

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

Б 425

P1-88-192

Р.Н.Бекмирзаев,¹ В.Г.Гришин, И.Долейши,²
М.М.Муминов,¹ М.У.Султанов,¹ П.Тас, З.Трка²

ОБРАЗОВАНИЕ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

($p_n \approx 1$ ГэВ/с) В ^{12}Cp - И

^{12}C (^{12}C -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ 4,2 ГэВ/с
на нуклон

¹ Самаркандский государственный университет им. А.Навои

² Карлов университет, Прага

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время систематически изучаются процессы образования быстрых нейтронов ($p_n \geq 1$ ГэВ/с) в соударениях адронов высоких энергий с нуклонами и ядрами^{/1,4/}. Настоящая работа посвящена исследованию образования быстрых нейтронов ($p_n \geq 1$ ГэВ/с) в неупругих $^{12}\text{C}-^{12}\text{C}$ и $^{12}\text{C}-^{12}\text{C}$ -взаимодействиях, а также в многонуклонных $^{12}\text{C}-^{12}\text{C}$ -взаимодействиях ($^{12}\text{C}-^{12}\text{C}$ (мн)) при импульсе 4,2 ГэВ/с на нуклон. В инклюзивном подходе выделяются события с нейтронами-спектаторами ядра-снаряда (N_n^{CT}).

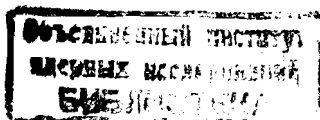
Экспериментальные результаты по N_n^{CT} сравниваются с подобными характеристиками протонов (N_p^{CT}), образованных в неупругих $^{12}\text{C}-^{12}\text{C}$ -взаимодействиях при 4,2 ГэВ/с на нуклон, которые приведены в^{/5/}.

Полученные данные также описываются с помощью дубненского варианта каскадной модели (ДКМ)^{/6/}.

2. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА

Дважды на просмотровых столах БПС-75 (в СамГУ) было просмотрено около 14 тыс. стереокадров, полученных при облучении двухметровой пропановой (C_3H_8) камеры ядрами углерода с импульсом 4,2 ГэВ/с на нуклон на синхрофазотроне ОИЯИ. Отобрано 1873 кадра, на котором имелось только по одному первичному взаимодействию в эффективной области камеры. На этих стереоснимках обнаружено 428 звезд с числом заряженных частиц $n_{\pm} \geq 3$, образованных вторичными нейтральными частицами ("n"-звезды). Эффективность двойного просмотра для нахождения первичных звезд составила $\approx 99\%$, за исключением малолучевых ($n_{\pm} \leq 2$) звезд; для них эффективность двойного просмотра оказалась равной 86%. Доля звезд с $n_{\pm} \leq 2$ составила 6% от числа всех первичных звезд, эффективность просмотра для "n"-звезд — 97%.

Методика разделения найденных в эффективном объеме камеры первичных взаимодействий на ^{12}C - и $^{12}\text{C}-^{12}\text{C}$ -события, отбор событий с рождением нейтронов, а также ряд методических поправок, введенных для определения импульсов и эффективности регистрации быстрых нейтронов в исследуемых взаимодействиях, описаны в^{/3, 4, 7/}. В число "n"-звезд, вызванных взаимодействием нейтронов в камере, которые образовались в первичных столкновениях, небольшой вклад



($\leq 3\%$) дают фоновые процессы. Для исследуемых событий имеются два основных источника фона:

- 1) "n"-звезды, вызванные "случайными" нейтральными частицами, не относящимися к первичному взаимодействию;
- 2) "n"-звезды, образованные нейтральными странными частицами, рожденными в первичном взаимодействии. По оценкам эти фоновые процессы дают вклад не более $3\%^{1/4}$.

В нейтральных звездах измерялся полный импульс вторичных заряженных частиц (P_{ch}), импульсы нейтрона принимались равными: $P_n = k P_{ch}$. Здесь k — коэффициент, учитывающий долю энергии, уносимую в среднем нейтральными частицами. Значения k определялись экспериментально по измерению реакции $d + C_3H_8 \rightarrow p_s + X$ ($n_+ \geq 3$). В результате было получено: $k = 1,0$ для $p_n \leq 1$ ГэВ/с; $k = 1,37$ для нейтронов с импульсами $p = 1,7$ ГэВ/с; $k = 1,5$ — для $p > 2$ ГэВ/с^{1/3}.

