

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



Б-287

13/III-78

1 - 11114

1219/2-78

Ю.А.Батусов, С.А.Бунятов, Л.Д.Визирева,
Г.Р.Гулкян; Ф.Х.Мирсалихова; В.М.Сидоров,
Х.М.Чернев, Р.А.Эрамжян

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЧАСТИЧНЫХ РЕАКЦИЙ
С ОБРАЗОВАНИЕМ ^8Li

ПРИ ЗАХВАТЕ ОСТАНОВИВШИХСЯ μ^- -МЕЗОНОВ
ЯДРАМИ ^{12}C

1977

1 - 11114

Ю.А.Батусов, С.А.Бунятов, Л.Д.Визирева,¹
Г.Р.Гулканян,² Ф.Х.Мирсалихова,³ В.М.Сидоров,
Х.М.Чернев,⁴ Р.А.Эрамбян

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЧАСТИЧНЫХ РЕАКЦИЙ
С ОБРАЗОВАНИЕМ ^8Li
ПРИ ЗАХВАТЕ ОСТАНОВИВШИХСЯ μ^- -МЕЗОНОВ
ЯДРАМИ ^{12}C

Направлено в ЯФ

¹ Высший химико-технологический институт /София, НРБ/.

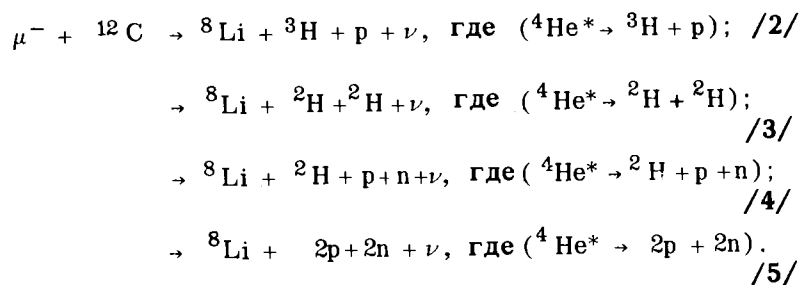
² Ереванский физический институт.

³ Ташкентский политехнический институт.

⁴ Институт ядерных исследований и ядерной энергетики /София, НРБ/.



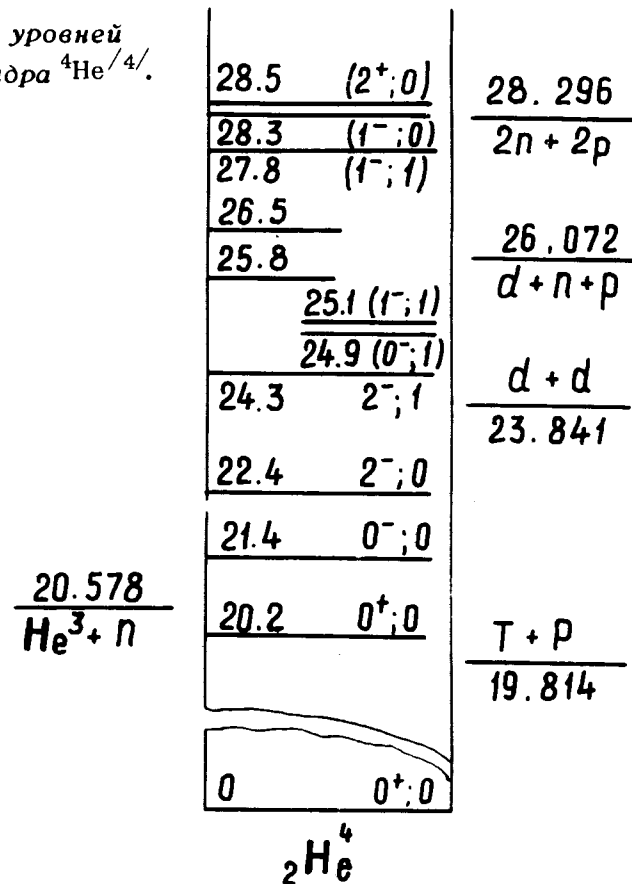
Если предположить, что образование возбужденного ядра ${}^4\text{He}^*$ при захвате μ^- -мезонов углеродом с образованием ${}^8\text{Li}$ является обязательным условием для протекания таких процессов, то кроме реакции /1/, в которой ${}^4\text{He}^*$ распадается на ${}^3\text{He}$ и n , из-за различных каналов распада возбужденного гелия должны наблюдаться следующие реакции:



Из анализа реакции $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{He} + n + \nu$ /1/ /1/ следует, что наилучшее описание экспериментальных данных достигается в предположении, что уровень возбуждения промежуточного ядра ${}^4\text{He}^*$ равен /22,5±2,0/ МэВ. Тогда на основании рассмотрения энергетических порогов развала и известных уровней возбуждения ${}^4\text{He}$ /рис.1/ /4/ можно заключить, что близкими по вероятности каналами μ^- -захвата могут быть реакции /1/ - /3/, тогда как реакции /4/ - /5/, имеющие высокие энергетические пороги, должны быть менее вероятными. Однако по закону сохранения полного изотопического спина распад ${}^4\text{He}^*$ на два дейтрона /реакция /3// может происходить только с уровнями, полный изотопический спин которых равен нулю, поэтому реакция /3/ также должна идти со значительно меньшей вероятностью, чем реакция /1/.

В фотоэмульсии в результате реакций /2/ - /5/ будут образовываться трехлучевые σ_μ^- -звезды с Т-образным следом. Они составляют 38% и после двухлучевых σ_μ^- -звезд являются наиболее вероятными. Исследованиям каналов μ^- -захвата по реакциям /2/ - /5/ и посвящена данная работа.

Рис. 1. Схема уровней возбуждения ядра ${}^4\text{He}$ /4/.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Постановка опыта описана в работах /1,6/. В результате просмотра событий в четырех фотоэмульсионных камерах, облученных в пучке μ^- -мезонов с энергией 80 МэВ, в зоне остановок μ^- -мезонов было зарегистрировано 685 σ_μ^- -звезд с Т-образным следом. Вероятность образования такой звезды на одну остановку μ^- -мезона равна /0,30±0,01/ · 10⁻⁴.

Распределение звезд по числу лучей /рис. 2/ указывает на образование их на легких ядрах в фотоэмульсии, поскольку захват μ^- -мезонов тяжелыми ядрами в фотоэмульсии в 93% случаев сопровождается вылетом одной заряженной частицы, а при захвате легкими ядрами в 80% случаев вылетают две и более заряженные частицы /7/.

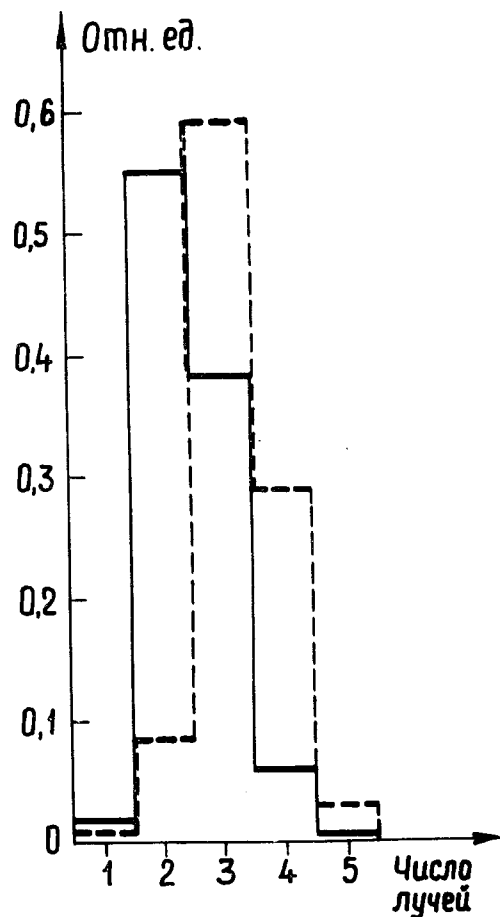


Рис. 2. Распределение событий захвата μ^- - и π^- -мезонов с T-образным следом ядрами в фотоэмульсии по числу лучей /сплошная линия - μ^- -захват, пунктирная - π^- -захват/.

