

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



С3436
Б-732

4/11-75

1 - 8830

2763/2-75

В.И.Богатин, Е.Л.Григорьев, О.В.Ложкин,
А.А.Носов, Ю.П.Яковлев

ОБ УГЛОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЯХ
МЕДЛЕННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В РАСЩЕПЛЕНИЯХ ЯДЕР
ПРОТОНАМИ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

1975

В.И.Богатин,¹ Е.Л.Григорьев, О.В.Ложкин,¹
А.А.Носов, Ю.П.Яковлев

ОБ УГЛОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЯХ
МЕДЛЕННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В РАСЩЕПЛЕНИЯХ ЯДЕР
ПРОТОНАМИ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

¹ Радиевый институт им. В.Г.Хлопина, Ленинград.

² Ленинградский государственный университет
им. А.А.Жданова.

Введение

Вопрос об угловых корреляциях продуктов расщеплений ядер частицами высоких энергий неоднократно обсуждался в литературе ^{/1-8/}. Существующие теоретические предсказания угловой корреляции частиц в ядерных расщеплениях основываются на различных предположениях. Согласно работе ^{/1/} это явление есть следствие взаимодействия частиц в конечном состоянии, в статье ^{/2/} были рассмотрены квантовые корреляции в системе тождественных частиц. Взаимное расположение частиц в процессе распада образуемых в расщеплении возбужденных фрагментов рассматривалось в работах ^{/3,4/}. Приведенные подходы для объяснения явления корреляции частиц свидетельствуют о том, что выяснение его природы существенно для понимания ядерных процессов при высоких энергиях.

Целью настоящей работы являлось исследование случаев испускания вторичных частиц в ядерном расщеплении /которые дальше будем называть "нуклидными струями"/, т.е. случаев коррелированного испускания нескольких частиц в небольшом телесном угле /порядка 10^{-2} ср в данной работе/. В соответствии с результатами ^{/9/}, где обсуждается систематика сечений фрагментации, возникновение таких "нуклидных струй" и образование стабильных фрагментов в расщеплении может быть обусловлено одним и тем же механизмом.

В данной работе с целью получить не зависящее от модельных соображений доказательство существования угловых корреляций частиц типа "нуклидных струй" мы воспользовались тем обстоятельством, что при испускании частиц под углом вблизи 90° к направлению первично-

го пучка реализуется азимутальная симметрия. Следовательно, при случайном распределении частиц по углу взаимного разлета число пар частиц, попадающих в некоторый телесный угол при их "параллельном" испускании - $n_{\uparrow\uparrow}$, должно быть равно числу пар частиц при "антипараллельном" испускании - $n_{\uparrow\downarrow}$. Таким образом, наличие "нуклидных струй" в ядерных расщеплениях будет приводить к увеличению числа $n_{\uparrow\uparrow}$ по сравнению с числом $n_{\uparrow\downarrow}$.

Экспериментальные результаты

В настоящей работе приводятся результаты двух серий измерений, проделанных в 1968 и 1974 годах. Данные измерений 1968 года, выполненных с целью поиска нестабильных фрагментов типа ${}^5\text{Li}$, в свое время опубликованы не были и теперь используются здесь для сопоставления с новыми результатами. Прежние измерения были сделаны в эмульсии П-9ч, облученной протонами с энергиями 460, 660 и 930 МэВ. Новые результаты были получены с помощью эмульсии БР-2, экспонированной в пучках протонов с энергией 610 МэВ и дейтронов с энергией 600 МэВ. Облучения протонов с энергиями 460, 610 и 660 МэВ были выполнены на выведенном пучке синхроциклотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Облучение протонами с энергией 930 МэВ было произведено на синхрофазотроне в Бирмингеме /Англия/, облучение дейтронами - на синхрофазотроне Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Анализ ядерных расщеплений был ограничен только поиском парных корреляций частиц, т.е. рассматривались самые простые "нуклидные струи" из двух заряженных частиц.