Найденные при просмотре 1873 первичных события были статистически разделены на неупругие ^{12}Cp - и $^{12}C^{12}C$ -взаимодействия* в соответствии с известными сечениями для этих процессов [$\sigma_{n}^{in} = (250 \pm 5)$ мб и $\sigma_{CC}^{in} = (830 \pm 50)$ мб] и с учетом состава молекулы пропана C_3H_8 (см. табл. 1)^{1/8}.

Таблица 1

Статистика событий по просмотру

Тип взаимодействия	$N_{\text{соб.}}$	N_n^f	N_n^{CT}	N_n^{Y4}
C (C_3H_8)	1873	428 ± 21	222 ± 15	206 ± 14
Cp	835	$88 \pm 9,5$	$60 \pm 7,7$	28 ± 5
CC	1038	340 ± 18	$131 \pm 11,5$	209 ± 15
CC (мн)	201	125 ± 11	61 ± 8	64 ± 8

Для разделения конкретных первичных взаимодействий ядер углерода с протонами и ядрами углерода, в которых зарегистрированы "n"-звезды (428 соб.), использовались следующие критерии отбора:

- 1) $Q = (n_+ - n_-) \geq 8$.
- 2) $n_p \geq 2,3$; $n_p \geq 1,4$; $n_- \geq 3$ ^{1/7}.

Здесь n_+ и n_- — число положительных и отрицательных вторичных частиц в первичной звезде; n_p — число медленных ($P \leq 0,7$ ГэВ/с) протонов и n_p — число протонов, летящих назад в л.с.к. Достаточно выполнения хотя бы одного из этих условий, чтобы отнести событие к $^{12}C^{12}C$ -взаимодействию. События, не удовлетворяющие этим кри-

териям, относились к ^{12}Cp -взаимодействиям. По критериям $1 \div 4$ выделяется (74 ± 3)% из всех $^{12}C^{12}C$ -событий^{1/7}. Оставшиеся 26% $^{12}C^{12}C$ -взаимодействий с "n"-звездами статистически добавлялись к выделенным событиям.

Отличия ядро-ядерных взаимодействий от совокупности нуклон-нуклонных, по-видимому, должны ярче проявляться в каких-то отдельных типах столкновений, в которых участвует большое число протонов и нейтронов падающего ядра. Об этом можно судить по числу нейтронов-спектаторов. Поэтому в настоящей работе, помимо изучения образования быстрых нейтронов во всех $^{12}C^{12}C$ - и ^{12}Cp -взаимодействиях, было изучено образование нейтронов-спектаторов налетающего ядра с $p \geq 3$ ГэВ/с и $\nu_{\text{пл.}} \leq 4^{\circ/7}$. Здесь p_n и $\theta_{\text{пл.}}$ — соответственно импульс и плоский угол вылета нейтрона относительно направления первичной частицы в л.с.к. Остальные вторичные быстрые нейтроны названы нейтронами-участниками. Отметим, что в импульсные и угловые распределения для отобранных спектаторных частиц ($p_n \geq 3$ ГэВ/с и $\theta_{\text{пл.}} \leq 4^{\circ}$) вносят небольшой вклад и нейтроны, образованные в результате, например, упругого рассеяния нуклонов налетающего ядра на нуклонах ядра-мишени, дифракционной диссоциации ядер-снарядов, упругой перезарядки протонов в нейтроны и т.п. Такого рода фон в спектаторной области можно оценить, сопоставляя угловые распределения вторичных нейтронов с $p_n = 1 \div 3$ ГэВ/с и с $p_n \geq 3$ ГэВ/с (см. раздел 3).

Кроме того, отдельно изучалось образование быстрых нейтронов в многонуклонных $^{12}C^{12}C$ (мн)-столкновениях. Для выделения многонуклонных событий использовались условия, предложенные в^{1/7}: $Q = n_+ - n_- \geq 8$, отсутствие многозарядных ($Z \geq 2$) спектаторных фрагментов и число однозарядных спектаторных частиц составляет не более двух.