Из 685 σ_μ -звезд с T-образным следом для дальнейшего анализа было отобрано 248 трехлучевых событий без видимого следа ядра отдачи с пробегом ≤ 1 мкм и электрона из центра звезды.

Для выделения реакций /2/ - /5/ отобранные события были обчислены на ЭВМ по программам кинематического анализа ядерных реакций в фотоэмульсии /8/. Рассматривались все возможные реакции с испусканием ${}^8\text{Li}$ на ядра легкой компоненты фотоэмульсии /C, N, O/. Реакция предполагалась однозначно идентифицированной, если она имела решение только по одной гипотезе. Событиями, соответствующими кинематике реакций с одной нейтральной частицей, /2/ $\mu^- {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} {}^3\text{H} \nu$ и /3/ $\mu^- {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} {}^2\text{H} {}^2\text{H} \nu$, считались случаи, удовлетворяющие

критерию $\chi^2 \leq 5$ /9/. В случае реакций с двумя и тремя нейтральными частицами /реакции /4/ $\mu^- {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^2\text{H} \text{p} \text{n} {}^8\text{Li} \nu$ и /5/ $\mu^- {}^{12}\text{C} \rightarrow 2\text{p} 2\text{n} {}^8\text{Li} \nu$ / необходимым условием для идентификации событий по этим каналам служило превышение недостающей массы реакции соответственно массы нейтрона и двух нейтронов.

Относительные вероятности выделенных каналов реакций /2/ - /5/ определялись по формуле /2/

$$W_i = \frac{n_i}{N_{\text{ост.}} \eta_{\text{ост.}} \lambda_c \tau_m \epsilon_p},$$

где n_i - число событий, отнесенных к данной реакции; $N_{\text{ост.}}$ - полное число остановок μ^- -мезонов в рассмотренном объеме эмульсии; $\eta_{\text{ост.}}$ - относительная частота атомного захвата μ^- -мезона ядрами углерода; λ_c и τ_m - скорость захвата и время жизни μ^- -мезона в ядре углерода; ϵ_p - эффективность регистрации σ_μ -звезды /значения коэффициентов $\eta_{\text{ост.}}$, λ_c , τ_m и ϵ_p приведены в работах /1, 2, 6/ /.

Результаты расчетов относительных вероятностей каналов захвата μ^- -мезонов ядрами углерода по реакциям /2/ - /5/ и число идентифицированных событий по каждому из этих каналов представлены в таблице. Здесь же для сравнения приведены данные по реакции /1/ /1/.

Таблица

Каналы реакций μ^- -захвата ядром угле- рода	$\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + \nu +$				
	$+{}^3\text{He} + \pi^1/$	$+{}^3\text{H} + \text{p}$	$+2{}^2\text{H}$	$+{}^2\text{H} + \text{p} + \text{n}$	$+2\text{p} + 2\text{n}$
Число всех идентифици- рованных событий	308	35	16	65	4
W_1	$(1,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$	$(1,9 \pm 0,4) \cdot 10^{-4}$	$(9 \pm 2) \cdot 10^{-5}$	$< 3,5 \cdot 10^{-4}$	$< 2,2 \cdot 10^{-5}$
Число одно- значно иден- тифицирован- ных событий	220	18	2		
W_2	$(1,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$	$(1,0 \pm 0,3) \cdot 10^{-4}$	$(1,1 \pm 0,8) \cdot 10^{-5}$		

Из таблицы видно, что полученные значения относительных вероятностей каналов /3/ и /5/ на два порядка, а /4/-на порядок меньше величины относительной вероятности реакции /1/. Отметим, что для каналов с двумя и более нейтральными частицами /реакции /4/ и /5// получена только верхняя граница относительной вероятности. Эти результаты не противоречат предположению о том, что в реакциях μ^- -захвата ядрами углерода с образованием ${}^8\text{Li}$ в промежуточном состоянии образуется ядро ${}^4\text{He}^*$ с энергией возбуждения в области /22-24/ МэВ.

