

11  
К 99



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

Б. Кюя, Б. Шленк

P - 1197

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ  
РЕАКЦИИ  $\text{He}^3 + \text{T}$

Дубна 1963 год

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

Б. Кюн, Б. Шленк

P - 1197

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ  
РЕАКЦИИ  $He^3 + T$

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Дубна 1963 год

1818/2 нф.

## А н н о т а ц и я

Измерены угловые распределения заряженных частиц для всех каналов реакции  $He^3 + T$  при энергиях падающих тритонов: 460 Кэв; 665 Кэв; 900 Кэв и 1087 Кэв. Форма полученных распределений не изотропная и меняется с энергией. На основании угловых распределений и определения соотношений между каналами реакции получены полные сечения реакции и сечения для каждого отдельного канала.

B.Kün, B.Schlenk

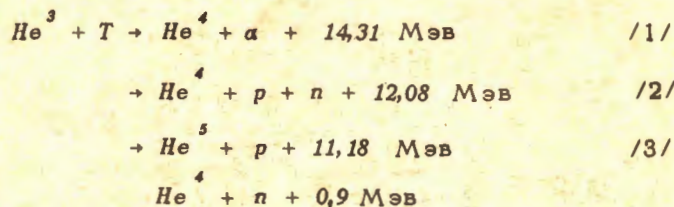
### INVESTIGATION OF ANGULAR DISTRIBUTIONS OF THE $He^3 + T$ REACTION

#### Abstract

The angular distributions of charged particles have been measured for all the channels of the  $He^3 + T$  reaction at the following incident triton energies: 460 KeV, 665 KeV, 900 KeV, and 1087 KeV. The form of the distributions obtained is not isotropic and varies with energy. According to the angular distributions and relations between the reaction channels there were obtained the total reaction cross sections and the cross sections for each individual channel.

## 1. Введение

Исследованию реакции



посвящены три экспериментальные работы <sup>/1-3/</sup>. В работах С.Д.Моак <sup>/2/</sup> и Ли Га Ена и др. <sup>/3/</sup> были найдены соотношения между ветвями реакции и определены полные сечения всех трех ветвей. Данные по полным сечениям получены на основании измерения дифференциальных сечений под углом  $90^\circ$  и последующего пересчета в предположении изотропности распределения выходов каждого из каналов реакции.

Поскольку предположения о сферической симметрии каждого канала реакции в интервале рассматриваемых энергий не имели экспериментального подтверждения, нами были проведены эти исследования.

## 2. Методика измерений

Измерения проводились с ионами трития, ускоренными электростатическим генератором ОИЯИ. Напряжение генератора стабилизировалось с точностью 0,1-0,2% и калибровалось по резонансным пикам реакции  $F(p, \gamma)$ . Ионы трития, ускоренные электростатическим генератором, пройдя через магнитный анализатор и коллиматор /  $\varnothing = 1,5 \text{ мм}$  /, попадали на входное окошко точечной газовой мишени, помещенной в центре вакуумной камеры <sup>/4/</sup>. Схема опыта представлена на рис. 1. Окошко газовой мишени закрывалось тонкой слюдяной пленкой /при  $E_T = 1 \text{ Мэв}$   $\Delta E \approx 35 \text{ Кэв}$ /. Тормозная способность пленки при данной энергии тритонов определялась на основании измерения смещения резонансных пиков реакции  $F(p, \gamma)$  и тормозных способностей, измеренных в работе <sup>/5/</sup>. Давление  $\text{He}^3$  в мишени составляло 40 мм рт.ст. Ток падающих частиц измерялся цилиндром Фарадея, соединенным с интегратором тока. Расположение цилиндра Фарадея показано на рис. 1. Для проведения измерений под  $0^\circ$  дно цилиндра Фарадея заклеивалось тонкой фольгой из алюминия /3 мг/см<sup>2</sup>/, достаточной для поглощения пучка ускоренных ионов, но пропускающей продукты реакций.

