

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



5/11-78
P1 - 11326

Б-287

2443 / 2-78

Ю.А.Батусов, С.А.Бунятов, Л.Д.Визирева, Д.А.Галстян,
Г.Р.Гулкян, Н.И.Костанашвили, П.Кюзр,
Ж.-П.Массюз, Ф.Х.Мирсалихова, В.М.Сидоров,
Х.М.Чернев, Р.А.Эрамжян

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $\mu^- \text{}^6\text{Li} \rightarrow \text{}^3\text{H}^3\text{H} \nu$

В ФОТОЭМУЛЬСИИ, ЗАГРУЖЕННОЙ ЛИТИЕМ-6

1978

P1 - 11326

Ю.А. Батусов, С.А. Бунятов, Л.Д. Визирева,¹ Д.А. Галстян,²
Г.Р. Гулканян,² Н.И. Костанашвили,³ П.Кюэр,⁴
Ж.-П. Массюз,⁴ Ф.Х. Мирсалихова,⁵ В.М. Сидоров,
Х.М. Чернев,⁶ Р.А. Эрамжян

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $\mu^- + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^3\text{H}$
В ФОТОЭМУЛЬСИИ, ЗАГРУЖЕННОЙ ЛИТИЕМ-6

Направлено в ЯФ

¹ Высший химико-технологический институт, София, НРБ.

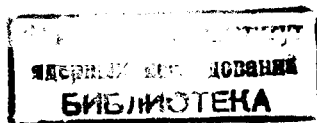
² Ереванский физический институт.

³ Тбилисский государственный университет.

⁴ Центр ядерных исследований, Страсбург-Кроненбург, Франция.

⁵ Таш.ПИ, Ташкент.

⁶ ИИЯЭ, София, НРБ.



Батусов Ю.А. и др.

P1 - 11326

Исследование реакции $\mu^- \text{Li} \rightarrow \text{H}^3 \text{H} \nu$ в фотоэмульсии, загруженной литием-6

В фотоэмульсии, загруженной ядрами ${}^6\text{Li}$, была исследована реакция $\mu^- \text{Li} \rightarrow \text{H}^3 \text{H} \nu$. Получено, что величина относительной вероятности этой реакции равна $(9,6 \pm 3,1) \cdot 10^{-2}$. Энергетические и угловые распределения вторичных частиц от реакции $\mu^- \text{Li} \rightarrow \text{H}^3 \text{H} \nu$ качественно согласуются с оценками, выполненными в предположении, что захват μ^- -мезонов ядрами ${}^6\text{Li}$ в этой реакции происходит на малонуклонном кластере [${}^3\text{He}$].

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Преприят Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Batusov Yu.A. et al.

P1 - 11326

Investigation of $\mu^- \text{Li} \rightarrow \text{H}^3 \text{H} \nu$ Reaction in Photoemulsion Loaded with Lithium-6

The $\mu^- \text{Li} \rightarrow \text{H}^3 \text{H} \nu$ reaction has been investigated in a photoemulsion loaded with ${}^6\text{Li}$ nuclei. The value of relative probability for this reaction was determined to equal $(9,6 \pm 3,1) \cdot 10^{-2}$. Energy and angular distributions of secondary particles from the $\mu^- \text{Li} \rightarrow \text{H}^3 \text{H} \nu$ reaction agree quantitatively with estimates obtained at the assumption that the capture of μ^- -mesons by ${}^6\text{Li}$ nuclei in this reaction occurs on a cluster of a few nucleons [${}^3\text{He}$].

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

Изучение различных реакций на ядрах IP-оболочки при захвате μ^- -мезонов ^{1-3/} показало, что индивидуальные свойства этих ядер в сильной степени сказываются на характере процессов их расщепления. В связи с этим в данной области ядер возникает необходимость детального изучения всех возможных каналов реакций μ^- -захвата.

Аналогичная ситуация имеет место при расщеплении ядер IP-оболочки другими частицами. И хотя такие процессы изучаются в течение длительного времени, они до сих пор не поддаются единому теоретическому описанию.

