

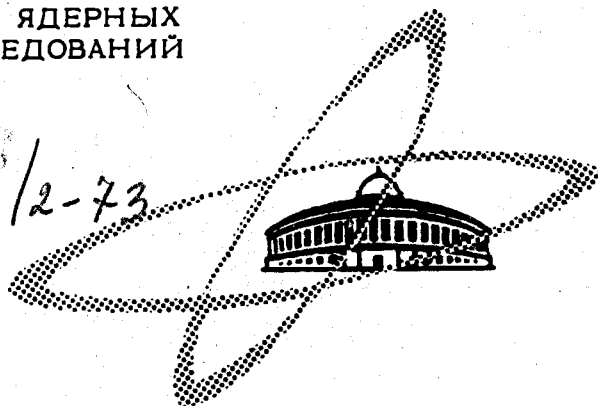
19/11-43

A-23

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

679/2-73



P1 - 6796

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

Н.М.Агабабян; Ю.А.Батусов, С.А.Бунятов, В.И.Генчев,  
Н.Ф.Голованова, Г.Р.Гулканян, В.М.Сидоров,  
Х.М.Чернев, В.А.Ярба

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ  
ОСТАНОВИВШИХСЯ  $\pi^-$ -МЕЗОНОВ  
ЯДРАМИ АЗОТА С ОБРАЗОВАНИЕМ  $^8\text{Li}$

1972

Н.М.Агабабян,<sup>1</sup> Ю.А.Батусов, С.А.Бунятов, В.И.Генчев,<sup>2</sup>  
Н.Ф.Голованова,<sup>3</sup> Г.Р.Гулканян, В.М.Сидоров,  
Х.М.Чернев, В.А.Ярба<sup>4</sup>

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ  
ОСТАНОВИВШИХСЯ  $\pi^-$ -МЕЗОНОВ  
ЯДРАМИ АЗОТА С ОБРАЗОВАНИЕМ  $^8\text{Li}$

Направлено в ЯФ

<sup>1</sup> Ереванский физический институт.

<sup>2</sup> Физический институт БАН, София.

<sup>3</sup> НИИЯФ МГУ.

<sup>4</sup> ИФВЭ (Серпухов).

## Summary

The absorption reactions of stopped  $\pi^-$ -mesons by nitrogen nuclei with the  ${}^8\text{Li}$  production were studied by using the photoemulsion method. Relative probabilities of reactions are determined. The energy and angular distributions, as well as distributions over effective masses of particle combinations, were constructed for two reactions with the most relative probability. The theoretical analysis of these reactions has been carried out. The comparison of theoretical calculations with experimental data shows that in the capture of stopped  $\pi^-$ -mesons by nitrogen nuclei with the  ${}^8\text{Li}$  production the absorption on  $(pp)$  pair and complex clusters ( ${}^3\text{Li}$ ,  ${}^5\text{Li}$ ,  ${}^6\text{Be}$ ) play an essential role.

Исследование поглощения остановившихся  $\pi^-$ -мезонов легкими ядрами с выделением каналов реакций позволяет рассмотреть важный вопрос о существовании различных нуклонных ассоциаций в ядрах.

В данной работе рассмотрены реакции поглощения  $\pi^-$ -мезонов ядрами  $^{14}\text{N}$  с образованием ядра  $^8\text{Li}$  в конечном состоянии.

Такие реакции позволяют изучать захват  $\pi^-$ -мезонов ассоциациями, являющимися нестабильными многонуклонными системами. При исследовании поглощения  $\pi^-$ -мезонов ядрами углерода с образованием  $^8\text{Li}/^{1-3}/$  было показано, что основной вклад в этот процесс вносит поглощение на изотопическом аналоге возбужденной  $\alpha$ -частицы, ядре  $^4\text{Li}$ . В этом случае удалось получить хорошее согласие совокупности экспериментальных данных и теоретических расчетов  $/^{1-3}/$ .

В настоящей работе, выполненной фотоэмульсионным методом, анализируются трех- и четырехлучевые события с образованием  $^8\text{Li}$ . Эта работа является продолжением работ  $/^{1-3}/$ , в которых исследовались реакции, дающие одно-двух- и трехлучевые  $\sigma$ -звезды с T-образным следом. Ядро  $^8\text{Li}$  надежно идентифицируется по T-образному следу.