Частицы, образующиеся в результате ядерной реакции, регистрировались телескопом, состоящим из пропорционального счетчика и малогабаритного фотоумножителя ФЭУ-31 с кристаллом CsJ. Телесный угол телескопа составлял  $1,34 \cdot 10^{-2}$  стер., а угловое разрешение  $7,5^\circ$ . Пропорциональный счетчик и фотоумножитель были включены в схему совпадений, что обеспечивало уменьшение фона от нейтронов и  $\gamma$ -квантов. Пропорциональный счетчик наполнялся аргоном с добавкой 2%  $\text{CO}_2$  до давления 750 мм рт.ст.

Тормозная способность газа счетчика и его входного окошка  $/3 \text{ мг/см}^2/$  была эквивалентна тормозной способности  $10 \text{ мг/см}^2$  алюминия. Разрешение фотоумножителя для протонов с энергией  $10 \text{ Мэв}$  составляло  $10\%$ . Импульсы от фотоумножителя после усиления подавались на многоканальный анализатор, работающий в режиме совпадения. Управляющими импульсами для многоканального анализатора являлись импульсы от пропорционального счетчика. Монитором служил фотоумножитель ФЭУ-С с кристаллом  $\text{CsJ}$ , расположенный под углом  $45^\circ$  к падающему пучку ионов трития.

### 3. Разделение каналов реакции

Спектры заряженных частиц, возникающих в различных каналах реакции, имеют вид, представленный на рис. 2. Поскольку дейтроны из ветвей  $/1/$  и протоны из ветви  $/3/$  имеют близкие энергии, они телескопом не разрешаются. Необходимое разрешение пиков протонов и дейтронов реакции  $/1/$  и  $/3/$  может быть получено путем использования различия тормозной способности для дейтронов и протонов в некотором веществе. В качестве такого вещества использовался алюминий. При проведении измерений под различными углами задача усложняется тем, что энергия дейтронов и протонов из реакций  $/1/$  и  $/3/$  меняется с углом. /При  $E_T = 900 \text{ Кэв}$   $E_d(0^\circ) = 12,4 \text{ Мэв}$ ,  $E_d(153^\circ) = 7,8 \text{ Мэв}$ ,  $E_p(0^\circ) = 11,5 \text{ Мэв}$  и  $E_p(153^\circ) = 8,2 \text{ Мэв}/$ . Это требует использования при различных углах алюминиевых фольг различных толщин. Расчет показал, что при измерениях под углами от  $0^\circ$  до  $60^\circ$  хорошее разрешение можно получить с фольгой  $90 \text{ мг/см}^2$ , а при углах от  $60^\circ$  до  $153^\circ$  с фольгой  $60 \text{ мг/см}^2$ .

Поскольку эти толстые фольги срезают большую часть непрерывного спектра, соответствующего ветви  $/2/$ , необходимо дополнительное измерение без разделяющих фольг. Но та часть непрерывного спектра, на которую накладываются импульсы от  $\alpha$ -частиц из каналов  $/1/$ ,  $/2/$  и  $/3/$  /рис. 2/, остается ненаблюдаемой. В связи с этим измерение угловых распределений протонов из канала  $/2/$  производилось с фольгой  $7,4 \text{ мг/см}^2$ , которая поглощала все указанные  $\alpha$ -частицы. Эта фольга совместно с окошком и газом счетчика срезает непрерывный спектр от  $0$  до  $2,8 \text{ Мэв}$ . Полный спектр может быть получен разумной экстраполяцией экспериментально измеренной части спектра к нулю.

Таким образом, задача разделения каналов реакции включает:

- а/ измерение угловых распределений в интервале углов  $0^\circ$ - $153^\circ$  без разделяющей фольги;
- б/ измерение угловых распределений в интервале углов  $0^\circ$ - $60^\circ$  с фольгой  $90 \text{ мг/см}^2$ ;
- в/ измерение угловых распределений в интервале углов  $60^\circ$ - $153^\circ$  с фольгой  $60 \text{ мг/см}^2$ .

На рис. 3 представлены два спектра, один из них получен с фольгой  $60 \text{ мг/см}^2$ , а второй - без разделяющей фольги. При измерении без разделяющих фольг появляются кроме спектра реакции  $\text{He}^3 + \text{T}$  пики от протонов из реакций  $\text{O}^{16}(t, p)\text{O}^{18}$  и  $\text{C}^{12}(t, p)\text{C}^{14}$ . Кислород является составной частью пленки из слюды, ограничивающей объем газовой мишени. Слой углерода возникает при бомбардировке мишени пучком ускоренных частиц.