Особенно информативными могут оказаться экспериментальные данные о процессах на первом стабильном ядре, в котором заполняется IP-оболочка, - ядре ${}^6\text{Li}$. В частности, интересен вопрос о расщеплении ядра ${}^6\text{Li}$ на два фрагмента равной массы. Имеющиеся экспериментальные данные по фотоядерному расщеплению ${}^6\text{Li}$ противоречивы ^{4,5/}. В связи с этим представляется важным получение новой экспериментальной информации об этом канале при захвате μ^- -мезонов.

Среди всех возможных реакций, возникающих после захвата μ^- -мезона ядрами лития-6, детальному кинематическому анализу при регистрации вторичных заряженных частиц могут быть подвергнуты два канала:



Расчетам перехода ядра ${}^6\text{Li}$ в основное состояние ${}^6\text{He}$ при μ^- -захвате по реакции /1/ в рамках различных моделей посвящено большое число теоретических работ. Экспериментальная величина скорости этого перехода была измерена в работе Дойча и др.^{/6/} и равна $1600^{+320}_{-129} / \text{с}^{-1}$, что удовлетворительно согласуется с результатами многих теоретических расчетов /см., например,^{/7/} /.

Исследованиям процессов захвата μ^- -мезонов ядрами ${}^6\text{Li}$ по реакции /2/ посвящены вычисления, приведенные в работах^{/8-10/}. В первых двух^{/8,9/} реакция $\mu^- {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} {}^3\text{H} \nu$ анализируется на основе так называемых треугольных диаграмм. Этот расчет был предпринят в связи с предполагаемым экспериментом по измерению массы мюонного нейтрино^{/9/}. В результате такого расчета получено энергетическое распределение вторичных тритонов и скорость перехода по реакции /2/, которая оказалась равной 141 с^{-1} .

В другой работе^{/10/} на основе концепции о резонансном механизме поглощения мюонов проведен анализ различных каналов распада состояний гигантского резонанса ядра ${}^6\text{Li}$. Было найдено, что структурные особенности ряда состояний, формирующих резонанс, приводят к распаду по каналу $\mu^- {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} {}^3\text{H} \nu$ с вероятностью около 10% на акт захвата. Спектр ядер трития, рассчитанный в рамках обоих подходов, оказался локализованным в одной и той же энергетической области. Однако в первом случае он гладкий, тогда как на основе резонансного механизма предсказывается наличие у спектра структуры^{/8-10/}. Таким образом, расчеты процесса /2/, выполненные в рамках двух различных моделей, отличаются как по скорости перехода процесса /в 3-4 раза/, так и по виду спектра вторичных тритонов.

В настоящее время отсутствуют экспериментальные данные по исследованию реакции /2/ $\mu^- {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} {}^3\text{H} \nu$, сравнение с которыми позволило бы отдать предпочтение одной из двух этих моделей.

Целью данной работы является экспериментальное изучение реакции /2/ в фотоэмульсии, загруженной ядрами ${}^6\text{Li}$.

Постановка опыта, отбор событий и оценка вероятностей реакции $\mu^- {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} {}^3\text{H} \nu$

Из фотоэмульсионных слоев "Ильффорд К-5" размером $5 \times 5 \text{ см}^2$ и толщиной 600 мкм, наполненных ядрами ${}^6\text{Li}$ в количестве 32 мг/см^3 , были собраны 5 фотоэмульсионных камер объемом $5 \times 5 \times 1,7 \text{ см}^3$. Для проведения фоновых измерений в каждой камере два первых и два последних слоя брались из стандартной незагруженной эмульсии того же полива, что и вся камера. Загруженные фотоэмульсионные слои были изготовлены в Центре ядерных исследований в Страсбурге-Кроненбурге /Франция/, там же на ускорителях Ван-де-Граафа для этих слоев была проведена корректировка соотношений пробег-энергия^{/11/}.

