

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



31/111 - 78

Б-441

1 - 11480

3189/2-78

А.А.Бельков, С.А.Бунятов, Б.Ж.Залиханов,
В.С.Курбатов, А.Халбаев

МАТРИЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ РЕАКЦИИ $\pi^- p \rightarrow \pi^0 \pi^0 n$
ВБЛИЗИ ПОРОГА

1978

А.А.Бельков,* С.А.Бунятов, Б.Ж.Залиханов,
В.С.Курбатов, А.Халбаев**

МАТРИЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ РЕАКЦИИ $\pi^- p \rightarrow \pi^0 \pi^0 n$
ВБЛИЗИ ПОРОГА

Направлено в ЯФ

* Институт физики высоких энергий, Серпухов.

** Институт ядерной физики АН УзССР, Ташкент.

Матричный элемент реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ вблизи порога

Получен феноменологический матричный элемент, который позволяет описать спектры γ -квантов от реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ вблизи порога. Матричный элемент имеет вид

$$M^2 = |1 + A(\vec{p}_{\pi^-}^* \cdot \vec{p}_n^*)|^2 + B |(\vec{p}_{\pi^-}^* \cdot \vec{p}_n^*) \vec{p}_n^*|^2$$

При энергии 270 МэВ $A = 0.5 \text{ м}^{-1}$; $B = 4 \text{ м}^{-1}$. Эффективности регистрации γ -квантов от реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$, рассчитанные с новым матричным элементом, согласуются с показаниями черенковских счетчиков в разной геометрии. Полное сечение реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ при энергии 270 МэВ равно (0.26 ± 0.02) мб. Проведен изотопический анализ реакции $\pi N \rightarrow \pi N$ при этой энергии. Отношение изотопических амплитуд $X = F_{10} / F_{32}$ равно 4.4 ± 0.4 .

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Belkov A.A. et al.

Matrix Element for the $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ Reaction near the Threshold I - 11480

The phenomenological matrix element which allows one to describe the γ -spectra from the $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ reaction near the threshold is obtained. It has the following form:

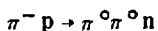
$$M^2 = |1 + A(\vec{p}_{\pi^-}^* \cdot \vec{p}_n^*)|^2 + B |(\vec{p}_{\pi^-}^* \cdot \vec{p}_n^*) \vec{p}_n^*|^2$$

At 270 MeV $A = 0.5 \text{ м}^{-1}$; $B = 4 \text{ м}^{-1}$. The efficiencies of the registration of the γ from the $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ reaction, calculated with the new matrix element, are in accordance with the Cerenkov counter data obtained at different geometries. The total cross-section of the reaction $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ at 270 MeV is equal to (0.26 ± 0.02) mbr. The isotopic analysis of $\pi N \rightarrow \pi N$ reaction at this energy is performed. The isotopic amplitudes ratio $X = F_{10} / F_{32}$ is equal to 4.4 ± 0.4 .

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

В работе ^{/1/} изучались спектры γ -квантов от реакции



/1/

при энергии 270 МэВ.

Экспериментальная установка состояла из двух пар черенковских γ -спектрометров ^{/2/}, \check{C}_1, \check{C}_2 и \check{C}_3, \check{C}_4 , лежащих на одной прямой, по разные стороны от жидководородной мишени. Измерения проводились в двух геометриях. В геометрии I обе пары спектрометров располагались под углами 90° к направлению пучка; в геометрии II пара \check{C}_1, \check{C}_2 - под углом 120° , а пара \check{C}_3, \check{C}_4 - под углом 60° к пучку. Схематический вид экспериментальной установки показан на рис. 1.

Полученные экспериментальные данные сравнивались с результатами моделирования в предположении о постоянстве матричного элемента реакции /1/. Расчеты проводились методом Монте-Карло с точностью до 1%.