В таблице 1 приведена статистика событий, использованных в настоящей работе, где $N_{\text{соб.}}$ — число неупругих событий данного типа; N_n^f — число найденных нейтронов с $p_n \geq 1$ ГэВ/с; N_n^{CT} и N_n^{Y4} — соответственно число нейтронов-спектаторов и нейтронов-участников.

Из-за конечных размеров детектора мы не можем зарегистрировать все звезды, вызванные вторичными нейтронами, образованными в неупругих $^{12}C^{12}C$ - и ^{12}Cp -соударениях. Для этого нужно найти соответствующие геометрические веса для каждой "n"-звезды.

Найденные нами^{1/4} сечения для неупругих $n(C_3H_8)$ -взаимодействий ($\sigma_{n(C_3H_8)}^{in}$, $\sigma_{n(C_3H_8)}^{n \geq 3}$) позволяют определить геометрические веса регистрации нейтронов:

$$W = \left[\frac{L_1}{L_2} (1 - \exp(-L_0/L_1)) \right]^{-1},$$

где L_1 — длина свободного пробега нейтрона (с импульсом p_n) в пропане до неупругого взаимодействия (которое выводит его из пучка),

* Упругие ^{12}Cp - и $^{12}C^{12}C$ -взаимодействия в пропановой камере при $P_c = 4,2$ ГэВ/с на нуклон практически не видны^{1/7}.

L_2 — длина свободного пробега нейтрона до образования звезды с $n_{\pm} \geq 3$, L_0 — потенциальная длина пробега нейтрона*. Здесь L_1 и L_2 соответственно равны

$$L_1 = \frac{1}{n \sigma_{n(C_3H_8)}}, \quad L_2 = \frac{1}{n \sigma_{n_{\pm} \geq 3(C_3H_8)}}$$

где n — число молекул пропана в 1 см^3 .

Статистика событий с учетом их весов и поправок на эффективность просмотра и фона приведена в табл. 2. Для каждой группы ^{12}Cp , $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ - и $^{12}\text{C}^{12}\text{C}(\text{мн})$ -событий определялись средние множественности, угловые и импульсные распределения быстрых нейтронов в л.с. координат.

Таблица 2

Статистика событий с учетом весов и поправок

Тип взаимодействия	$N_{\text{об.}}$	$N_n^f(W)$	$N_n^{CT}(W)$	$N_n^{YU}(W)$
C (C_3H_8)	1878	4321 ± 270	1400 ± 110	2921 ± 182
Cp	837	769 ± 90	440 ± 58	329 ± 60
CC	1041	3552 ± 225	960 ± 94	2592 ± 185
CC(мн)	201	1237 ± 114	447 ± 64	789 ± 105

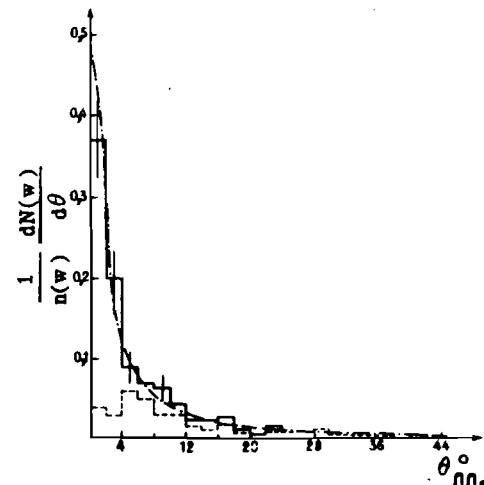
3. МНОЖЕСТВЕННОСТИ, ИМПУЛЬСНЫЕ И УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВТОРИЧНЫХ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ В ^{12}Cp - И $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ $P_c = 4,2 \text{ ГэВ/с}$ на нуклон

Для исследуемых процессов определены средние множественности вторичных нейтронов с $P_{\text{наб}} \geq 1,0 \text{ ГэВ/с}$. Кроме того, были выделены нейтроны-спектаторы с $P_{\text{наб}} > 3 \text{ ГэВ/с}$ и $\theta_{\text{нп.}} \leq 4^\circ$, остальные нейтроны считались нейтронами-участниками. В табл. 3 приведены значения средних характеристик: $\langle N_n^f(W) \rangle$ — всех быстрых нейтронов с $p_n \geq 1 \text{ ГэВ/с}$, $\langle N_n^{CT}(W) \rangle$ — нейтронов-спектаторов, $\langle N_n^{YU}(W) \rangle$ — нейтронов-участников для ^{12}Cp , $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ - и $^{12}\text{C}^{12}\text{C}(\text{мн})$ -взаимодействий.