Эмульсионные камеры облучались μ^- -мезонами с энергией 60 МэВ в низкофоновой лаборатории на μ^- -мезонном тракте синхроциклотрона ОИЯИ. Плотность облучения составляла $3 \cdot 10^5 \text{ мезон/см}^2$. Мезоны тормозились медным фильтром толщиной 13 г/см^2 и останавливались в середине эмульсионных камер. Примесь π^- -мезонов в первичном пучке была определена нами в работе^{/12/} и составляет - 0,4%. С целью фоновых измерений в том же пучке облучались две камеры размером $10 \times 10 \times 5,4 \text{ см}^3$, составленные из электроночувствительных слоев эмульсии типа НИКФИ-БР толщиной 600 мкм.

Проявленные фотоэмульсионные слои просматривались под микроскопом с увеличением 225х, и регистрировались одно- и двухлучевые звезды от захвата μ^- -мезонов ядрами в фотоэмульсии / σ_μ^- -звезды/. Всего в Дубне, Софии, Тбилиси и Ереване было зарегистрировано 33 240 таких σ_μ^- -звезд. Для однозначной идентификации однолучевых σ_μ^- -звезд необходимо вводить ограничение на длину следа, чтобы исключить ложные события, соответствующие рассеянию μ^- -мезона перед остановкой. Так как эта длина в фотоэмульсии составляет $\approx 10 \text{ мкм}$, что намного больше пробега ${}^6\text{He}$ в реакции $\mu^- {}^6\text{Li} \rightarrow {}^6\text{He} \nu$ /1/, то не представляется возможным проводить детальный анализ реакции /1/ фотоэмульсионным методом. Для двухлучевых σ_μ^- -звезд такого жест-

кого ограничения на длину следов нет. В этом случае лучом считался след, имеющий определенное направление и длину ≥ 2 мкм.

Всего при просмотре фотоэмульсионных слоев, заполненных ядрами ${}^6\text{Li}$, и в фоновых камерах было зарегистрировано 7 473 двухлучевых σ_μ -звезд; 4 498 σ_μ -звезд /3 042 в камерах с ${}^6\text{Li}$ и 1 456 в стандартной эмульсии/ было вновь просмотрено на микроскопе при большом /1350x/ увеличении, и для событий без видимого ядра отдачи и электронов в центре звезды были измерены пробеги вторичных заряженных частиц и угол между ними.

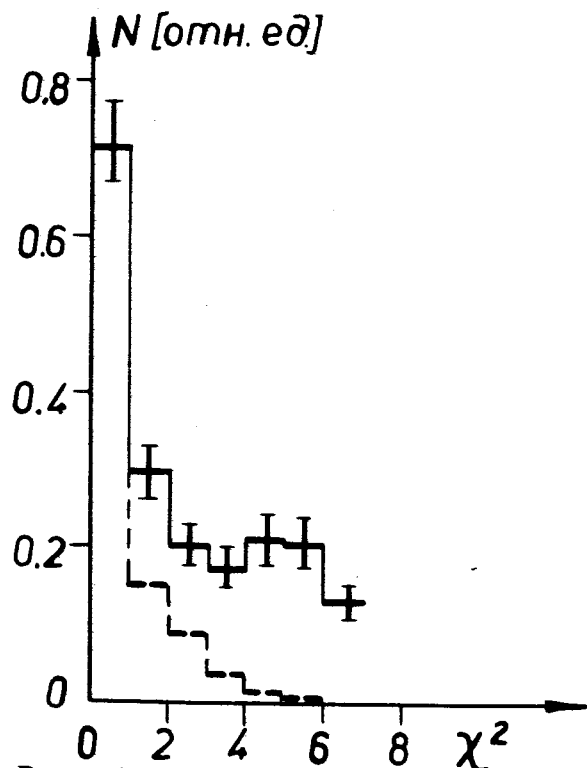


Рис. 1. Распределение числа событий, удовлетворяющих кинематическим критериям реакции /2/, в зависимости от величины χ^2 . Пунктир - теоретическое χ^2 -распределение.