Остановимся более подробно на методике обработки спектров. На рис. 4 показано, каким образом выделяются участки спектра, соответствующие каждому каналу реакции. Площадь  $A$  определяет выход дейтронов из канала /1/. Определение выхода протонов из канала /3/ осуществлялось измерением площади, образованной пиком протонов этого канала и экстраполяцией непрерывного спектра к максимальному значению.

Поскольку экстраполяция может быть проведена по направлениям, показанным на рис. 4, за истинную площадь спектра канала /3/ принималось среднее значение площади  $B$  и  $B + C$ , а отклонение предельных значений от среднего включалось в ошибку экстраполяции. В интервале исследуемых энергий эта ошибка составляла 20-30%. Выход протонов реакции /2/ определялся измерением площади непрерывной части спектра. Экспериментально измерялся участок спектра между точками  $E_1$  и  $E_2$  /рис. 4/. Восстановление всей площади спектра осуществлялось разумной экстраполяцией измеренного участка спектра к нулевому и максимальному значению энергии. Экстраполяция к нулевой энергии производилась от точки  $E_p = 0,25 E_{p \text{ макс}}$  по двум направлениям /рис. 4/ в предположении, что до  $E_p = 0,25 E_{p \text{ макс}}$  спектр канала /3/ прямоугольный. Это предположение было доказано экспериментально.

Истинное значение площади спектра определялось усреднением площадей ограниченных предельными экстраполяциями, а отклонение предельных значений от среднего включалось в ошибку измерений, которая не превышала 6,3%.

При измерении угловых распределений на точечной газовой мишени форма непрерывного спектра искажается протонами из реакций, происходящих на окошке мишени. Для получения спектра в более чистом виде необходимо, чтобы продукты реакций, происходящих на окошке мишени, не попадали в телескоп. Этому требованию удовлетворяет "длинная" мишень, представленная на рис. 1. С помощью "длинной" мишени была изучена форма непрерывного спектра под углами  $30^\circ - 145^\circ$  в интервале энергий 460-1087 Кэв. В пределах ошибок измерений форма спектра оказывалась всегда прямоугольной. Этот результат подтвердился при измерениях спектров с фольгами толщиной 90 и 60 мг/см<sup>2</sup>, где часто было возможно наблюдать непрерывный спектр вблизи пика протонов реакции /3//нижний спектр рис. 3/.

#### 4. Результаты измерений

На рис. 5 представлены /в системе центра масс/ угловые распределения дейтронов канала /1/ реакции  $\text{He}^3 + \text{T}$ . Среднеквадратичная ошибка каждой точки распределений не превышает  $\pm 5\%$ . На оси ординат этого и последующих графиков нанесены дифференциальные сечения. Абсолютные величины этих сечений получены нормировкой относительного хода кривых по данным дифференциальных сечений под углом  $90^\circ$ , представленных в работе /3/.

Из рисунка видно, что угловое распределение при 460 Кэв симметрично относительно  $90^\circ$  и имеет максимум при  $90^\circ$ . С увеличением энергии положение максимума не меняется, в то время как дифференциальное сечение в максимуме растет. При энергии 665 Кэв и выше наблюдается асимметрия в угловых распределениях, значение которой превышает ошибки измерений.

На рис. 6 представлены угловые распределения протонов из канала /3/ реакции /в системе центра масс/. Среднеквадратичная ошибка этих измерений составляет 20-30%. При энергии 665 Кэв в районе  $40^\circ$  появляется широкий максимум. С ростом энергий положение этого максимума смещается в сторону больших углов.

Угловые распределения непрерывной части спектра приведены на рис. 7. Эти распределения представлены в лабораторной системе координат. Среднеквадратичная ошибка каждой экспериментальной точки не превышает 12%. Как видно из рисунка, полученные распределения асимметричны относительно угла  $90^\circ$ . Выход частиц в малые углы более вероятен. При возрастании энергии эта асимметрия увеличивается.

Полученные результаты показывают, что начиная уже с энергии 460 Кэв угловые распределения продуктов реакции каждого канала не изотропны.