Просмотр эмульсий осуществлялся на микроскопах при увеличении 60 х 7. Для обработки отбирались ядерные расщепления, удовлетворяющие следующим критериям:

а/ в расщеплении должна быть хотя бы одна пара следов частиц, угол между которыми в проекции на плоскость эмульсии находится в диапазоне 0 - 20° или 180 - 160° /см. рис. 1/;

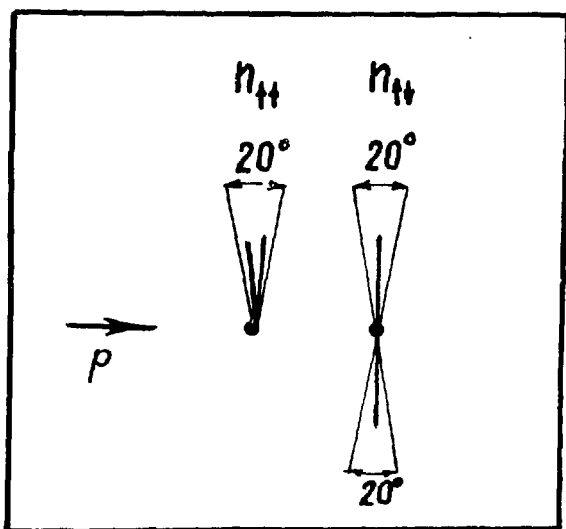


Рис. 1. Схема наблюдения корреляций "параллельного" и "антипараллельного" типов.

б/ длина следов в такой паре в проекции на плоскость эмульсии должна составлять не менее 20 мкм;

в/ угол наклона следов в паре к плоскости эмульсии должен быть не более 40° .

В найденных расщеплениях проводились измерения:

а/ угла между проекциями следов на плоскость эмульсии для частиц "пары"/;

б/ углов между проекцией следов в плоскости эмульсии и направлением пучка протонов;

в/ вертикальных проекций следов "пары" на выбранной базе.

Затем производилось определение пространственного угла между частицами "пары" - угла ϕ .

В случае наличия в расщеплении следа ядра-отдачи измерялся угол в плоскости эмульсии между направлением пучка протонов и следом ядра-отдачи.

В работе 1968 года не производились измерения вертикальных проекций следов и анализ был ограничен углами

в плоскости эмульсии. Указанным критериям отбора удовлетворяло следующее число событий:

249 звезд с ядром отдачи /расщепления ядер Ag и Вг /	- 460 МэВ,
1450 звезд	- 610 МэВ,
522 звезды с ядром отдачи	- 660 МэВ,
206 звезд с ядром отдачи	- 930 МэВ.

Для отобранных расщеплений было проведено определение величин отношений $n_{\uparrow\uparrow}/n_{\uparrow\downarrow}$ при ограничении угла разлета значениями $\phi \leq 20^\circ$. При этом, помимо основного случая, когда рассматривались только частицы, составляющие угол $\theta = 90 \pm 10^\circ$ с падающим пучком протонов /рис. 1/, измерялось отношение числа "параллельного" и "антипараллельного" испускания двух частиц в расщеплении для всех углов θ при том же ограничении угла ϕ .

В таблице представлены полученные отношения $n_{\uparrow\uparrow}/n_{\uparrow\downarrow}$. Эти отношения при всех энергиях протонов существенно превышают единицу, что свидетельствует о неслучайном парном коррелировании частиц в ядерных расщеплениях и позволяет сделать вывод о существовании "нуклидных струй". Измерения под другими углами θ дали подобные же результаты.

Отобранные по указанным выше критериям звезды необходимо было сопоставить с характеристиками расщеплений, полученных в других работах. Это сопоставление, проведенное для расщеплений, вызванных протонами с энергией 660 МэВ, показало, что примененные критерии отбора расщеплений не внесли каких-либо заметных изменений в глобальные характеристики звезд. Так, угловое распределение вторичных частиц в отобранных расщеплениях характеризуется анизотропией $F/B = 1,33 \pm 0,05$ / F/B - отношение чисел частиц, испускаемых в переднюю и заднюю полусферы относительно направления протонов/.

По данным работ ^{/3,10/} это отношение F/B равно примерно 1,4. Угловое распределение ядер отдачи относительно падающих протонов в отобранных расщеплениях характеризуется анизотропией $F/B = 2,74 \pm 0,27$. По данным работы ^{/3/} анизотропия ядер отдачи равна $3,12 \pm 0,47$.