Для выделения реакции $\mu^- {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} {}^3\text{H} \nu$ /2/ измеренные события были проанализированы на ЭВМ при помощи программы кинематического анализа ядерных реакций в фотоэмульсии /13/. Полученное в результате расчета распределение событий по величине χ^2 представлено на рис. 1. Там же приведено теоретическое χ^2 -распределение для одной степени свободы. Видно, что при $\chi^2 > 2$ распределение становится равномерным. Поэтому к событиям, которые могут соответствовать реакции /2/, относились случаи с $\chi^2 \leq 2$.

Дальнейший отбор событий производится по величине квадрата недостающей массы реакции $\mu^- {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} {}^3\text{H} \nu$. Анализ распределения событий в координатах квадрат недостающей массы - величина χ^2 показал, что лучшее соотношение числа решений для событий реакции /2/ в слоях, заполненных ${}^6\text{Li}$, и числа решений для стандартной эмульсии получается в области недостающих масс $\leq |1000| \text{ МэВ}^2$. Такому критерию удовлетворяло 203 события /что соответствует $6,7 \pm 0,5\%$ от числа измеренных σ_μ -звезд/ в камерах, заполненных ${}^6\text{Li}$, и 67 событий / $4,6 \pm 0,6\%$ / - в фоновых камерах.

Поскольку количество ядер ${}^6\text{Li}$ в загруженной фотоэмульсии невелико и составляет всего 4,2% от числа всех остальных ядер, входящих в состав фотоэмульсии /Ag, Br, S, O, N, C/, то по разности отнормированной доли случаев реакции /2/, зарегистрированных в заполненной и стандартной эмульсиях, можно оценить вклад событий реакции на ядрах ${}^6\text{Li}$. Мы получили, что такая разность /эффект-фон/ равна $2,1 \pm 0,8\%$. Полученная оценка указывает на то, что примененный способ выделения событий реакции $\mu^- {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} {}^3\text{H} \nu$ /2/ является результативным.

Для оценки величины относительной вероятности реакции /2/ мы воспользовались энергетическим распределением нейтрино, полученным для выделенных событий в загруженной и стандартной эмульсиях.

На рис. 2а сплошной гистограммой представлен спектр нейтрино для событий, полученных в эмульсии, загруженной ядрами ${}^6\text{Li}$; пунктирной гистограммой - спектр для фоновых случаев, нормированный к одинако-

вому числу σ_{μ^-} -звезд в загруженной и стандартной эмульсиях. Разность от вычитания этих двух нормированных гистограмм приведена на рис. 2б. При вычислении величины относительной вероятности к событиям реакции на ${}^6\text{Li}$ были отнесены 60 ± 14 случаев, расположенных в интервале энергии нейтрино $E_{\nu} = 86 \div 87,6$ МэВ /рис. 2б/. В дальнейшем события с $E_{\nu} > 86$ МэВ использовались для построения разностных угловых и энергетических распределений. Используя число выделенных случаев реакции /2/, полное число остановок μ^- -мезонов в просмотренном объеме эмульсии - $1,92 \pm 0,15 \cdot 10^6$, относительную частоту атомного захвата μ^- -мезона ядрами ${}^6\text{Li}$ - $2,6 \pm 0,8\%$, скорость захвата μ^- -мезона и время его жизни в ядре ${}^6\text{Li}$ /14/, а также эффективность регистрации событий реакции /2/ /2/, получаем, что относительная вероятность реакции /2/ равна $W(\mu^- {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} {}^3\text{H}\nu) = 9,7 \pm 3,1 \cdot 10^{-2}$.

Найденное значение относительной вероятности в несколько раз больше теоретических оценок, выполненных на основе расчета треугольных диаграмм /8,9/, и хорошо согласуется с расчетами по резонансной модели поглощения μ^- -мезонов /10/.

Механизм реакции $\mu^- {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} {}^3\text{H}\nu$

На рис. 2-4 приведены полученные в опыте энергетические и угловые распределения вторичных частиц от реакции /2/.