Следует отметить, что определение числа спектаторных нейтронов более точно, чем — числа спектаторных протонов, в которое могут дать вклад спектаторные дейтроны и тритоны.

* Эта формула несколько отличается от использованной нами в [3,4]. Численная разница в определении W меньше 5%.

Рис. 1. Распределение быстрых нейтронов в $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -взаимодействиях при $4,2 \text{ ГэВ/с}$ на нуклон по углам $\theta_{\text{нп.}}$ в л.с.к. Сплошная гистограмма — все $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -соударения, пунктир — вклад от нейтронов с $P = 1 \div 3 \text{ ГэВ/с}$; штрихпунктирная линия — расчет по ДКМ для всех неупругих $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -взаимодействий.



На рис. 1 приведено угловое распределение быстрых нейтронов ($p_n \geq 1 \text{ ГэВ/с}$), образованных в неупругих $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -взаимодействиях при $p = 4,2 \text{ ГэВ/с}$ на нуклон (сплошная гистограмма). Из рисунка видно, что в области $\theta_{\text{нп.}} \leq 4^\circ$ имеется явный пик в распределении нейтронов, который можно связать с образованием нейтронов-спектаторов. Штриховыми линиями показаны распределения нейтронов с $p_n = 1 \div 3 \text{ ГэВ/с}$. Эти нейтроны в основном образованы в неупругих $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -взаимодействиях и являются нейтронами-участниками. Кроме того, часть нейтронов-участников с $p_n \geq 1 \text{ ГэВ/с}$ имеет $\theta_{\text{нп.}} \leq 4^\circ$ и может дать вклад в спектаторную область. Их вклад определяется в предположении равномерного распределения в области $\theta_{\text{нп.}} \leq 4^\circ$, а доля таких событий по нейтронам с $P = 1 \div 3 \text{ ГэВ/с}$, составляет, $\approx 12\%$.

В табл. 3 для сравнения приводятся в скобках соответствующие $\langle N_p \rangle$ для протонов, образованных в $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -взаимодействиях. Видно, что значение $\langle N_p \rangle$ для протонов систематически выше, чем $\langle N_n \rangle$ для нейтронов. Это можно объяснить тем, что в числе протонов содержится примесь вторичных дейтронов и тритонов^[9]. Здесь же даны значения $\langle N_n \rangle$ для нейтронов, образованных $^{12}\text{C}^{12}\text{C}(\text{мн})$ -взаимодействиях.

Поскольку в $^{12}\text{C}^{12}\text{C}(\text{мн})$ -соударениях участвует больше протонов, чем во всех неупругих $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -взаимодействиях, то это приводит к росту $\langle N_n \rangle$ в $^{12}\text{C}^{12}\text{C}(\text{мн})$ -столкновениях.

Средние множественности нейтронов-участников, полученные в ДКМ, находятся в хорошем согласии с экспериментальными значениями (табл. 3). Некоторое расхождение с ДКМ в среднем числе спектаторных фрагментов отражает некорректность использованного в модели "испарительного" механизма возбуждения ядер, т.е. неприемлимость модели испарения к описанию поведения легкого остаточного ядра при высоком возбуждении^[9].

Таблица 3

Средние множественности быстрых нейтронов ($p_n \geq 1$ ГэВ/с)

Тип взаимодействия	$\langle N_n^f(W) \rangle$	$\langle N_n^{CT}(W) \rangle$	$\langle N_n^{Y4}(W) \rangle$
Ср	$0,9 \pm 0,1$	$0,53 \pm 0,07$	$0,40 \pm 0,07$
СС	$3,4 \pm 0,2$ ($4,1 \pm 0,1$)	$0,9 \pm 0,1$ ($1,18 \pm 0,05$)	$2,50 \pm 0,20$ ($2,9 \pm 0,1$)
СС (ДКМ)	4,00	1,30	2,70
СС (мн)	$6,1 \pm 0,6$	$2,2 \pm 0,3$	$3,9 \pm 0,5$

В скобках — соответствующие N_p для протонов, в которые могут дать вклад $\approx 30\%$ дейтроны и тритоны^{/9/}.