Реакция /1/ выделялась по $\gamma\gamma$ -совпадениям в следующих комбинациях черенковских спектрометров: $(\check{C}_1 + \check{C}_3)$, $(\check{C}_1 + \check{C}_4)$, $(\check{C}_2 + \check{C}_3)$, $(\check{C}_2 + \check{C}_4)$. Углы между направлениями γ -квантов, регистрируемых комбинациями $(\check{C}_1 + \check{C}_3)$ и $(\check{C}_2 + \check{C}_4)$, равны $180^\circ \pm 14^\circ$, а комбинациями $(\check{C}_1 + \check{C}_4)$ и $(\check{C}_2 + \check{C}_3)$ - $156^\circ \pm 14^\circ$. В обеих геометриях экспериментальные спектры γ -квантов от реакции /1/ существенно мягче, чем расчетные. Кроме того, в обеих геометриях число $\gamma\gamma$ -совпадений в комбинациях спектрометров, находящихся под углом 180° , на 20% больше,

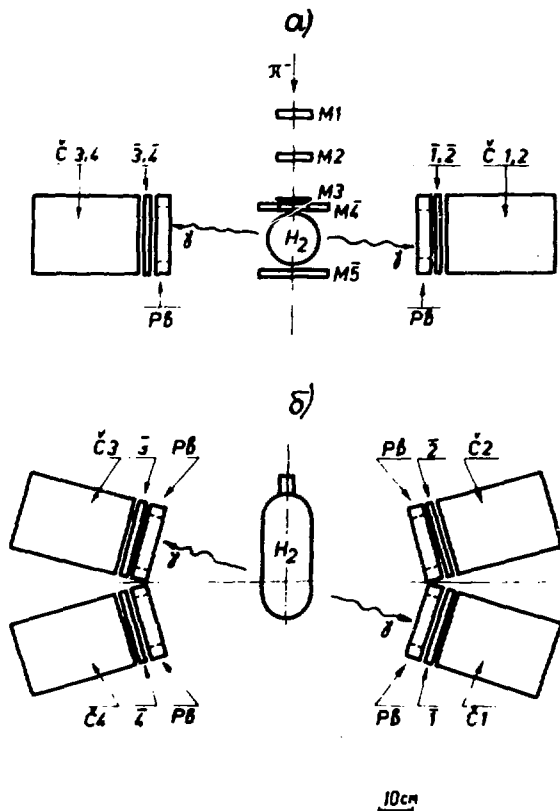


Рис. 1. Схематический вид экспериментальной установки: а/ вид сверху; б/ вид со стороны пучка.

чем счет в комбинациях под углом 156° , в то время как расчетные эффективности регистрации двух γ -квантов для разных комбинаций совпадают в пределах точности вычислений. Эффективности регистрации реакции $^1/$ по $\gamma\gamma$ -совпадениям, рассчитанные при постоянном матричном элементе, использовались для вычисления полного сечения реакции. Полученное таким образом полное сечение реакции $^1/$, усредненное по трем сеансам,

$\sigma = /0,32 \pm 0,04/$ мб; ошибка измерений определялась по дисперсии результатов измерений сечения в трех сеансах.

Таким образом, в работе /1/ показано, что спектры γ -квантов и эффективности экспериментальной установки к регистрации $\gamma\gamma$ -совпадений от реакции /1/ не описываются постоянным матричным элементом. В данной работе рассматривается возможность описания наблюдаемого спектра γ -квантов от реакции /1/ за счет введения в матричный элемент угловых корреляций нейтрона и π^0 -мезонов.

Угловые зависимости матричного элемента реакции /1/ вводились как линейные добавки к константе соответствующих скалярных произведений импульсов:

$$\vec{p}_{\pi_1^*}^* \cdot \vec{p}_{\pi_2^*}^* = p_{\pi_1^*}^* p_{\pi_2^*}^* \cos \theta_{\pi_1^* \pi_2^*}^* \quad /2/$$

$$\vec{p}_{\pi^-}^* \cdot \vec{p}_n^* = p_{\pi^-}^* p_n^* \cos \theta_{n, \pi^-}^* \quad /3/$$

$$\{ (\vec{p}_{\pi_1^*}^* - \vec{p}_{\pi_2^*}^*) \cdot \vec{p}_n^* \}^2 = F(E_n^*) (\cos \theta_{\pi_1^* \pi_2^*}^*)^2 \quad /4/$$