Из рис. 2б видно, что спектр нейтрино от реакции $\mu^- {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} {}^3\text{H}\nu$ сгруппирован в узком интервале энергии $86-87,6$ МэВ.

Зная спектр нейтрино, легко рассчитать энергию возбуждения ядерной системы. Из анализа экспериментальных данных получено /см. рис. 3б/, что уровень промежуточного ядра ${}^6\text{He}^*$ отстоит от основного состояния ядра ${}^6\text{He}$ на $14,0 \pm 0,8$ МэВ. Эти экспериментальные величины находятся в хорошем согласии с данными Шина и др. /5/.

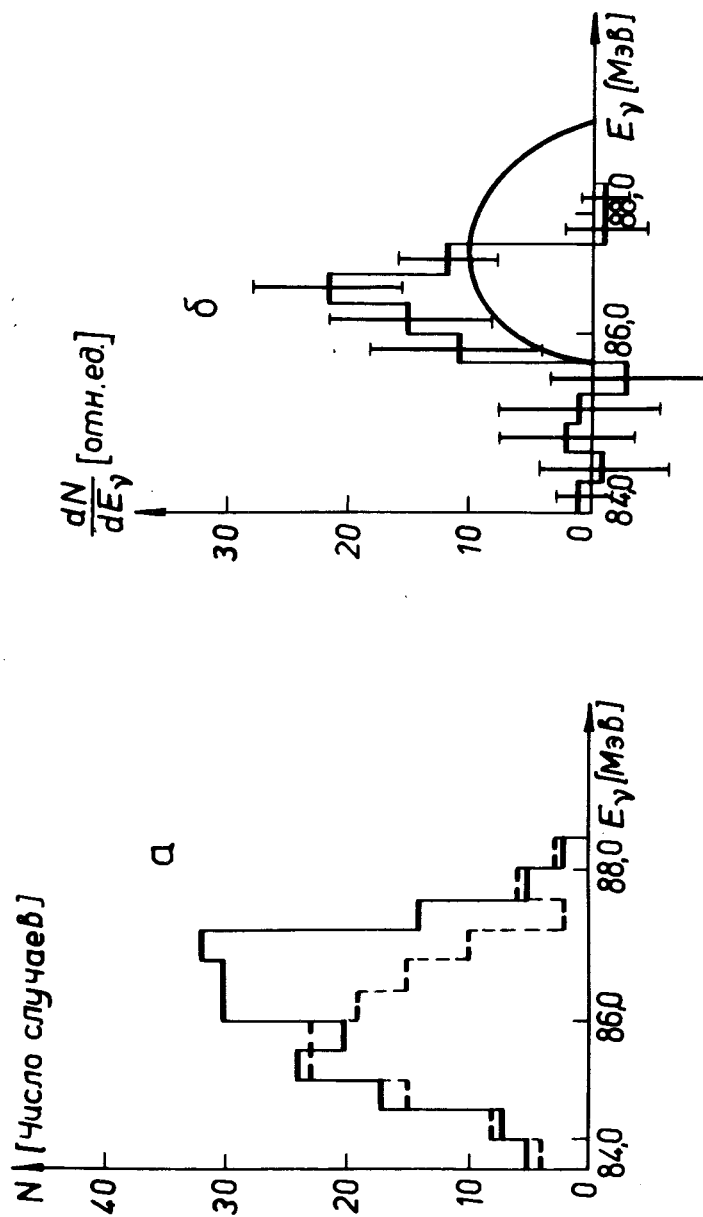


Рис. 2. Распределение по энергии нейтрино: а/ сплошная гистограмма - события реакции /2/, зарегистрированные в слоях, наполненных ядрами ${}^6\text{Li}$. Пунктир - события из фоновых камер; б/ спектр нейтрино для выделенных событий реакции $\mu^- {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} {}^3\text{H}\nu$. Сплошная кривая - расчет на основе кластерного механизма захвата μ^- -мезона ядрами ${}^6\text{Li}$.