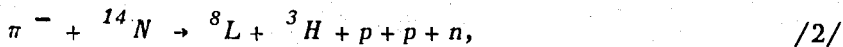
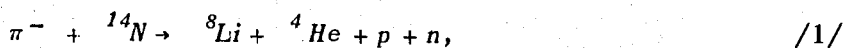
Постановка эксперимента, методика просмотра и измерений описаны в работе  $/1/$ . Из общего количества 18000  $\sigma$ -звезд с T-образным следом 60% составляют трехлучевые и 30% - четырехлучевые события. Было измерено 1270 трехлучевых и 920 четырехлучевых  $\sigma$ -звезд в Дубие и Софии. Обсчет этих событий с помощью программы кинематического анализа  $/4/$  и дальнейшая обработка полученных результатов производились на ЭВМ БЭСМ-6 ОИЯИ и ИФВЭ.

Каналы реакций разделялись с помощью критерия  $\chi^2$  на уровне 2%-ной достоверности для трехлучевых и четырехлучевых событий. Результаты анализа реакций на азоте приведены в таблице.

Из 1270 трехлучевых событий 940 удовлетворяли кинематике реакций без нейтрона или с вылетом одного нейтрона, из них 780 событий идентифицировались однозначно. Из 920 четырехлучевых событий 830 удовлетворяли кинематике реакций без нейтрона или с одним нейтроном, причем однозначно идентифицировалось 320 событий. Вклады конкурирующих каналов друг в друга оценивались моделированием событий методом Монте-Карло при помощи программы FOWL<sup>/5/</sup>. События трехлучевого и четырехлучевого типа, не удовлетворяющие кинематике реакций без нейтрона или с вылетом одного нейтрона, в основном принадлежат реакциям на легких ядрах с вылетом нескольких нейтронов.

Относительные вероятности для выделенных каналов реакций на азоте, которые определялись, как и в работе<sup>/1/</sup>, приведены в таблице.

Для двух реакций, имеющих наибольшие относительные вероятности,



получены энергетические и угловые распределения вторичных частиц, а также распределение по эффективным массам различных комбинаций частиц /рис. 1-3 для реакции /1/ и рис. 5,6 для реакции /2//. Экспериментальные распределения на этих рисунках нанесены в виде гистограмм. Распределения по фазовому объему показаны пунктиром.

Из экспериментальных распределений видно, что для нейтрона в области энергий  $E_n > 40$  Мэв наблюдается значительное превышение гистограммы над фазовой кривой. Это является указанием на то, что в данном процессе возможно проявление ассоциативного поглощения  $\pi^-$ -мезонов, так как в этой энергетической области могут осуществляться механизмы поглощения различными ассоциациями нуклонов. Проявлением ассоциативного поглощения  $\pi^-$ -мезонов можно объяснить также значительные превышения над

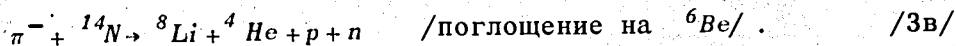
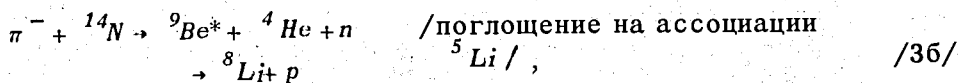
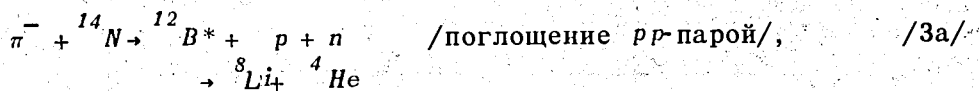


фазовыми кривыми в экспериментальных распределениях по эффективным массам в системах ( ${}^4\text{He}n$ ), ( ${}^4\text{He}pn$ ) для реакции /1/ и ( $ppn$ ) для реакции /2/. Для эффективной массы ( $ppn$ ) отличие от фазовой кривой наблюдается в виде "острого" пика. Кроме того, имеются ярко выраженные превышения над фазовыми кривыми в угловых корреляциях для тех же комбинаций в области углов, больших  $140^\circ$ .

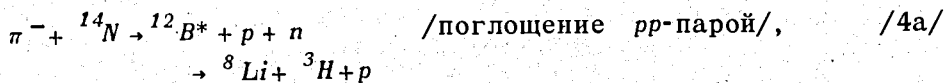
Эти особенности экспериментальных данных указывают на то, что в каждой реакции /1/  $\pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^4\text{He} + p + n$  и /2/  $\pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{H} + p + p + n$  может осуществляться несколько механизмов поглощения, т.е. поглощения на различных ассоциациях

### Оценки вероятностей

Конечное состояние реакции /1/ рассматривается как результат следующих прямых процессов:



Для реакции /2/ можно записать аналогичные схемы, например:



\*Теоретический анализ процессов типа /1/ и /2/, возможный в настоящее время, не может претендовать на исчерпывающую полноту и однозначность. Однако имеется возможность предложить такую схему анализа, которая позволяет оценить вклад каждого из механизмов поглощения в общую вероятность и описать наиболее характерные для данного механизма распределения.