Здесь звездочки указывают на то, что соответствующие углы и импульсы берутся в общей с.ц.и., $\theta_{\pi^0 \pi^0}^*$ - угол вылета нейтрона в с.ц.и. двух π^0 -мезонов относительно импульса одного из π^0 -мезонов, а

$$F(E_n^*) = \frac{E_n^{*2} (E_n^{*2} - m_n^2) (s - 2\sqrt{s} E_n^* + m_n^2 - 4m_{\pi^0}^2)}{s - 2\sqrt{s} E_n^* + m_n^2} \quad /5/$$

зависит только от полной энергии нейтрона в общей с.ц.и. Добавки второго порядка по импульсам описывают следующие угловые зависимости матричного элемента: член /2/ - зависимость от угла разлета π^0 -мезонов в общей с.ц.и.; член /3/ - анизотропию углового распределения нейтрона в той же системе. Член четвертого порядка по импульсам /4/ описывает анизотропию углового распределения нейтрона в с.ц.и. двух π^0 -ме-

зонов. Четвертый порядок обусловлен требованием симметрии матричного элемента реакции /1/ относительно перестановки π_1^0 - и π_2^0 - мезонов в конечном состоянии.

Моделирование показало, что введение в матричный элемент добавки /2/ слабо влияет на спектры γ -квантов и значения эффективностей в обеих геометриях. Результаты расчетов эффективностей регистрации двух γ -квантов с матричным элементом, содержащим зависимость от угла $\theta_{\pi_1^0 \pi_2^0}^*$, отличались не более чем на 5% от прежних расчетов с постоянным матричным элементом, причем эффективности для разных комбинаций спектрометров совпадали в пределах точности вычислений. По этой причине член /2/ был отброшен, и в дальнейшем моделирование проводилось с матричным элементом, содержащим только добавки /3/ и /4/ к константе. После квадрирования матричного элемента члены выше четвертого порядка по импульсам отбрасывались, а константа нормировалась на единицу. Квадрат матричного элемента, полученный таким образом, имел вид

$$M^2 = \{1 + A(\vec{p}_{\pi^-}^* \cdot \vec{p}_n^*)\}^2 + B\{(\vec{p}_{\pi_1^0}^* - \vec{p}_{\pi_2^0}^*) \vec{p}_n^*\}^2. \quad /6/$$

Моделирование с квадратом матричного элемента /6/ дает наилучшее описание спектров γ -квантов от реакции /1/ при значениях параметров $A = 0,5 m_\pi^{-2}$ и $B = 4 m_\pi^{-4}$. При этом эффективности регистрации двух γ -квантов для комбинаций спектрометров, находящихся под углом 180° , на 15% больше эффективностей регистрации для комбинаций спектрометров, находящихся под углом 156° . В среднем же эффективности регистрации на 20% больше, чем в расчетах с постоянным матричным элементом.

На рис. 2 и 3 экспериментальные спектры γ -квантов сравниваются с результатами моделирования с постоянным матричным элементом и матричным элементом /6/. Получено удовлетворительное описание спектров γ -квантов от реакции /1/ в геометрии I. Для геометрии II описание γ -спектров получено только для пары спектрометров \check{C}_3 , \check{C}_4 , хотя и для пары \check{C}_1 , \check{C}_2 спектры γ -квантов значительно мягче, чем в расчетах с постоянным матричным элементом.

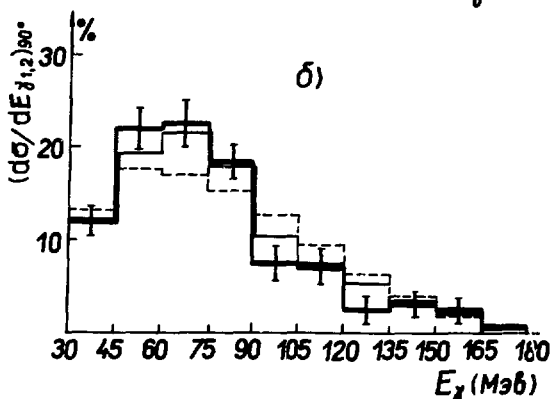
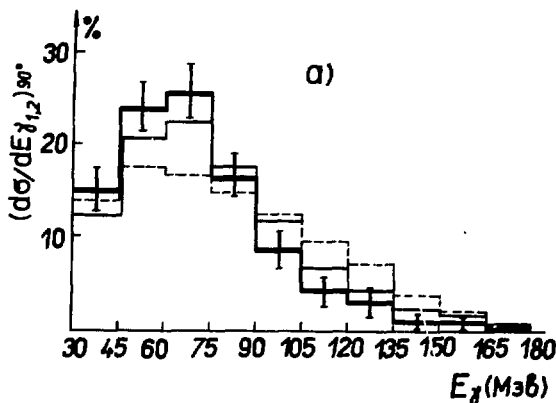