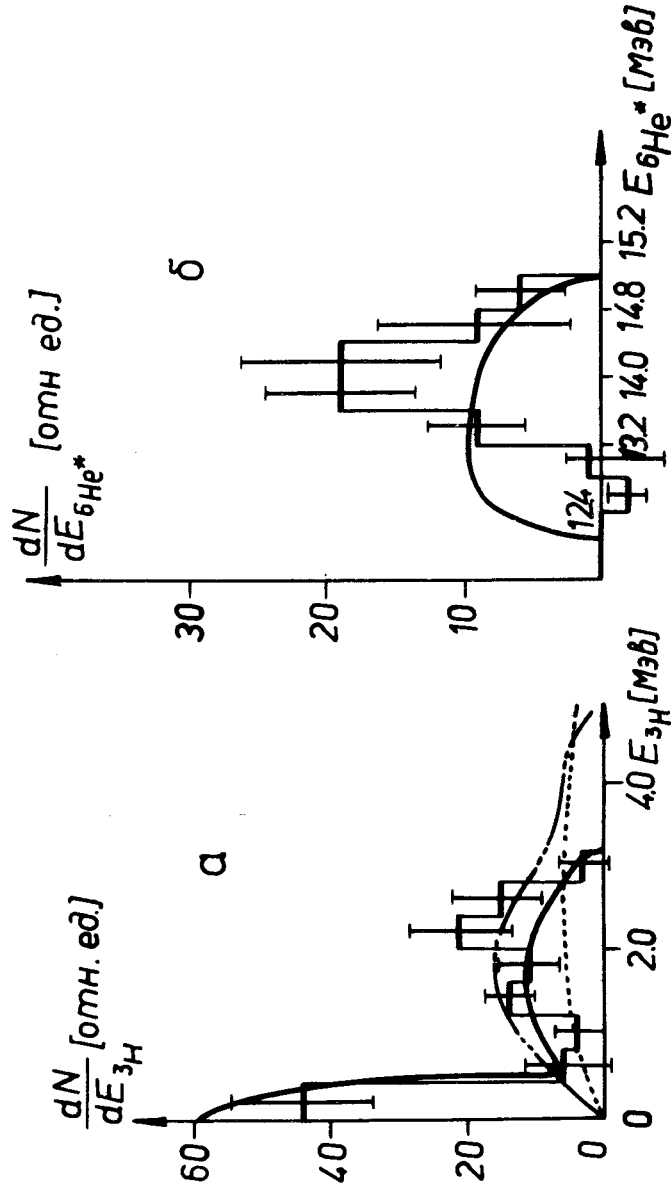


Рис. 3. а/ Энергетическое распределение ядер трития от реакции ${}^2/2/$; б/ распределение выделенных событий реакции $\mu^- + {}^3\text{H}$ по энергии возбуждения промежуточного ядра ${}^6\text{He}$. Сплошная кривая - расчет на основе кластерного механизма захвата μ^- -мезона ядрами ${}^6\text{Li}$. Штрих-пунктирная кривая - расчет по резонансной модели поглощения ${}^{10/10/}$. Пунктирная кривая - расчет на основе треугольных диаграмм ${}^{8,9/}$.

Так как спектр нейтрино сгруппирован в узком интервале энергии, это может означать, что оно вылетает в результате промежуточного двухчастичного процесса. Такой процесс предполагается как при резонансном механизме захвата μ^- -мезона ${}^{15/}$, так и при прямом захвате его частью ядра, например кластером $[{}^3\text{He}]{}^{15/}$.

Экспериментальный спектр тритонов, представленный на рис. 3а, не согласуется ни со спектром, рассчитанным на основе треугольной диаграммы ${}^{8,9/}$, ни с вычислениями, выполненными по резонансной модели ${}^{10/}$.

Противоречие экспериментальных данных расчетам по резонансной модели может означать, что вклад прямых процессов, которыми обычно пренебрегают в таких расчетах, не мал.