Таблица

Экспериментальные отношения $\Pi_{\alpha\alpha}/\Pi_{\beta\beta}$

Угол регистрации "нуклид- ной струи" Θ	Ер (МэВ)				МэВ
	460	610	660	930	600
$90^\circ \pm 10^\circ$	7 ± 3	$2,3 \pm 0,2$	$2,31 \pm 0,47$	$1,63 \pm 0,42$	
все углы	$2,55 \pm 0,4$	$3,0 \pm 0,5$	$2,1 \pm 0,2$	$1,8 \pm 0,2$	$2,2 \pm 0,4^*)$

*) предварительные результаты по взаимодействию дейтронов с энергией 600 МэВ.

Определенный интерес представляло сопоставление характеристик ядерных расщеплений, содержащих "нуклидные струи", с расщеплениями, содержащими обычные стабильные фрагменты, поскольку обнаруженное выше коррелирование вторичных заряженных частиц может возникать при образовании в ядерном расщеплении нестабильных или возбужденных фрагментов или быть следствием того, что кластер или локальное возбуждение /экситон/, двигаясь по ядру, распадается на несколько частиц, движущихся с близкими скоростями и независимо друг от друга, что приводит к испусканию из ядра скоррелированных по углу частиц^{/9/}.

Сравнение расщеплений с "нуклидными струями" и расщеплений с фрагментами, имеющими заряд ≥ 3 , было проведено по следующим характеристикам: по распределению числа частиц n_p в расщеплениях /рис. 2/, по угловому распределению остаточных ядер /рис. 3/, по угловому распределению "нуклидных струй" и фрагментов относительно остаточных ядер /рис. 4/, по угловому распределению "нуклидных струй" и фрагментов относительно падающих протонов /рис. 5/, по угловым распределениям легких частиц относительно направлений падающего протона и остаточного ядра в расщеплениях с "нуклидными струями" и с фрагментами, по распределению длин следов остаточных ядер /рис. 6/, по вероятности наблюдения одной и двух "нуклидных струй" в одном расщеплении, по анизотропии углов разлета двух "нуклидных струй" в одном расщеплении, по угловому распределению легких частиц, включая частицы нуклидной струи, относительно остаточных ядер. Следует отметить, что при проведении данного анализа рассматривались все случаи расщеплений, в которых имелись две заряженные частицы, испускаемые в одном направлении и имеющие угол взаимного разлета $\phi \leq 20^\circ$. При этом за направление движения "нуклидных струй" принималось направление биссектрисы угла между двумя частицами из-за невозможности без идентификации частиц выделить направление движения центра масс компонент струи.

Рассмотрение данных, приведенных на рис. 2-6, показывает, что по всем проанализированным

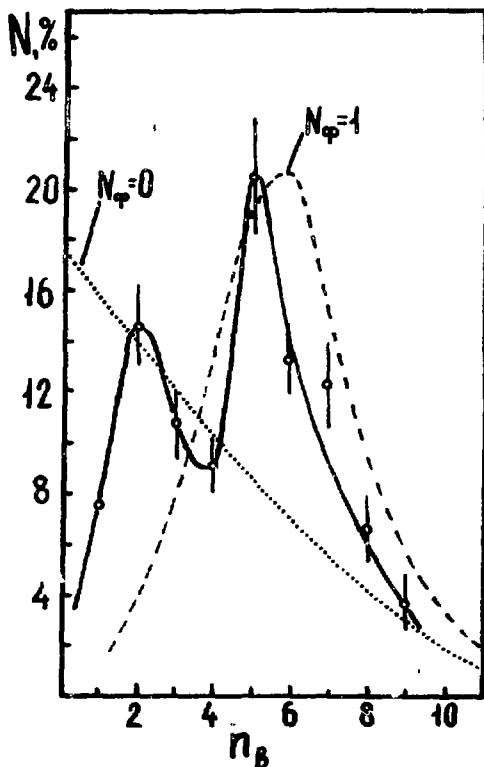


Рис. 2. Распределение расщеплений ядер в фомозмульсии (Ag, Br) по числу черных следов 137 . Сплошная линия - данные настоящей работы; точечная кривая - расщепления без фрагментов; пунктир - с одним фрагментом.

характеристикам расщепления с "нуклидными струями" обнаруживают сходство с расщеплениями, содержащими среди вторичных продуктов фрагмент с $z \geq 3$.