Рис. 2. Спектр γ -квантов от реакции $\pi^- p + \pi^0 \pi^0 p$. Геометрия 1. Сплошная линия с нанесенными на нее ошибками - эксперимент; пунктир - расчеты с постоянным матричным элементом M_1 ; тонкая сплошная линия - расчеты с матричным элементом M_2 /б/ при $A=0,5 m_\pi^{-2}$ и $B=4 m_\pi^{-4}$. а/ $\theta_\gamma = 90^\circ$, $\gamma\gamma$ -совпадения в комбинациях $(C_1 + C_3)$ и $(C_2 + C_4)$. M_1 : $\chi^2/\bar{\chi}^2 = 10,6$, C.L. < 1%; M_2 : $\chi^2/\bar{\chi}^2 = 1,2$, C.L. $\sim 20\%$. б/ $\theta_\gamma = 90^\circ$, $\gamma\gamma$ -совпадения в комбинациях $(\check{C}_1 + \check{C}_4)$ и $(\check{C}_2 + \check{C}_3)$. M_1 : $\chi^2/\bar{\chi}^2 = 5$, C.L. < 1%; M_2 : $\chi^2/\bar{\chi}^2 = 0,9$, C.L. $\sim 50\%$.

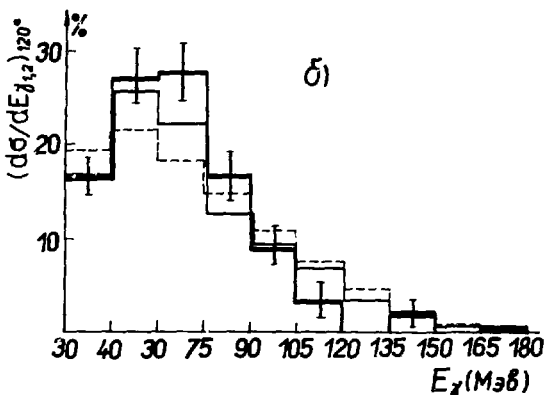
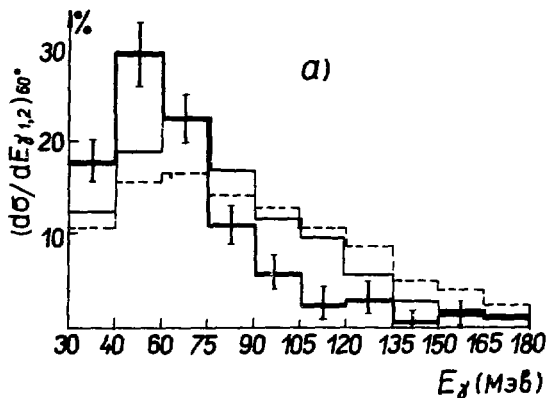


Рис. 3. Спектр γ -квантов от реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^0 \pi^0 n$. Геометрия II. Сплошная линия с нанесенными на нее ошибками - эксперимент; пунктир - расчеты с постоянным матричным элементом M_1 ; тонкая сплошная линия - расчеты с матричным элементом $M_2/6$ при $A = 0,5 m_\pi^{-2}$ и $B = 4 m_\pi^{-4}$. $a/\theta_\gamma = 60^\circ$, спектрометры ζ_1 и ζ_2 при $\gamma\gamma$ -совпадениях в комбинациях $(C_1 + C_3)$ и $(C_2 + C_4)$. $M_1: \chi^2/\bar{\chi}^2 = 34$, C.L. < 1%; $M_2: \chi^2/\bar{\chi}^2 = 5$, C.L. < 1%. $b/\theta_\gamma = 120^\circ$, спектрометры ζ_3 и ζ_4 при $\gamma\gamma$ -совпадениях в комбинациях $(C_1 + C_3)$ и $(C_2 + C_4)$. $M_1: \chi^2/\bar{\chi}^2 = 5,5$, C.L. < 1%; $M_2: \chi^2/\bar{\chi}^2 = 1,4$, C.L. $\sim 15\%$.