Схематически прямой процесс захвата μ^- -мезона ядром ${}^6\text{Li}$ с образованием двух ядер трития представлен на рис. 5. Известно, что при захвате μ^- -мезона ядрами ${}^3\text{He}$ вторичное ядро ${}^3\text{H}$ имеет кинетическую энергию, равную 1,9 МэВ/см., например, ${}^{16/}$. Спектр тритонов, полученный в нашем эксперименте /рис. 3а/, имеет два максимума: в области 2 МэВ и 0,4 МэВ. Кинематический расчет энергии нейтрино в предположении захвата μ^- -мезонов кластером $[{}^3\text{He}]$ в ядре ${}^6\text{Li}$ дает величину порядка 87 МэВ, что также согласуется с найденными в нашем опыте энергетическими величинами /рис. 2б/. Распределение углов между вторичными ядрами трития и нейтрино /рис. 4б/, имеющее пик в области углов 180° , и изотропный пьедестал тоже поддерживают предполагаемую схему кластерного захвата μ^- -мезона. В этом случае максимум под углом 180° обусловлен верхней вершиной диаграммы /рис. 5/, а углы между тритоном отдачи и нейтрино в нижней вершине должны быть распределены изотропно.

Предполагая, что процесс захвата μ^- -мезона ядром ${}^6\text{Li}$ происходит по схеме рис. 5, а импульсное распределение кластера $[{}^3\text{He}]$ совпадает с экспериментально определенным импульсным распределением ядер трития из первого максимума рис. 3а, можно промоделировать этот процесс. Будем считать, что характеристики процесса описываются только фазовым объемом.

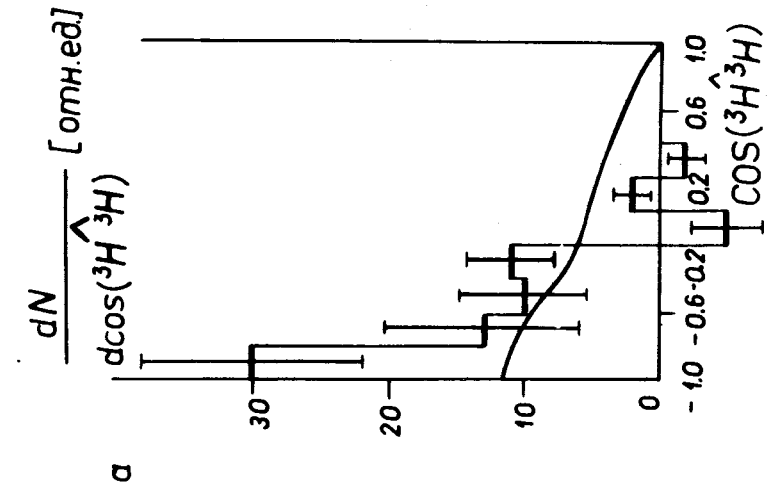


Рис. 4. Угловые распределения событий реакции /2/:
 а/ распределение углов между двумя тритонами; б/ угловое распределение тритий-нейтрино. Сплошная кривая - расчет на основе кластерного механизма захвата μ^- -мезона ядром ${}^6\text{Li}$.