Приведенная на рис. 2 зависимость вероятности наблюдения "нуклидных струй" от числа частиц n_b в расщеплении показывает, что, кроме максимума при $n_b = 5$,

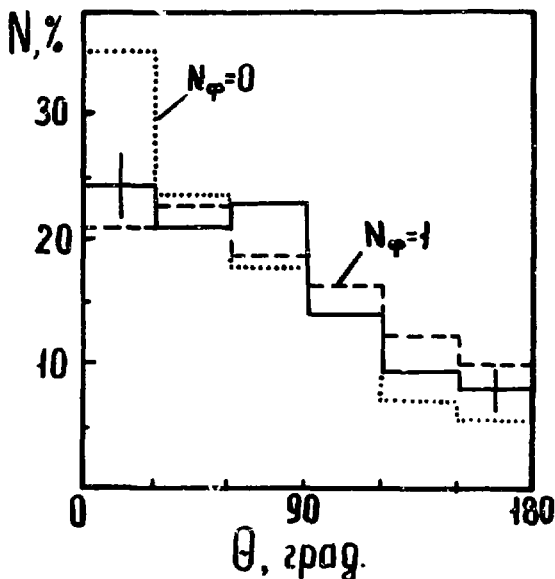


Рис. 3. Угловое распределение остаточных ядер в расщеплениях с медленными фрагментами /пунктирная линия/ и без фрагментов /точечная линия/ ¹⁸. Сплошная линия - данные настоящей работы.

который совпадает с максимумом распределения для расщеплений с фрагментами, имеется второй максимум, обусловленный, вероятно, случайным угловым коррелированием частиц.

В работе ^{11/} было показано, что вероятности образования одного (p_1) и n фрагментов (p_n) в одном расщеплении связаны соотношением: $p_n = p_1^n$. Это соотношение было проверено для случая испускания двух "нуклидных струй" в одном расщеплении при $E_p = 660$ МэВ. Для соответствующих вероятностей было найдено:

$$P_1 = 0,11 \pm 0,02; \quad P_2 \geq 0,007 \pm 0,002; \quad P_1^2 = 0,012.$$

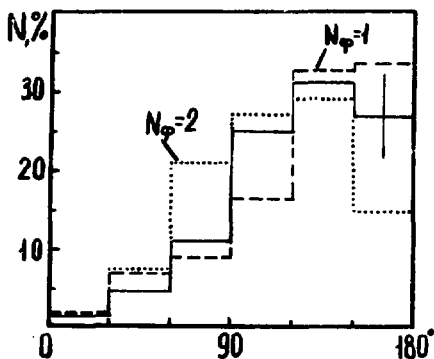


Рис. 4. Угловое распределение фрагментов с $z \geq 4$ относительно направления остаточных ядер /пунктирная линия $N_{\phi} = 1$, точечная - $N_{\phi} = 2$ /. Сплошная линия - угловое распределение "нуклидных струй".

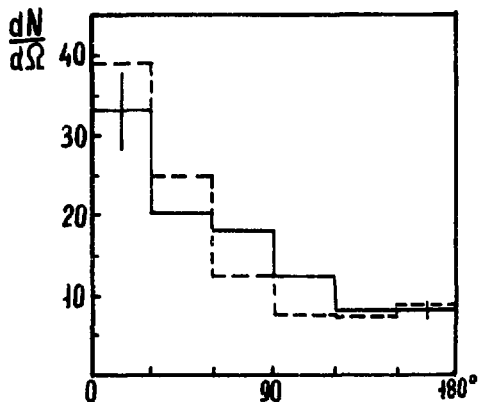


Рис. 5. Угловое распределение фрагментов с $z \geq 4$ относительно падающего протона /пунктирная линия/. Сплошная линия - угловое распределение "нуклидных струй" - данные настоящей работы.