Для описания процессов /3а - 3б/ и /4а - 4б/ использовано выражение для амплитуды прямого поглощения  $\pi^-$ -мезонов ассоциацией X /6,7/, при этом учитывалась зависимость амплитуды от импульса и энергий вылетающих частиц

$$M_{if} = M_0 \left( \frac{A}{x} \right)^{1/2} \sqrt{\frac{2\Lambda+1}{4\pi}} \psi_{\xi\Lambda} \left( \frac{q}{q_0} \right) \langle J_f M_f J_3 M_3 | J_i M_i \rangle$$

$$\langle \Lambda M_\Lambda J_0 M_0 | J_3 M_3 \rangle a_{if, \Lambda J_3}$$

где  $\vec{q} = \vec{k}_1 + \vec{k}_2$ ;  $\vec{k}_1$  и  $\vec{k}_2$  - импульсы нейтрона и центра масс системы (X-1);  $a_{if, \Lambda J_3}$  - парциальная приведенная ширина ассоциации в ядре. Для спина начального ядра  $J_i$ , спина конечного  $J_f$ , спина ассоциации  $J_0$  и углового момента  $\Lambda$  относительного движения ассоциаций X и ядра остатка выполняется следующее правило:

$$\vec{\Lambda} + \vec{J}_0 = \vec{J}_3 ; \vec{J}_f + \vec{J}_3 = \vec{J}_i \quad /6/$$

$\psi_{\xi\Lambda}$  - осцилляторная функция относительного движения ассоциации и ядра остатка. Амплитуда  $M_0$  поглощения  $\pi^-$ -мезона ассоциацией X с развалом ассоциации на нейтрон и остаток (x-1) представлялась в виде:

$$M_0 = \int e^{i\vec{k}(\vec{r}_n - \vec{R}_{x-1})} \Psi(r_{x-1}) \hat{O}(r_1 r_2) \Psi(r_x) d^3(r_x), \quad /7/$$

где  $\vec{k} = \frac{x-1}{x} \vec{k}_1 - \frac{1}{x} \vec{k}_2$ ,  $\hat{O}(r_1 r_2)$  - оператор двухнуклонного

поглощения  $\pi^-$ -мезона с S- или P-орбиты  $\pi^-$ -мезоатома /8/. Функции  $\Psi(r_x)$  и  $\Psi(r_{x-1})$  записываются в координатах Якоби /6,7/. В волновую функцию  $\Psi(r_x)$  включается двухнуклонная корреляционная функция /8/. При вычислении интегралов /7/ удобно использовать технику преобразования координат Якоби /7/. Используя /6/ и /7/, можно записать вероятность поглощения  $\pi^-$ -мезонов ассоциацией X:

$$dW = \sum_{if, \Lambda} N_{if, \Lambda} (X) R_{\xi\Lambda}^2 \left( \frac{q}{q_0} \right) |M_0(\pi^- X)|^2 \delta \left( \sum_n \vec{p}_n + \vec{q} \right) \quad /8/$$

$$\delta \left( E_0 - \sum_n E_n - \frac{q^2}{2m_{A-X}} \right) \prod_n d^3 p_n d^3 q.$$



В выражении /8/  $E_0 = E_{\pi} - E^* - \Delta E$ , где  $\Delta E$  - энергия, необходимая для удаления ассоциаций  $X$  из ядра  $A$ ,  $E^*$  - энергия возбуждения ядра остатка  $(A-X)$ . В интеграле /7/ все сомножители зависят от  $E^*$ , и, в принципе, надо провести интегрирование по всем значениям энергии возбуждения. Однако, если спектр возбуждения является функцией с довольно узким максимумом, как, например, в процессах  $3\alpha$  и  $3\beta$ , то можно воспользоваться теоремой о среднем. Это означает, что в выражение /7/ подставляется  $N_{if, \Lambda}$  - сумма эффективных чисел ассоциации по всем уровням возбуждения ядра остатка, начиная с порога развала  $(A-X)$  на  ${}^8\text{Li}$  и другие фрагменты, а в  $\delta$ -функцию подставляется  $\bar{E}^*$ , равное среднему значению энергии возбуждения.

Вероятности оценивались так же, как в работе /3/:

$$W = \sum_{if, \Lambda} N_{if, \Lambda} \text{эфф} (X) W_f (A-X \rightarrow C+D) W_{\text{св}}(\pi-X). \quad /9/$$

$W_f (A-X \rightarrow C+D)$  - вероятность распада конечного ядра на частицы  $C$  и  $D$ .