Учитывая величины энергетического порога развала ${}^4\text{He}^*$, квантовых чисел и фазового объема, можно заключить, что величина относительной вероятности реакции /2/ $\mu^- {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} {}^3\text{H} \nu$ должна быть того же порядка, что и величина относительной вероятности реакции /1/.

Однако значение, полученное путем измерений, на порядок меньше. Это очень неожиданный результат, который требует дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

МЕХАНИЗМЫ РЕАКЦИЙ /2/ и /4/

Реакция $\mu^- {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} {}^3\text{H} \nu$ /2/ была проанализирована в предположении, что вторичные заряженные частицы ${}^3\text{H}$ и p возникают от развала промежуточного возбужденного ядра ${}^4\text{He}^*$. На рис. 3 приведены энергетические спектры для реакции /2/. Значения энергии возбуждения ${}^4\text{He}^*$, определенные из расчетов эффективной массы ${}^3\text{H}$ и p , имеют максимум в интервале энергий /21-24/ МэВ /рис. 3б/, а энергия возбуждения ${}^{12}\text{B}^*$, полученная путем вычислений эффективной массы трех заряженных частиц

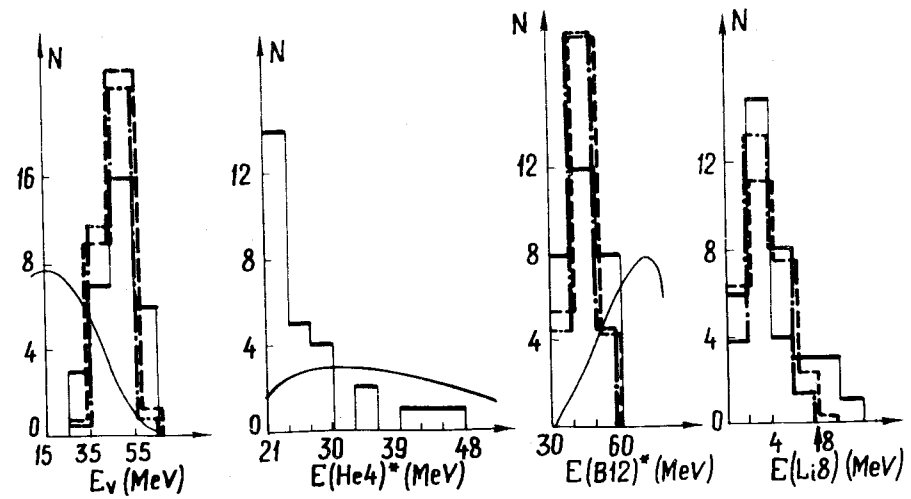
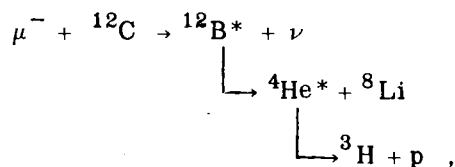


Рис. 3. Энергетические распределения для реакции /2/: сплошная гистограмма - эксперимент; пунктир - расчет по резонансному механизму; штрих-пунктир - расчет по кластерному механизму μ^- -захвата; кривая - фазовый объем.

${}^8\text{Li}$, ${}^3\text{H}$, p , группируется в области энергий /40-50/ МэВ /рис. 3в/. Найденные величины находятся в согласии с энергиями возбуждения как промежуточного ядра ${}^4\text{He}^*$, так и ${}^{12}\text{B}^*$, полученными на основе анализа реакции /1/ в работе /1/. Характер распределения энергии нейтрино /рис. 3а/ также указывает на то, что нейтрино, как и в реакции /1/, по-видимому, возникает в промежуточном двухчастичном процессе. Поэтому аналогично реакции /1/, предполагая резонансный механизм захвата μ^- -мезона /10/, мы произвели моделирование процесса по схеме:



с уровнями возбуждения ${}^{12}\text{B}^*$ - /44 \pm 6/ МэВ и ${}^4\text{He}^*$ - /22,4 \pm 2,0/ МэВ и /24,5 \pm 2,0/ МэВ. Результаты этих вычислений представлены на рис. 3 и 4 штриховыми линиями. Из рисунков видно, что расчеты по схеме /1/ удовлетворительно описывают энергетические характеристики процесса и распределения углов между вторичными заряженными частицами. Это позволяет исключить из рассмотрения другие возможные схемы резонансного механизма с прямым испусканием возбужденным ядром ${}^{12}\text{B}^*$ протона или тритона. В то же время сравнение расчетов с угловыми распределениями нейтрино относительно направления вылета p , ${}^3\text{H}$ и особенно ${}^4\text{He}^*$ /рис. 4г,е,ж/ показывает большое расхождение между расчетными и экспериментальными данными: так, согласие для распределения по $\cos(\hat{4}\text{He}^*, \nu)$, рис. 4г, характеризуется величиной ($\chi^2/\chi^2 = 5$).

Другим механизмом, в котором в промежуточном состоянии может образоваться возбужденное ядро ${}^4\text{He}^*$, является захват μ^- -мезона частью ядра углерода - ассоциацией ${}^4\text{Li}$ /рис. 5/. Было проведено моделирование реакции /2/ по схеме рис. 5 при предположении, что импульсное распределение ${}^4\text{Li}$ совпадает с импульсным

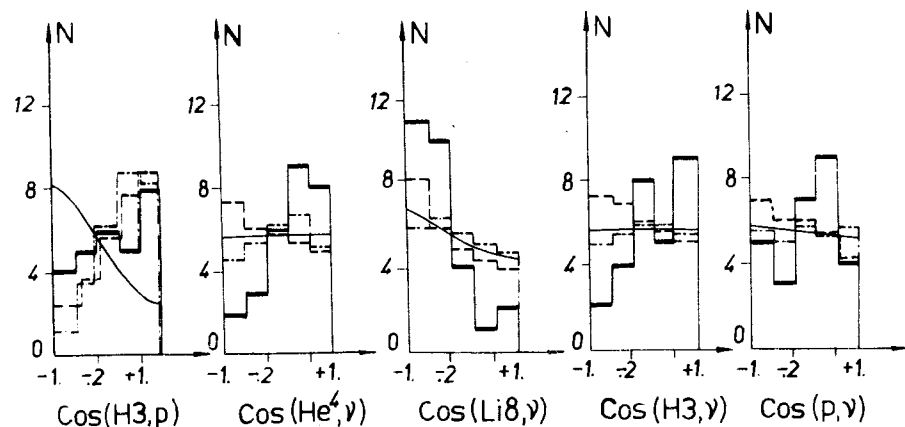


Рис. 4. Угловые распределения вторичных частиц из реакции /2/ /обозначения те же, что и на рис. 3/.

распределением ядра ${}^8\text{Li}$, а уровни возбуждения ${}^4\text{He}^*$ равны /22,4 \pm 2,0/ МэВ и /24,3 \pm 2,0/ МэВ. Данные расчетов по такому механизму /штрих-пунктирные линии на рис. 3 и 4/ несколько лучше согласуются с экспериментальными данными. Так, например, величина χ^2/χ^2 для углов между направлениями вылета ядра ${}^4\text{He}^*$ и нейтрино равна 1,7 /рис. 4г/. Следует, однако, отметить, что для более детального анализа механизмов реакции /2/ необходимо значительное увеличение статистического материала.

Для анализа реакции $\mu^- + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^2\text{H} + p + n + \nu$ /4/ были использованы трехлучевые события с Т-образным следом, для которых не было получено решений по каналам реакций μ^- -захвата без испускания нейтрона на легких ядрах в фотоэмульсии (С, N, O).

Такая выборка событий определена тем, что в реакции /4/ в конечном состоянии вылетают две нейтральные частицы, поэтому строгое выделение каждого события невозможно и приходится пользоваться общими кинематическими критериями.