На основании измерений спектров под углом  $90^\circ$  при энергиях 460, 665, 900 и 1087 Кэв определялись соотношения между выходами продуктов реакции каждого канала. Результаты измерений и их среднеквадратичные ошибки представлены в табл. 1. Как видно из таблицы, в пределах ошибок измерений эти соотношения не меняются.

Т а б л и ц а 1

Соотношения между выходами разных каналов реакции  $\text{He}^3 + \text{T}$

Энергия	460 Кэв	665 Кэв	900 Кэв	1087 Кэв
Канал				
канал /1/	/43,5 $\pm$ 2/%	/45,5 $\pm$ 2/%	/45,5 $\pm$ 2/%	/46 $\pm$ 2/%
канал /2/	/50 $\pm$ 6/%	/48,5 $\pm$ 6/%	/46,5 $\pm$ 6/%	/45 $\pm$ 6/%
канал /3/	/6 $\pm$ 1,5/%	/6 $\pm$ 1,5/%	/7 $\pm$ 1,5/%	/9 $\pm$ 1,5/%

В таблице 2 и на рис. 8 представлены сечения каждого канала реакции и полное сечение реакции  $\text{He}^3 + \text{T}$  в интервале энергии 460-1087 Кэв. Сечения получены на основании угловых распределений, представленных на рис. 5,6,7. В этой таблице представлены среднеквадратичные ошибки в определении сечения. На рис. 8 также представлена кривая полного сечения реакции  $\text{He}^3 + \text{T}$  /кривая 5/, измеренная Ли Га Еном и др. /3/. Из сравнения результатов видно, что начиная с энергий примерно 650 Кэв данные этих авторов существенно расходятся с данными настоящей работы. Это объясняется тем, что вычисление полных сечений реакции  $\text{He}^3 + \text{T}$  в работе /3/ было проведено в предположении сферической симметрии угловых распределений продуктов реакции, высказанном впервые С.Д. Моак /2/. Наши измерения не подтвердили это предположение.

Т а б л и ц а 2

Полные сечения реакции  $\text{He}^3 + \text{T}$

Канал	Энергия 460 Кэв		665 Кэв		900 Кэв		1087 Кэв	
	$\sigma$ (мбн)	A	$\sigma$ (мбн)	A	$\delta$ (мбн)	A	$\sigma$ (мбн)	A
канал /1/	11,2 $\pm$ 0,6	0,41	16,9 $\pm$ 0,8	0,40	19,6 $\pm$ 1,0	0,39	21,0 $\pm$ 1,0	0,40
канал /2/	14,4 $\pm$ 1,7	0,53	22,5 $\pm$ 2,7	0,53	27,1 $\pm$ 3,2	0,54	27,5 $\pm$ 3,3	0,52
канал /3/	1,7 $\pm$ 0,3	0,06	2,9 $\pm$ 0,6	0,07	3,3 $\pm$ 0,7	0,07	4,4 $\pm$ 0,9	0,08
полные	27,3 $\pm$ 1,8		42,3 $\pm$ 2,8		50,0 $\pm$ 3,4		52,9 $\pm$ 3,6	

/Данные в столбце A представляют долю выхода соответствующего канала по отношению к полному сечению реакции/

Авторы выражают глубокую благодарность Г.М. Осетинскому и И.В. Сизову за постоянный интерес и ценные обсуждения, П.П. Костромину за изготовления газовых мишеней, а также группе обслуживания электростатического генератора.

Л и т е р а т у р а

1. E. Almquist, K.W. Allen, J.T. Devan, T.P. Pepper. Phys. Rev 83 (202) 1951.
2. C.D. Moak. Phys. Rev. 92 (383) 1953.
3. Ли Га Ен, Г.М. Осетинский, Н. Содном, А.М. Говоров, И.В. Сизов, В.И. Салацкий. ЖЭТФ т. 39, вып. 2 /8/ 1960 г. Препринт ОИЯИ, Р-426, 1956 г.
4. В.С. Сиксин, Л. Вайи, Б. Кюн. Препринт ОИЯИ № 621, 1960.
5. А.М. Говоров, Ли Га Ен, Г.М. Осетинский, В.И. Салацкий, И.В. Сизов. Препринт ОИЯИ, Р-725 /1961/.