Оценка вероятностей показала, что в реакции /1/ проявление пяти- и шестинуклонных /3б-3в/ механизмов поглощения почти равновероятно, в то время как вероятность поглощения на  $(pp)$ -парах /3а/ в два раза больше вероятности пяти- или шестинуклонного механизмов.

Процесс /3а/ соответствует поглощению на  ${}^{31}\text{S}$ - или  ${}^{33}\text{P}$ -парах нуклонов с  $T=1$  и  $S=0$  или  $T=1$  и  $S=1$  соответственно. Ядро  ${}^{12}\text{B}^*$  в этой реакции может образовываться только в состояниях со схемой Юнга [4431], так как только в этом случае, согласно правилам отбора /6/ по схемам Юнга, возможен дальнейший распад  ${}^{12}\text{B}^*$  на  ${}^8\text{Li}$  и  ${}^4\text{He}$ .

Согласно правилу /6/ возможны значения  $\Lambda = 1, 2$ .

Относительно небольшая роль двухнуклонного механизма в канале /3а/ связана со следующими обстоятельствами.

Во-первых, эффективные числа  $(pp)$ -пар при учете развала  ${}^{12}\text{B}^*$  становятся сравнимыми с эффективными числами многонуклонных ассоциаций. На рис. 4 показан рассчитанный в  $LS$ -связи с использованием оболочечных волновых функций /9/ спектр возбуждения ядра  ${}^{12}\text{B}^*$  с развалом на  ${}^8\text{Li}$  и  ${}^4\text{He}$ . Экспериментальные данные нанесены в виде гистограммы.

Во-вторых, при многонуклонных механизмах поглощения появляется возможность поглощения на квазидейтронных парах в ассоциациях нуклонов.

Оценка вероятностей механизмов в реакции  $\pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{H}_{p+p+n}/2/$  показала, что в этом канале основную роль играют двух- и трехнуклонные механизмы поглощения. Вероятность трехнуклонного механизма в 1,5 раза больше вероятности двухнуклонного, в то время как эта же вероятность приблизительно в 5 раз больше вероятности пяти- или шестинуклонного механизмов и почти в 3 раза больше четырехнуклонного. Это связано с тем, что в этом канале менее жесткие требования при выборе состояний ядер остатков и эффективные числа  ${}^3\text{Li}$  на порядок больше эффективных чисел  ${}^6\text{Be}$  и  ${}^5\text{Li}$ . В реакции  $/2/$  вероятности поглощения  ${}^6\text{Be}$  и  ${}^5\text{Li}$  принимались теми же, что и в реакции  $/1/*$ .

### Энергетические спектры и угловые корреляции

На рис. 1в и 1г приведены теоретически рассчитанные спектры  $\alpha$ -частицы и нейтрона для реакции  $\pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^4\text{He}_{p+n}$ . Учитывались все три процесса  $/3а - 3в/$ , причем вклад каждого в полный спектр определялся по его вероятности. Теоретический спектр нормировался по площади экспериментальной гистограммы. Из этих рисунков видно, что суммой трех механизмов удается хорошо описать экспериментальный спектр нейтронов, а рассчитанный спектр  ${}^4\text{He}$  качественно передает характер экспериментальных данных.

На рис. 2,3 представлены угловые корреляции для процессов  $/3а - 3в/$  в системах  $(n, (x-1))$ . В целом теоретические расчеты угловых корреляций удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. При этом наилучшее согласие наблюдается для угловых корреляций  $(n, {}^4\text{He})$  и  $(n, {}^4\text{He } p)$ .

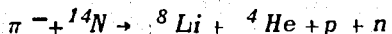
Для угловой корреляции  $(n, p)$  учет вклада от поглощения на двухнуклонной  $(pp)$ -паре в  ${}^6\text{Be}$  улучшает согласие теоретической кривой с экспериментальными данными.

На рис. 5г приведен спектр нейтронов для реакции  $\pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{H}_{p+p+n}/2/$ . Теоретическая кривая рассчитана в предположении механизмов 4а и 4б. Качественное согласие таких расчетов с экспериментальными данными наблюдается только в области  $E_n > 30$  Мэв. Отличие теоретического спектра от экспериментального

\* Оценки проводились в предположении поглощения пионов с  $P$ -орбиты  $\pi$ -мезоатома. Однако картина существенно не изменится, если предположить поглощение с  $S$ -орбиты.