Распределение выделенных событий по недостающей массе процесса /4/ представлено на рис. 6а. На том же рис. 6 для случаев, имеющих величину $M_{\text{пв}} > 940$ МэВ,

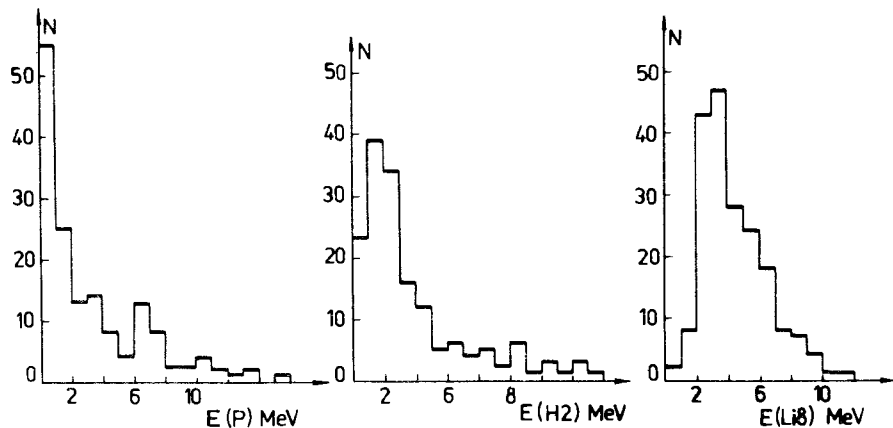


Рис. 8. Энергетические распределения вторичных частиц: а/ протоны, б/ дейтроны, в/ ядра ${}^8\text{Li}$.

Такой результат, по-видимому, является следствием малой вероятности образования высоковозбужденных состояний ${}^4\text{He}^*$, и, возможно, вызван влиянием взаимодействия медленных вторичных частиц /рис. 8/ в конечном состоянии, которое сильно искажает экспериментальные энергетические и угловые распределения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определены величины относительных вероятностей всех возможных каналов поглощения μ^- -мезонов ядром углерода с испусканием ${}^8\text{Li}$ в трехлучевых $\alpha\mu^-$ -звездах. Для вторичных частиц в реакциях /2/ - /4/ измерены энергетические и угловые распределения.

2. Из анализа полученных экспериментальных данных по захвату μ^- -мезона ядром ${}^{12}\text{C}$ с образованием ${}^8\text{Li}$ следует, что основным каналом является реакция

$\mu^- {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} {}^3\text{He} n \nu$ /1/, имеющая величину относительной вероятности по крайней мере на порядок выше, чем для всех других рассмотренных каналов μ^- -захвата. Для реакции $\mu^- {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^8\text{Li} {}^3\text{He} p \nu$ /2/ получена

неожиданно малая величина относительной вероятности.

3. Из результатов исследования возможных механизмов реакций захвата μ^- -мезона ядрами углерода можно сделать вывод, что в реакциях с испусканием ядра ${}^8\text{Li}$ в промежуточном состоянии образуется возбужденное ядро ${}^4\text{He}^*$ преимущественно в состоянии $/22,5 \pm 2,0/ \text{ МэВ}$.

Качественно энергетические и угловые распределения вторичных частиц от реакций /1/ и /2/ описываются при моделировании исследуемых процессов по механизму прямого поглощения μ^- -мезонов малонуклонной ассоциацией ${}^4\text{Li}$.

Однако вопрос детального изучения механизма захвата μ^- -мезонов ядрами углерода требует дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батусов Ю.А. и др. ЯФ, 1971, 14, 1206.
2. Батусов Ю.А. и др. ЯФ, 1975, 22, 320.
3. Батусов Ю.А. и др. ЯФ, 1967, 6, 1151.
4. Mejerov W.E., Tombrello T.A. Nucl. Phys., 1968, A109, 1.
5. Агабабян Н.М. и др. ОИЯИ, P15-5077, Дубна, 1970.
6. Батусов Ю.А. и др. ЯФ, 1973, 18, 962.
7. Батусов Ю.А. и др. ЯФ, 1975, 21, 1215.
8. Агабабян Н.М. и др. ОИЯИ, 10-5891, Дубна, 1971.
9. Например: Батусов Ю.А. и др. ЯФ, 1965, 1, 526.
10. Балашов В.В., Эрамбян Р.А. Atomic Energy Review, 1967, 5, 3.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 ноября 1977 года.