В табл. 1 сравниваются результаты вычисления полного сечения реакции /1/ при постоянном матричном элементе с новым расчетом полного сечения. Полное сечение реакции /1/, усредненное по трем сеансам, равно $\sigma = /0,26 \pm 0,02/ \text{ мб.}$

Угловые распределения нейтрона, соответствующие вводимым в матричный элемент угловым корреляциям, показаны на рис. 4.

В настоящее время отсутствуют прямые измерения спектров и угловых распределений нейтронов в реакции /1/. Поэтому полученные результаты имеют особый интерес, т.к. позволяют извлечь эту информацию косвенным путем из данных о спектрах γ -квантов от той же реакции. Эти результаты должны рассматриваться как серьезное указание на то, что матричный элемент реакции /1/ при энергии 270 МэВ существенно отличается от постоянного. Именно это обстоятельство служит главной причиной того, что экспериментальный спектр γ -квантов оказывается значительно мягче спектра, рассчитанного в предположении о постоянстве матричного элемента. Это утверждение кажется тем более обоснованным, что даже столь грубое введение угловых корреляций позволило одновременно со смягчением γ -спектров получить наблюдаемые в эксперименте различия эффективностей регистрации $\gamma\gamma$ -совпадений в разных комбинациях спектрометров.

Анализ реакции $\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^- n$ при близких энергиях /3/ показал, что отличия экспериментальных распределений от рассчитанных при постоянном матричном элементе в основном связаны с угловыми корреляциями вторичных частиц. В частности, наблюдаемое энергетическое распределение нейтронов может быть объяснено угловой корреляцией вторичных π^+ - и π^- -мезонов. В данной работе аналогичный член /2/ был отброшен ввиду его слабого влияния на спектры γ -квантов.

Отсутствие описания спектра γ -квантов для пары спектрометров \check{C}_1, \check{C}_2 в геометрии II может быть связано с ограниченностью самой параметризации /6/.

В табл. 2 приведены результаты изотопического анализа реакций $\pi N \rightarrow \pi \pi N$ при энергии 270 МэВ /1/ с но-

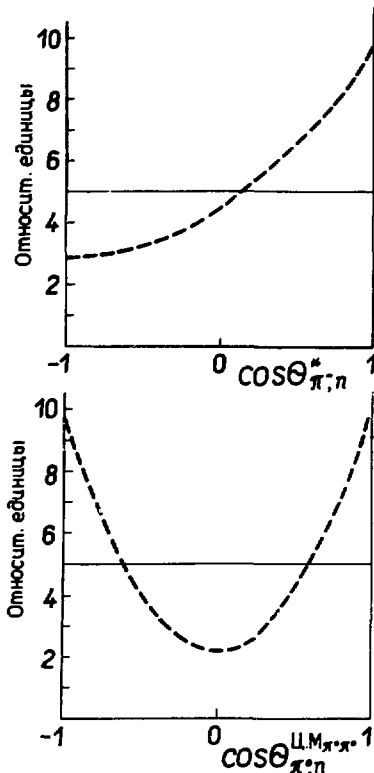


Рис. 4. Угловые распределения нейтрона. Сплошная линия - постоянный матричный элемент; пунктир - расчеты с матричным элементом /6/ при $A = 0,5 \text{ м}^{-2}$ и $B = 4 \text{ м}^{-4}$.

вым экспериментальным значением сечения канала реакции /1/. В результате фитирования получены следующие значения изотопических амплитуд в единицах $\text{мб}^{1/2}$: $F_{10} = 1,35 \pm 0,05$, $F_{32} = 0,31 \pm 0,03$, $F_{31} = 0,28 \pm 0,11$, $F_{11} = 0,43 \pm 0,32$. Отношение амплитуд $X = F_{10} / F_{32}$ при энергии 270 МэВ /кинетическая энергия в общей с.ц.и. - 83 МэВ/ равно $4,4 \pm 0,4$. Полученные результаты согласуются с результатами работы /6/, где был проведен изотопический анализ реакций неупругого пион-нуклонного рассеяния в интервале энергий 300-500 МэВ.