в области  $E_n < 30$  Мэв, возможно, связано с тем, что играют существенную роль и другие многонуклонные механизмы поглощения, где поглощение  $\pi$ -мезона происходит более сложным образом, чем в случае реакции /1/. Экспериментальные угловые распределения  $(pp, n)$  для реакции /2/ и теоретическая кривая, рассчитанная в предположении трехнуклонного механизма поглощения, показаны на рис. 6г.

В данном случае наблюдается удовлетворительное согласие теоретических расчетов с экспериментальными данными. Таким образом, на основании полученных экспериментальных данных и проведенных теоретических расчетов можно утверждать, что в многочастичных реакциях с образованием  ${}^8\text{Li}$  при поглощении  $\pi^-$ -мезона ядрами  ${}^{14}\text{N}$  с точки зрения теории прямых ядерных реакций существенную роль играют несколько различных нуклонных ассоциаций, так, например, для реакции



основную роль играет поглощение  $\pi$ -мезонов на ассоциациях  $(pp)$ ,  ${}^5\text{Li}$  и  ${}^6\text{Be}$ .

Реакцию  $\pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{H} + p + p + n$  не удастся полностью описать в предположении поглощения  $\pi^-$ -мезонов ядром  ${}^{14}\text{N}$  на ассоциациях  $(pp)$  и  ${}^3\text{Li}$ .

Авторы выражают благодарность кандидату физико-математических наук Н.С.Зеленской и профессору В.Г.Неудачину за полезные обсуждения.

### Литература

1. Ю.А.Батусов, С.А.Бунятов, В.М.Сидоров, В.А.Ярба. ЯФ, 6, вып. 6, 1151 /1967/.
2. Ю.А.Батусов, С.А.Бунятов и др. ЯФ, 10, вып. 2, 354 /1969/.
3. Н.М.Агабабян, Ю.А.Батусов, С.А.Бунятов и др. ЯФ, 13, вып. 2, 283 /1971/.
4. Н.М.Агабабян, Ю.А.Батусов, С.А.Бунятов, Г.Р.Гулканян, В.М.Сидоров, В.А.Ярба. Препринт ОИЯИ, 10-5891, Дубна, 1971.
5. F.James. W505, FOWL, CERN Program Library.
6. В.Г.Неудачин, Ю.Ф.Смирнов. Нуклонные ассоциации в легких ядрах. Наука, Москва, 1969.
7. Н.Ф.Голованова, Н.С.Зеленская. ЯФ, 8, вып. 2, 274 /1968/.

8. V.Sakamoto. Nucl.Phys., 87, 414 (1966).

9. А.Н.Бояркина. Изв. АН СССР, сер. физ., 28, 371 /1964/.

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 ноября 1972 года.

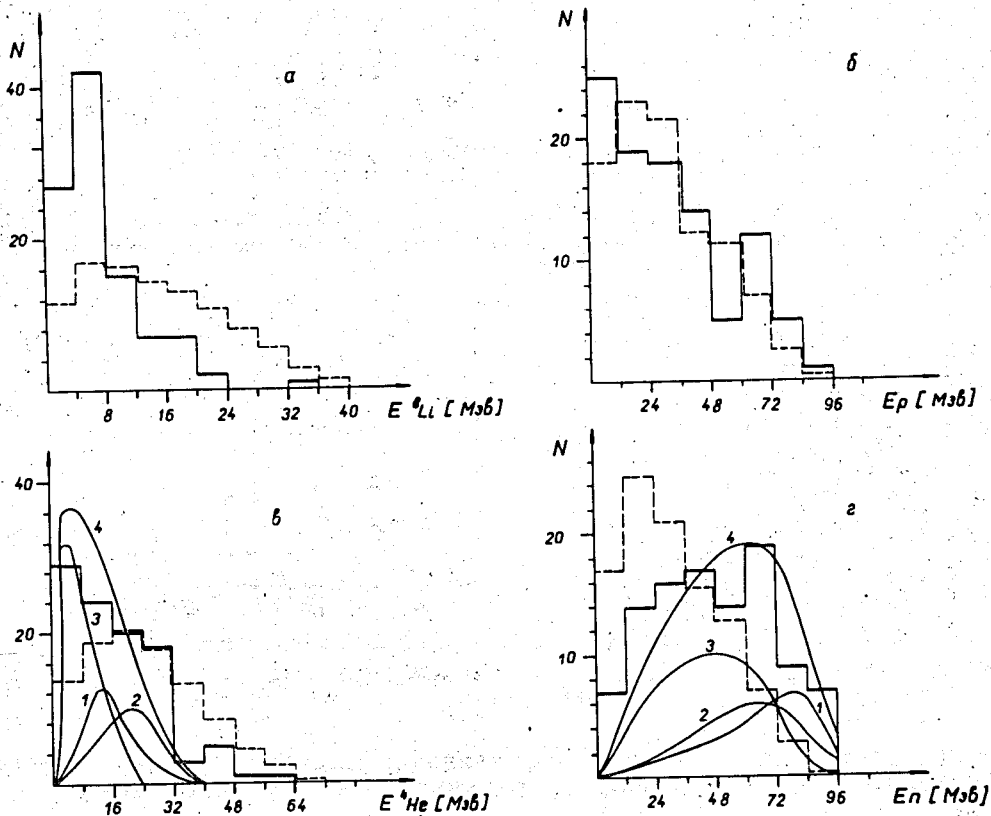
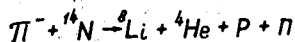