Поскольку ядро углерода имеет одинаковое число нейтронов и протонов, то при их взаимодействии с ядром мишени должно образоваться в среднем примерно одинаковое число нейтронов и протонов-спектаторов ($\langle N_n^{CT} \rangle \approx \langle N_p^{CT} \rangle$). Это справедливо и для ядра-мишени ^{12}C .

В работе^{/9/} получено значение $\langle N_p^{CT}(m) \rangle = 0,61 \pm 0,04$ — среднее число протонов-спектаторов ядра-мишени для рС-взаимодействий при $p = 4,2$ ГэВ/с. Их можно сравнить со значением $\langle N_n^{CT} \rangle$ — средним числом нейтронов-спектаторов ядра-снаряда, образованных в Ср-взаимодествиях, которые получены в данной работе.

Как видно из табл. 3, значение $\langle N_n^{CT} \rangle$ для Ср-взаимодействий в пределах ошибок одинаково со значениями $\langle N_p^{CT}(m) \rangle$, определенными в^{/9/}, т.е. среднее число нуклонов-спектаторов ядра-мишени из рС-взаимодействий равняется к среднему числу нуклонов-спектаторов ядра-снаряда для ^{12}Cp -взаимодействий.

Импульсные спектры нейтронов (участников и спектаторов) в л.с.к. для ^{12}Cp и $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -взаимодействий показаны на рис. 2. Здесь

же приведены результаты расчета по ДКМ для $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -взаимодействий (сплошная линия).

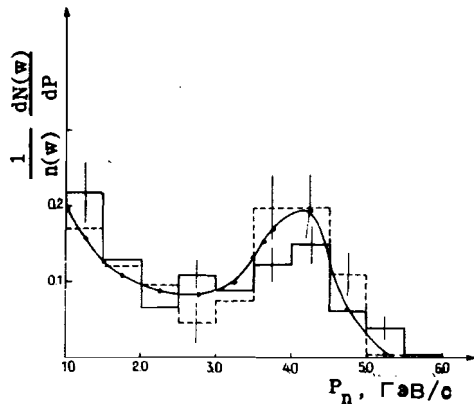


Рис. 2. Импульсное распределение быстрых нейтронов в неупругих ^{12}Cp (----) и $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ (—) взаимодействиях. Кривая — расчет по ДКМ для $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -взаимодействий.

Из рисунка видно, что для ^{12}Cp -соударений больше половины всех нейтронов ($p_n \geq 1$ ГэВ/с) составляют нейтроны-спектаторы, в то время как доля $\langle N_n^{CT} \rangle$ для $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -взаимодействий составляет $\approx 30\%$ (табл. 3).

В распределении для обоих типов взаимодействий виден пик в области 4 ГэВ/с, который можно объяснить образованием нейтронов-спектаторов. Однако он имеет широкие импульсные распределения, что связано с ферми-движением нуклонов в ядре углерода и ошибками измерений.

Спектр нейтронов для $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -взаимодействий по ДКМ (рис. 2) удовлетворительно согласуется с экспериментальным, и наблюдается небольшое расхождение в области нейтронов-спектаторов, что, возможно, связано с неучтенными в модели экспериментальными условиями.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В инклюзивном подходе получены данные о рождении быстрых нейтронов ($p_n \geq 1$ ГэВ/с) в неупругих ^{12}Cp и $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -соударениях, в том числе для $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ (мн)-многонуклонных взаимодействий при $P_c = 4,2$ ГэВ/с на нуклон.

2. Получены данные о зависимости множественности импульсных и угловых распределений нейтронов от массы ядра-мишени ($^{12}\text{C}, p$).

3. Выделены события с образованием нейтронов-спектаторов в неупругих Ср-СС- и СС (мн)-взаимодествиях и получены соответствующие значения $\langle N_n^{CT} \rangle$ для этих типов соударений: $0,53 \pm 0,07$; $0,90 \pm 0,19$; $2,2 \pm 0,3$.