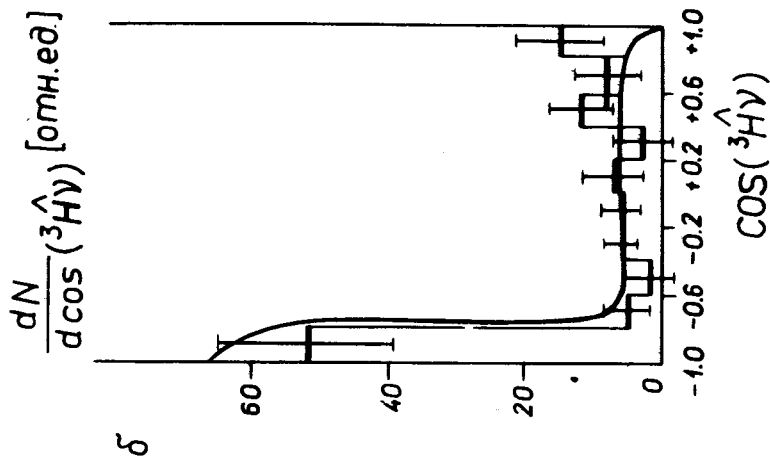
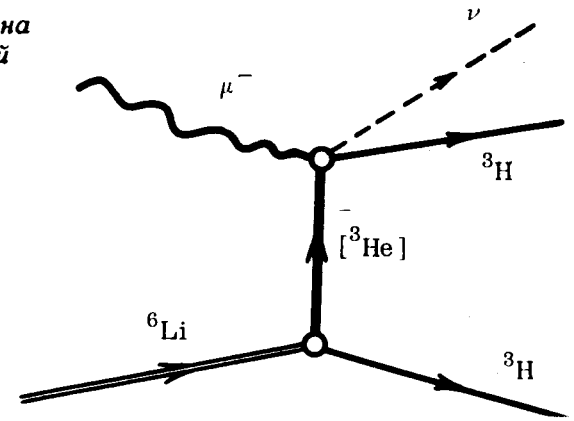


Рис. 5. Схема захвата μ^- -мезона на малонуклонной ассоциации ${}^3\text{He}$.



Полученные в таком приближении результаты моделирования распределений приведены на рис. 2-4. Видно, что они качественно согласуются с экспериментальными данными.

Заключение

1. Получена величина относительной вероятности реакции /2/:

$$W(\mu^- {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} {}^3\text{H} \nu) = (9,7 \pm 3,1) \cdot 10^{-2}.$$

Найденное значение относительной вероятности $W(\mu^- {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} {}^3\text{H} \nu)$ в несколько раз больше теоретических оценок, выполненных на основе треугольных диаграмм^{8,9/}, хотя и согласуется с расчетами по резонансной модели поглощения μ^- -мезонов ядрами.

2. Энергетические и угловые распределения вторичных частиц от реакции /2/ качественно согласуются с оценками, выполненными в предположении, что захват μ^- -мезонов ядрами ${}^6\text{Li}$ в этой реакции происходит на малонуклонном кластере ${}^3\text{He}$.

Для выяснения роли кластерного механизма захвата μ^- -мезонов в реакции $\mu^- {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H}^3\text{H}\nu$ необходим дальнейший строгий теоретический анализ.

Литература

1. Батусов Ю.А. и др. ЯФ, 1971, 14, с. 1206.
2. Батусов Ю.А. и др. ЯФ, 1975, 22, с. 320.
3. Батусов Ю.А., Эрамжян Р.А. ЭЧАЯ, 1977, 8, с. 229.
4. Murakami A. Jour. Phys.Soc.Japan, 1970, 28, p. 1.
5. Shin Y.M., Scopik D.M., Marphy J.J. Phys.Lett., 1975, 55B, p. 297.
6. Deutsch J.P. e.a. Phys.Lett., 1968, 26B, p. 315.
7. Commaratu J.B., Donnelly T.W. Nucl.Phys., 1976, 267A, p. 365.
8. Wienke B.R., Meyer S.L. Phys.Rev., 1971, C3, p.2179.
9. Wienke B.R., Meyer S.L. Phys.Rev., 1974, C9, p.943.
10. Вартамян В.А., Эрамжян Р.А. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Харьков, Труды ХФТИ, 1973, 73-9, с. 25.
11. Батусов Ю.А. и др. ЯФ, 1977, 26, с. 249.
12. Батусов Ю.А. и др. ЯФ, 1973, 18, с. 962.
13. Агабабян Н.М. и др. ОИЯИ, 10-5891, Дубна, 1971.
14. Eckhause M., Siegel R.T. Nucl.Phys., 1966, 81, p. 575.
15. Balashov V.V., Eramjan R.A. Atomic Energy Rev., 1967, 5, p. 3.
16. Займидорога О.А. и др. ЖЭТФ, 1961, 41, с. 1805; 1962, 43, с. 355; 1963, 44, с. 389.

Рукопись поступила в издательский отдел
14 февраля 1978 года.