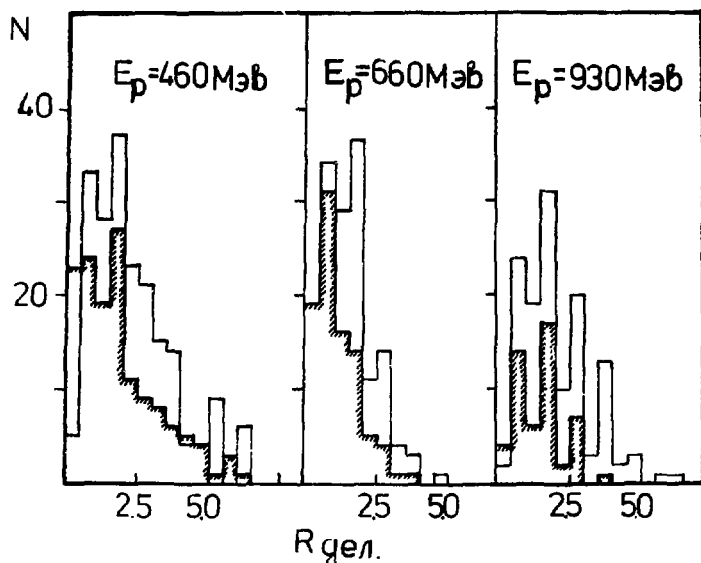


Рис. 6. Распределение пробегов остаточных ядер в расщеплениях с "нуклидными струями" /сплошная линия/ и без "нуклидных струй" /штриховая линия/.

Аналогичные соотношения выполнялись и при других энергиях протонов.

Для величины анизотропии (B/F) углового распределения легких частиц в расщеплениях с "нуклидными струями" относительно направления остаточных ядер были найдены значения $1,2 \pm 0,12$; $1,15 \pm 0,07$ и $1,16 \pm 0,11$ при $E_p = 460$, 660 и 930 МэВ соответственно. Для расщеплений со стабильными фрагментами эта анизотропия для легких частиц составляет величину $1,2^{1/3}$.

Для расщеплений, в которых наблюдалось испускание двух "нуклидных струй", было определено отношение числа случаев, когда угол между струями больше 90° , к числу случаев, когда угол между струями меньше 90° . Это отношение оказалось равным $0,9 \pm 0,4$ при $E_p = 460$ МэВ, $1,08 \pm 0,2$ при $E_p = 660$ МэВ и $1,25 \pm 0,42$ при

$E_p = 930 \text{ МэВ}$. Соответствующие отношения при образовании двух фрагментов в одном расщеплении равны $0,9 \pm \pm 0,45$ и $1,31 \pm 0,28$ при энергиях 660 и 930 МэВ соответственно.

Указанные величины анизотропии угловых распределений достаточно близки в расщеплениях с "нуклидными струями" и с фрагментами. Приведенные на рис. 6 распределения остаточных ядер по пробегу показывают большую величину их среднего пробега в тех расщеплениях, где есть "нуклидные струи", подобно тому, что наблюдается в расщеплениях с фрагментами.

Определение экспериментального значения полного сечения образования "нуклидных струй" в расщеплениях ядер Ag и Bg дает величину около $30 \pm 70 \text{ мб}$ при энергии протонов $610-660 \text{ МэВ}$. Как известно, сечение образования стабильных фрагментов с $z \geq 4$ составляет при этой энергии величину $10 \pm 3 \text{ мб}^{12/}$. По формуле для полных сечений образования вторичных частиц, приведенной в работе ^{9/}, можно было оценить сечение "нуклидных струй", обусловленных распадом фрагментов 5Li , ${}^6Li^*$, 7Li , 7Be , 8Be . Оно оказалось равным примерно 50 мб при энергии протонов 660 МэВ , что близко к экспериментальной величине.

Приведенные выше экспериментальные данные в совокупности подтверждают предположение о связи коррелирования частиц в ядерных расщеплениях с явлением фрагментации.

Формула ^{3/} в работе ^{9/} позволяет оценить сечение образования системы из двух протонов /"бипротона"/, которую мы определили следующими параметрами: $R_2 = 2,5 \text{ ферми}$, $t = 1$, $t_3 = -1$, $s = 0$.

Опираясь на известное сечение образования дейтронов из ядер Ag , приведенное в работе ^{14/}, можно получить оценку сечения образования коррелированных пар протонов /испускаемых под одним углом с близкими энергиями/. Это сечение оказалось примерно равным $0,01 \text{ мб}$ для случая взаимодействия протонов 660 МэВ с ядрами Ag , Bg .

Указанную величину можно было сопоставить с имеющимися у нас экспериментальными данными, полученными еще в 1960 году. Тогда при просмотре ядерных эмульсий, облученных протонами с энергией 300 и

660 МэВ, на 119 и 186 расщеплений с фрагментами с $z \geq 4$ было обнаружено по одному случаю, в которых наблюдалось испускание двух протонов под углом $\theta_{\text{лаб}} = 90^\circ$ с одинаковыми энергиями 5,6 МэВ в первом случае и 5,4 МэВ во втором случае в одном направлении /угол между треками протонов составлял $\leq 1^\circ$ /. Оценка сечения для данных событий дает величину $\sigma(p,p) = 0,06$ мб, что не противоречит оценке по формуле /3/, выполненной для тех же условий регистрации. Сейчас трудно сказать, с каким явлением мы имеем дело в данном случае, однако заслуживает внимания довольно большая величина сечения образования коррелированных пар протонов.