4. Расчеты по ДКМ удовлетворительно согласуются с полученными экспериментальными данными по $^{12}\text{C}^{12}\text{C}$ -взаимодествиям при 4,2 ГэВ/с на нуклон.

Авторы признательны участникам Сотрудничества по исследованию множественных процессов на пропановых пузырьковых камерах за полезные обсуждения и помощь в работе. Нам приятно поблагодарить лаборантов Самаркандского государственного университета за просмотр и измерение событий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dao F.T. et al. — Phys.Rev., 1974, v.D10, p.3588; Blobel V. et al. — Nucl.Phys., 1978, v.B135, p.379; Fortney L.R. et al. — Phys.Rev., 1978, v.D14, p.1190.
2. Баюков Ю.Д. и др. — ЯФ, 1979, т.30, с.1283; ЯФ, 1981, т.34, с.785; ЯФ, 1982, т.35, с.960; ИТЭФ, №4, 1982, №8, М., 1983.
3. Гришин В.Г. и др. — ЯФ, 1983, т.37, с.641; ЯФ, 1984, т.39, с.1212; ЯФ, 1984, т.40, с.1477; ОИЯИ, 1-84-734, Дубна, 1984; ОИЯИ, 1-84-733, Дубна, 1984; ОИЯИ, P1-87-443, Дубна, 1987.

4. Бекмирзаев Р.Н. и др. ОИЯИ, P1-87-652, Дубна, 1987.
5. Армутлийски Д. и др. ОИЯИ, P1-85-939, Дубна, 1985.
6. Гудима К.К., Тонеев В.Д. – ЯФ, 1978, т.27, с.669.
7. Агакишиев Г.Н. и др. ОИЯИ, 1-83-662, Дубна, 1983; ЯФ, 1983, т.38, с.152; ЯФ, 1985, т.30, с.1562.
8. Ангелов Н. и др. – ЯФ, 1980, т.33, с.1046; Бобченко Б.М. и др. ИТЭФ, №15, М., 1979; Гачурин В.В. и др. ИТЭФ, №59, М., 1985.
9. Армутлийски Д. и др. ОИЯИ, P1-86-263, Дубна, 1986.

Бекмирзаев Р.Н. и др. P1-88-192
**Образование быстрых нейтронов ($p_n \geq 1$ ГэВ/с)
 в ^{12}Cp - и ^{12}C ^{12}C -взаимодействиях при 4,2 ГэВ/с на нуклон**

Исследовались множественность, импульсные и угловые характеристики вторичных нейтронов ($p_n \geq 1$ ГэВ/с), образованных во взаимодействиях ядер углерода с ядрами протона и углерода, а также в СС(мн)-многонуклонных соударениях. Они изучались по вторичным нейтральным звездам, образованным нейтронами в 2-метровой пузырьковой камере. Выделены нейтрон-спектаторы (N_n^{CT}) от ядра-снаряда (^{12}C) и нейтроны-"участники" ($N_n^{\text{уч}}$) с $p_n \geq 1$ ГэВ/с. Экспериментальные данные по неупругим СС-взаимодействиям удовлетворительно описываются каскадной моделью ядро-ядерных соударений.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Bekmirzaev R.N. et al. P1-88-192
**The Study of Fast Neutron Production ($p_n \geq 1$ GeV/c)
 in ^{12}Cp and ^{12}C ^{12}C Interactions at $p_c = 4.2$ GeV/c per Nucleon**

Multiplicity, momentum and angular characteristics of secondary fast neutrons ($p_n \geq 1$ GeV/c) in inelastic ^{12}Cp , ^{12}C ^{12}C and ^{12}C ^{12}C (M) interactions have been obtained. These are analysed by the secondary neutral stars generated by neutrons in a 2 m propane bubble chamber. Neutrons-spectators (N_n^{st}) from a projectile-nucleus (^{12}C) and neutrons-"participants" (N_n^{part}) with $p_n \geq 1$ GeV/c have been separated. Experimental data on inelastic CC interactions are satisfactorily described by the cascade model of nuclear collisions.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988

Рукопись поступила в издательский отдел
 23 марта 1988 года.