Таблица 1

Комбинации	Секция № 1, $I_{\text{геом.}} M = 4,1 \times 10^9$			Секция № 2, $I_{\text{геом.}} M = 4,3 \times 10^9$			Секция № 3, $I_{\text{геом.}} M = 4,1 \times 10^9$		
	$N_{\text{г.г.г.г.}}$	$\sigma, \text{ мб}$		$N_{\text{г.г.г.г.}}$	$\sigma, \text{ мб}$		$N_{\text{г.г.г.г.}}$	$\sigma, \text{ мб}$	
		M_1	M_2		M_1	M_2		M_1	M_2
$C_1 + C_3$	360	0,41	0,27	276	0,36	0,27	365	0,41	0,27
$C_1 + C_4$	249	0,29	0,24	191	0,22	0,22	266	0,34	0,27
$C_2 + C_3$	229	0,26	0,23	180	0,22	0,21	-	-	-
$C_2 + C_4$	384	0,42	0,29	273	0,33	0,27	345	0,38	0,26
	1222	$0,34 \pm 0,08$	$0,26 \pm 0,03$	920	$0,29 \pm 0,07$	$0,24 \pm 0,03$	996	$0,36 \pm 0,04$	$0,27 \pm 0,01$

$$M_1^2 = \text{const};$$

$$\sigma = /0,32 \pm 0,04/ \text{ мб}$$

$$M_2^2 = \{ 1 + 0,5 (\vec{\rho}_{\vec{x}_1} \cdot \vec{\rho}_{\vec{x}_2}) \}^2 + 4,0 \{ (\vec{\rho}_{\vec{x}_1} - \vec{\rho}_{\vec{x}_2}) \cdot \vec{\rho}_{\vec{x}_2} \}^2;$$

$$\sigma = /0,26 \pm 0,02/ \text{ мб}$$

Таблица 2

№ № п/п	Канал реакции	Энергия T_{π^-} , МэВ	Эксперимент, σ , мб	Результаты фита, мб
1.	$\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \pi^+ n$	288	$0,36 \pm 0,09$ /3/	$0,35 \pm 0,04$
2.	$\pi^- p \rightarrow \pi^+ \pi^+ n$	270	$0,26 \pm 0,02$	$0,26 \pm 0,02$
3.	$\pi^- p \rightarrow \pi^- \pi^+ p$	276	$0,08 \pm 0,08$ /4/	$0,08 \pm 0,08$
4.	$\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \pi^+ p$	275	$0,05 \pm 0,03$ /5/	$0,05 \pm 0,03$
5.	$\pi^+ p \rightarrow \pi^+ \pi^+ n$	280	$0,039 \pm 0,006$ /8/	$0,039 \pm 0,08$

Величина полного сечения $0,26 \pm 0,02$ мбн согласуется с полученным в работе /7/ значением $\sigma = 0,27 \pm 0,07$ мб. Однако в данной работе смягчение спектров γ -квантов объясняется анизотропией углового распределения вторичных частиц, в то время как в работе /7/ матричный элемент предполагается постоянным, а смягчение спектров конвертированных электронов объясняется аппаратурными эффектами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бунятов С.А. и др. ЯФ, 1977, 25, с.325.
2. Бунятов С.А. и др. ПТЭ, 1976, 6, с.42.
3. Бамусов Ю.А. и др. ЯФ, 1965, 1, с.526.
4. Блохинцева Т.Д. и др. ЖЭТФ, 1963, 44, с.498.
5. Бамусов Ю.А. и др. ЯФ, 1975, 21, с.308.
6. Макаров М.М., Обрант Г.З., Саранцев В.В. ЯФ, 1973, 17, с.170.
7. Кравцов А.В. и др. ЯФ, 1975, 20, с.308.
8. Кравцов А.В. и др. Препринт ЛИЯФ №290, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 апреля 1978 года.