Рис. 1. Энергетические спектры вторичных частиц для реакции  $\pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^4\text{He} + p + n$ . Кривыми нанесены теоретические расчеты: 1/ поглощение на ассоциации  ${}^6\text{Be}$ , 2/ поглощение на ассоциации  ${}^5\text{Li}$ , 3/ поглощение на  $(pp)$ -паре, 4/ суммарный спектр;  $W^1 : W^2 : W^3 = 1 : 1 : 2$ .

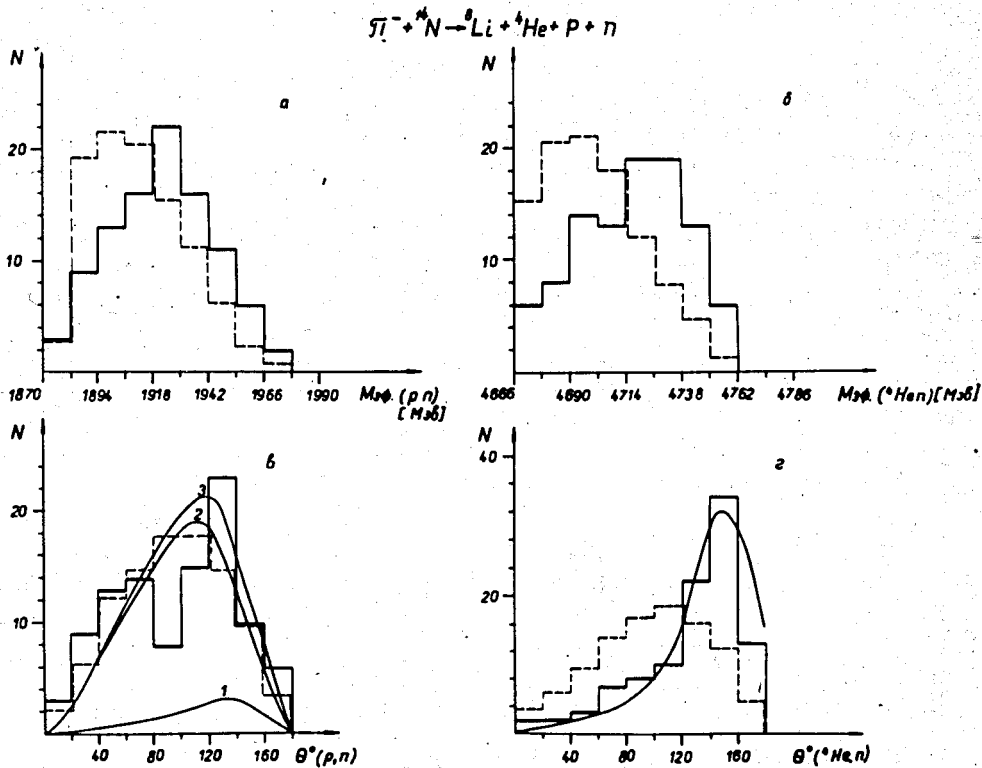


Рис. 2. Распределение по эффективным массам и углам разлета комбинаций  $(p, n)$  и  $({}^4\text{He}, n)$  для реакции  $\pi^- + {}^4\text{N} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^4\text{He} + p + n$ .

На рис. 2в нанесены теоретические кривые для угловой корреляции  $(p, n)$ : 1/ поглощение на  $(pp)$ -паре в ассоциации  ${}^6\text{Be}$ , 2/ прямое поглощение на  $(pp)$ -паре, 3/ суммарная кривая;  $W^1:W^2 = 1:10$ .

На рис. 2г кривой показаны теоретические расчеты для поглощения на ассоциации  ${}^5\text{Li}$ .