Интересным с этой точки зрения является вопрос о возможном происхождении как корреляций, так и фрагментов в результате "слипания" случайно распределенных независимо испущенных нуклонов /механизм типа Батлера-Пирсона^{/13/}/. В этом случае, если угловое распределение "исходных" нуклонов описывается функцией $W(\theta)$, то для "слипания" m_2 частиц, вылетающих в малый телесный угол ω , вероятность будет пропорциональна $\omega^{m_2} \{W(\theta)\}^{m_2}$. При аппроксимации $W(\theta)$ зависимостью $W(\theta) = (1 + \kappa \cos \theta)$ для отношения чисел корреляций частиц, испускаемых в переднюю и заднюю полушеры, должна иметь место формула

$$F/V = \frac{(1 + \kappa)^{m_2 + 1} - 1}{1 - (1 - \kappa)^{m_2 + 1}} \quad /6/$$

т.е. при $\kappa < 1$ F/V есть быстро и монотонно растущая функция m_2 . Однако для фрагментов тяжелее ${}^4\text{He}$, как показано, например, в работе /14/, величина F/V практически не зависит от m_2 . Таким образом, механизм "слипания", по-видимому, не может быть пригоден для описания процесса образования сложных частиц и корреляций.

Заключение

Проведенное изучение расщеплений ядер в эмульсии протонами с энергиями 460, 610, 660 и 930 МэВ и дейт-

ронами с энергией 660 МэВ показывает, что в ядерных расщеплениях действительно имеет место неслучайное коррелирование частиц по углу разлета. Характеристики расщеплений с такими "нуклидными струями" оказываются сходными с соответствующими характеристиками расщеплений, содержащих фрагменты. Это обстоятельство указывает на возможную связь между фрагментацией и испусканием нуклидных струй. Очевидная необходимость учитывать образование в ядерных расщеплениях возбужденных или нестабильных фрагментов, вытекающая из результатов работы /9/, может служить указанием на возможную причину сходства характеристик образования стабильных фрагментов и "нуклидных струй". Этот вопрос кажется тем более важным, что оценка доли расщеплений с "нуклидными струями" приводит в случае предполагаемого механизма испускания "нуклидных струй" к существенному повышению полного сечения фрагментации.

В заключение авторы выражают благодарность М.И.Подгорецкому и Г.И.Копылову за обсуждение ряда вопросов, затронутых в данной работе, Н.А.Бессоновой, Г.А.Глебовой, Е.С.Изосимовой, О.А.Кончëновой, В.П.Румянцевой за помощь в просмотре фотозмультсий.

Литература

1. А.Б.Мигдал. ЖЭТФ, 28, 310 /1955/.
2. В.Г.Гришин и др. ЯФ, 13, 1116 /1971/.
3. С.А.Азимов и др. Изв. АН УзССР. сер. физ., №96, 35 /1963/.
4. С.А.Азимов и др. ЯФ, 7, 332 /1968/.
5. С.А.Азимов и др. Изв. АН УзССР, сер. физ., № 2, 50 /1964/.
6. Ф.Г.Лепёхин, Б.Б.Симонов. Препринт ФТИ-351, Л., 1971.
7. Т.Р.Siemiarzszak, P.Zielinski. Phys.Lett., 248, 675 (1967).
8. С.А.Азимов и др. ЯФ, 19, 317 /1974/.
9. В.И.Богатин и др. Сообщение ОИЯИ, 1-8715, Дубна, 1975.
10. В.И.Остроумов, Р.А.Филов. ЖЭТФ, 37, 643 /1959/.
11. П.А.Горичев и др. ЖЭТФ, 41, 327 /1961/.

12. *Н.А.Перфилов и др. Ядерные реакции под действием частиц высоких энергий. Изд. АН СССР, 1962.*
13. *S. T. Butler, C. A. Person. Phys. Rev. Lett., 7, 69 (1961).*
14. *E. K. Hyde et al. Phys. Rev., 4C, 1759 (1971);
Phys. Rev., 3C, 882 (1971).*

Рукопись поступила в издательский отдел
25 апреля 1975 года.