядра-мишени A_T , светлые точки - эксперимент, черные - рассчитанные в каскадной модели, точки: \circ - неупругие He A_T и C A_T -взаимодействия, Δ - "центральные" He A_T и C A_T , \diamond - "центральные" O A_T -взаимодействия.

в зависимости от ядра-мишени A_T , и наклон прямых растет с увеличением A_T . На том же рисунке значения $\langle n_p^+ \rangle / \Omega$ отложены как функция числа выбитых из мишени протонов:

$$Q_T = \langle n_{\pm} \rangle - 2\langle n_{-} \rangle - \langle n_M \rangle - \langle n_{CH} \rangle,$$

где $\langle n_{\pm} \rangle$ - полная множественность заряженных частиц, $2\langle n_{-} \rangle$ - число π^- и π^+ -мезонов в предположении их равенства, $\langle n_M \rangle$ - число "испарительных" протонов и фрагментов /частицы с импульсом менее 250 МэВ/с/, $\langle n_{CH} \rangle$ - число протонов снаряда /как прошедшие без взаимодействия стриппинговые частицы, так и участвовавшие в неупругих процессах/. Для неупругих He A_T взаимодействий Q_T было определено экспериментально^{/14/}, все другие значения получены приближенно, с использованием вычисленной в каскадной модели величины Q /сумма выбитых протонов мишени и снаряда/*.

Величина Q_T отличается от \bar{v}_T тем, что учитывает вторичные процессы. Как видно из рис.7, использование переменной Q_T при-

*Сравнение расчетных и экспериментальных значений Q для He A_T -взаимодействий показало, что существующие различия не меняют характера исследуемой зависимости.

водит к тому, что точки, описывающие взаимодействия на разных мишенях, ложатся на одну кривую: $\langle n_p^+ \rangle / \Omega = \text{Const} \times Q_T$. Такого же вида зависимость получается и в каскадной модели.

Необходимо отметить, что каскадная модель не только правильно описывает корреляционные зависимости, представленные выше, но получает также неплохо совпадающие с экспериментом абсолютные величины средних множественностей $\langle n_F^+ \rangle / \Omega$ /см. рис.8/ и, следовательно, правильно описывает их A -зависимость.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Наблюдена корреляция между средней множественностью π^- -мезонов $\langle n_{-} \rangle$ и числом быстрых фрагментов, вылетевших назад n_F^+ .

2. $\langle n_{-} \rangle$ не зависит от импульса вылетевшего фрагмента.

3. Характер корреляции $\langle n_{-} \rangle (n_F^+)$ различен в реакциях на легких и тяжелых мишенях. На легких мишенях: а/ $\langle n_{-} \rangle$ слабо зависит от n_F^+ , б/ $\langle n_{-} \rangle$ в звездах с фрагментами близко к $\langle n_{-} \rangle$ для всех неупругих взаимодействий. На тяжелых мишенях: а/ $\langle n_{-} \rangle$ сильно зависит от n_F^+ ; б/ $\langle n_{-} \rangle$ в звездах с фрагментами близко к $\langle n_{-} \rangle$ "в центральных" взаимодействиях. Эти различия объясняются тем, что на легких мишенях фрагменты назад образуются, в основном, в нецентральных столкновениях, а на тяжелых - в центральных.

4. Спектр протонов назад на тяжелых мишенях жестче, чем на легких.

5. Средние множественности протонов назад для всех комбинаций взаимодействующих ядер и для всех типов столкновений одинаково зависят от числа выбитых протонов мишени. Это свидетельствует о существенной роли вторичных процессов в образовании протонов, вылетающих назад, и, возможно, указывает на то, что механизмы их образования не отличаются от механизмов для всех выбитых протонов.

6. Каскадная модель воспроизводит основные корреляционные характеристики и абсолютные значения средних множественностей фрагментов назад. Включенные в данный вариант механизмы перераспределения, поглощения π^- -мезонов на паре нуклонов и предравновесного распада возбужденных ядер удовлетворительно описывают эмиссию быстрых фрагментов назад.

В заключение авторы хотели бы поблагодарить группу лаборантов, участвовавших в обработке экспериментального материала, а также Е.Скжипчак за обсуждение работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горнов М.Г. и др. ЯФ, 1977, 25, 3, с.606; Абдинов О.Б. и др. ЯФ, 1979, 30, 2, с.396; ОИЯИ, P1-81-469, Дубна, 1981; Армутлийски Д. и др. ОИЯИ, P1-83-327, Дубна, 1983.
2. Азимов С.А. и др. ЯФ, 1982, 36, 4, с.906.
3. Вокал С. и др. ОИЯИ, 1-83-652, Дубна, 1983.
4. Ангелов Н. и др. ЯФ, 1982, 32, 6/12/, с.1582.
5. Gudima K.K. et al. E2-11-303, Dubna, 1978; Komarov V.I. et al. Nucl.Phys., 1979, A326, p.297.
6. Абдинов О.Б. и др. ЯФ, 1979, 30, 2/8/, с.396; ОИЯИ, 1-83-73, Дубна, 1983; ОИЯИ, P1-81-469, Дубна, 1981; Асатурян В.М. и др. ЯФ, 1983, 38, 3/9/, с.684.
7. Гудима К.К., Тонеев В.Д. ЯФ, 1978, 27, с.658; Toneev V.D., Gudima K.K. Nucl.Phys., 1983, A400, p.173.
8. Абдурахимов А.У. и др. ПТЭ, 1978, вып.5, с.53.
9. Аникина М.Х. и др. ОИЯИ, 1-83-616, Дубна, 1983.
10. Aksinenko V.D. et al. Nucl.Phys., 1979, A324, p.266.
11. Abdurahimov A.U. et al. Nucl.Phys., 1981, A362, p.376.
12. Aksinenko V.D. et al. Nucl.Phys., 1980, A348, p.518.
13. Бартке Е. и др. ЯФ, 1980, 32, 9, с.699.
14. Аникина М.Х. и др. ЯФ, 1981, 33, 6, с.1568.
15. Gudima K.K., Mashnik S.G., Toneev V.D. Nucl.Phys., 1983, A401, p.329.
16. Хорозов С.А. ОИЯИ, 2-80-142, Дубна, 1980.
17. Ставинский В.С. ЭЧАЯ, 1979, т.10, вып.5, с.949.
18. Андроненко М.Н. и др. Письма в ЖЭТФ, 1983, т.37, вып.9, с.446.

Аникина М.Х. и др.

1-84-240

Ассоциативное образование быстрых фрагментов, вылетающих назад в ядро-ядерных взаимодействиях

Приводятся результаты исследования взаимосвязи между быстрыми фрагментами, вылетающими назад, и сопровождающими их π^- -мезонами, а также выбитыми из мишени протонами в ядро-ядерных столкновениях с начальным импульсом 4,5 ГэВ/с на нуклон. Полученные данные анализируются в рамках каскадной модели.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Anikina M.Kh. et al.

1-84-240

Associative Production of Fast Fragments Emitted Backwards in Nucleus-Nucleus Collisions

The results of investigation of interconnection between fast fragments emitted backwards and accompanying π^- -mesons, and protons knocked out of the target in nucleus-nucleus collisions with 4.5 GeV/c per nucleon initial momentum are given. The obtained data are analysed in the framework of the cascade model.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984