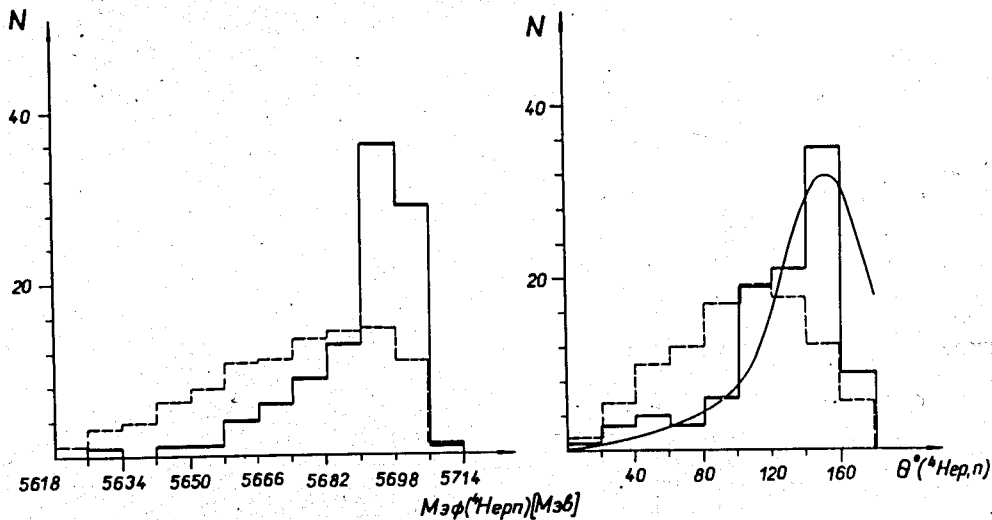
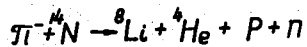
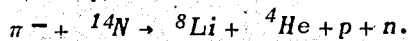


Рис. 3. Распределение по эффективной массе и углу разлета комбинации ( ${}^4\text{He}p, n$ ) для реакции



Теоретические расчеты для поглощения  $\pi^-$ -мезона ассоциацией  ${}^6\text{Be}$  нанесены в виде кривой.

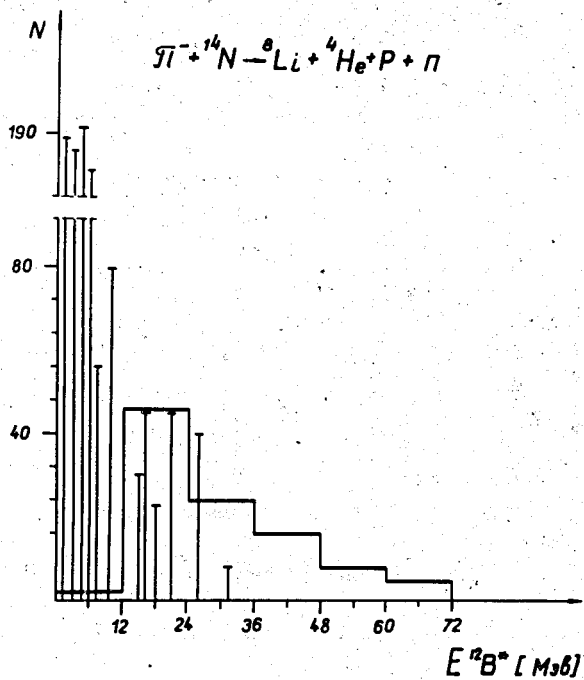


Рис. 4. Спектр возбуждения ядра-остатка  ${}^{12}\text{B}^*$  для реакции  $\pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^4\text{He} + p + n$ .  
Сплошные линии - теоретический расчет.

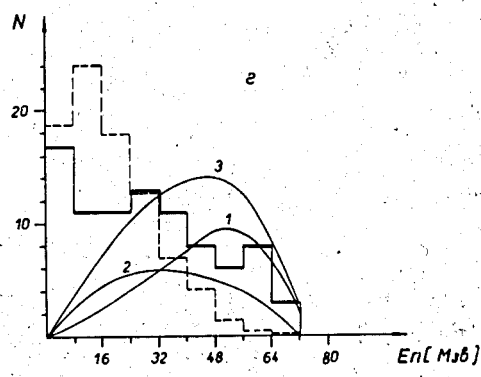
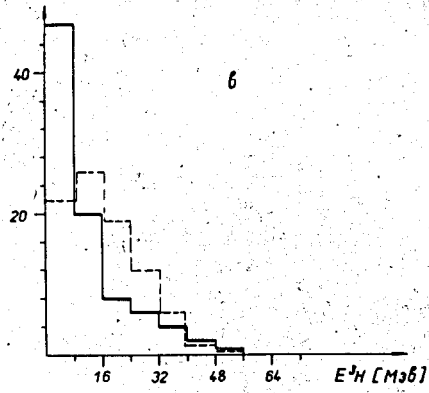
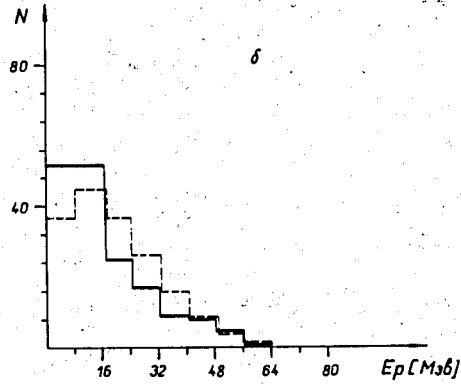
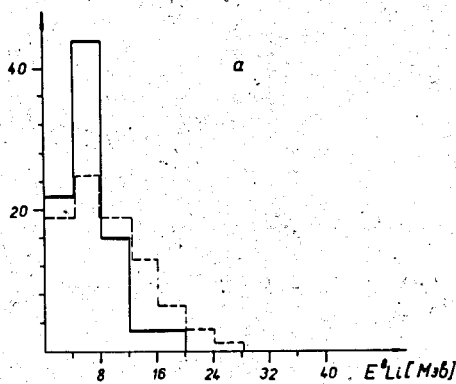
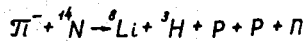


Рис. 5. Энергетические спектры вторичных частиц для реакции  $\pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{H} + p + p + n$ .  
 На рис. 5г кривыми показаны теоретические расчеты: 1/ поглощение на ассоциации  ${}^3\text{Li}$ , 2/ поглощение на  $(pp)$ -паре, 3/ суммарная кривая;  $W^1 : W^2 = 1,5 : 1$ .



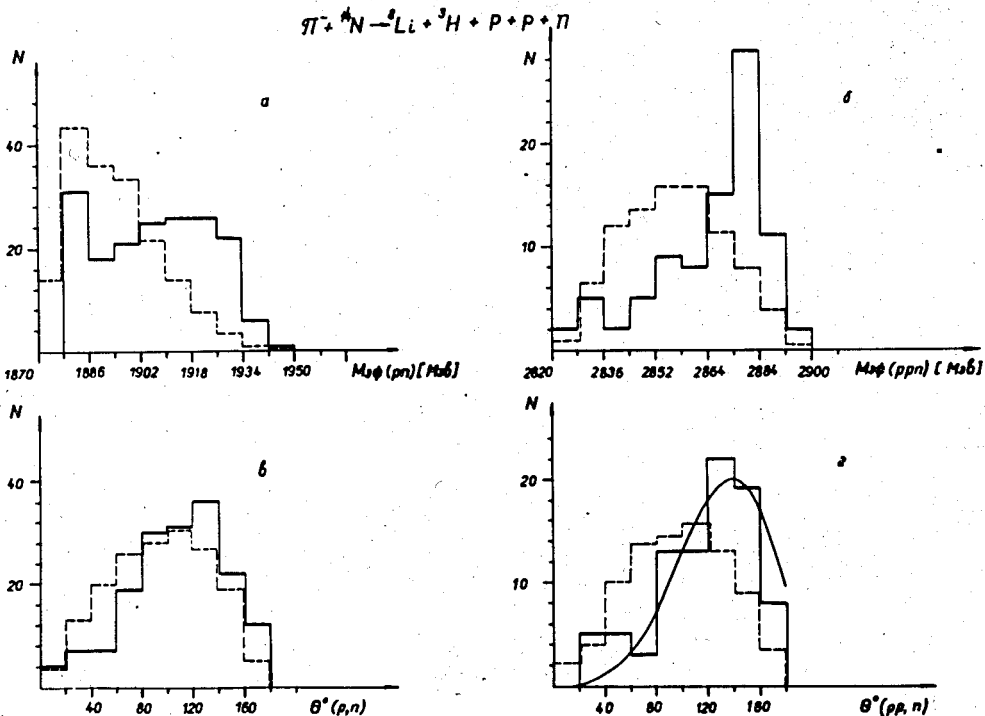


Рис. 6. Распределение по эффективным массам и углам разлета комбинаций  $(p, n)$  и  $(pp, n)$  для реакции  $\pi^- + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^8\text{Li} + {}^3\text{H} + p + p + n$ .

На рис. 6г нанесена теоретическая кривая для поглощения на ассоциации  ${}^3\text{Li}$ .