Рукопись поступила в издательский отдел  
4 января 1963 года.



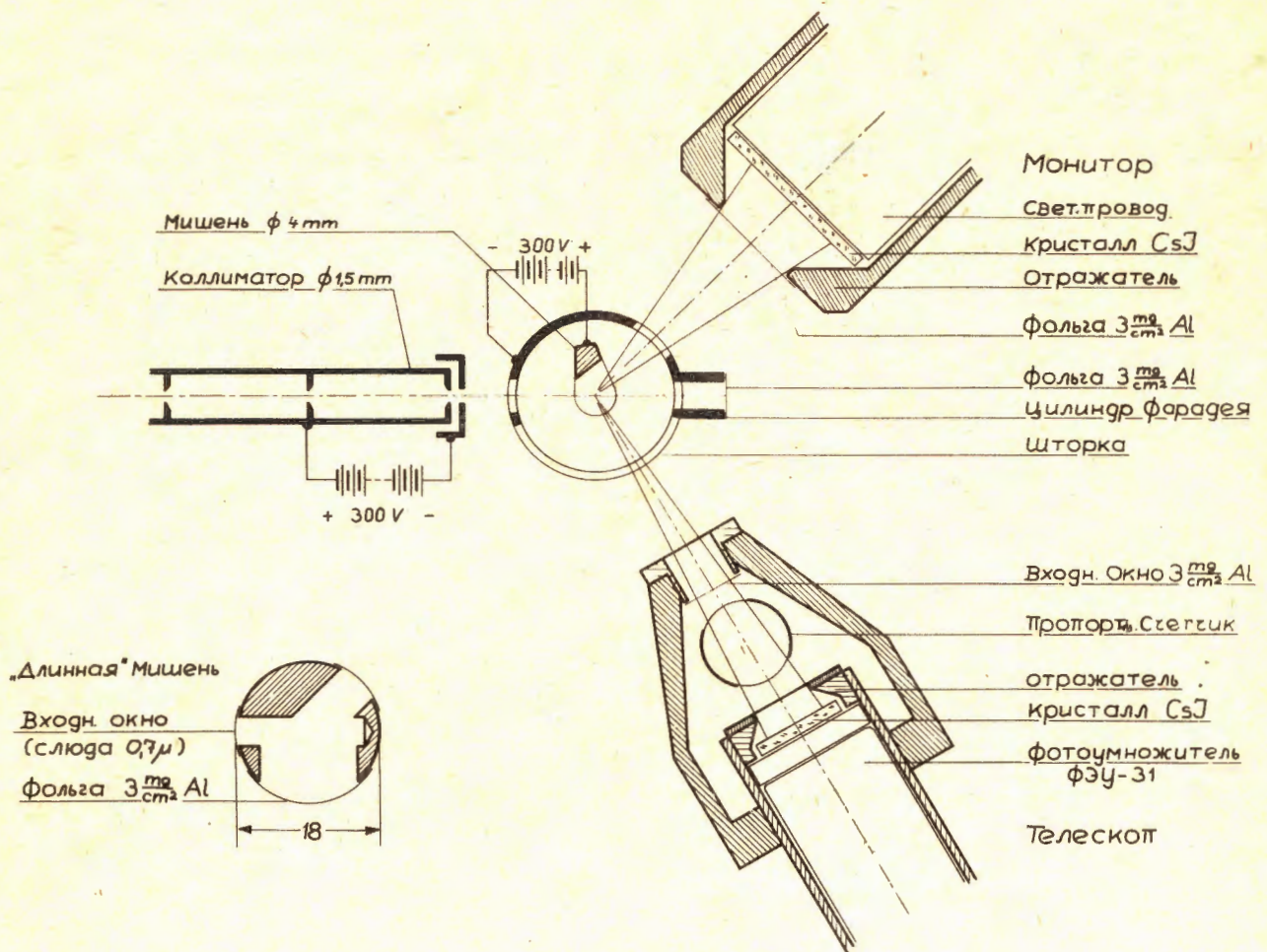


Рис. 1. Схема опыта.

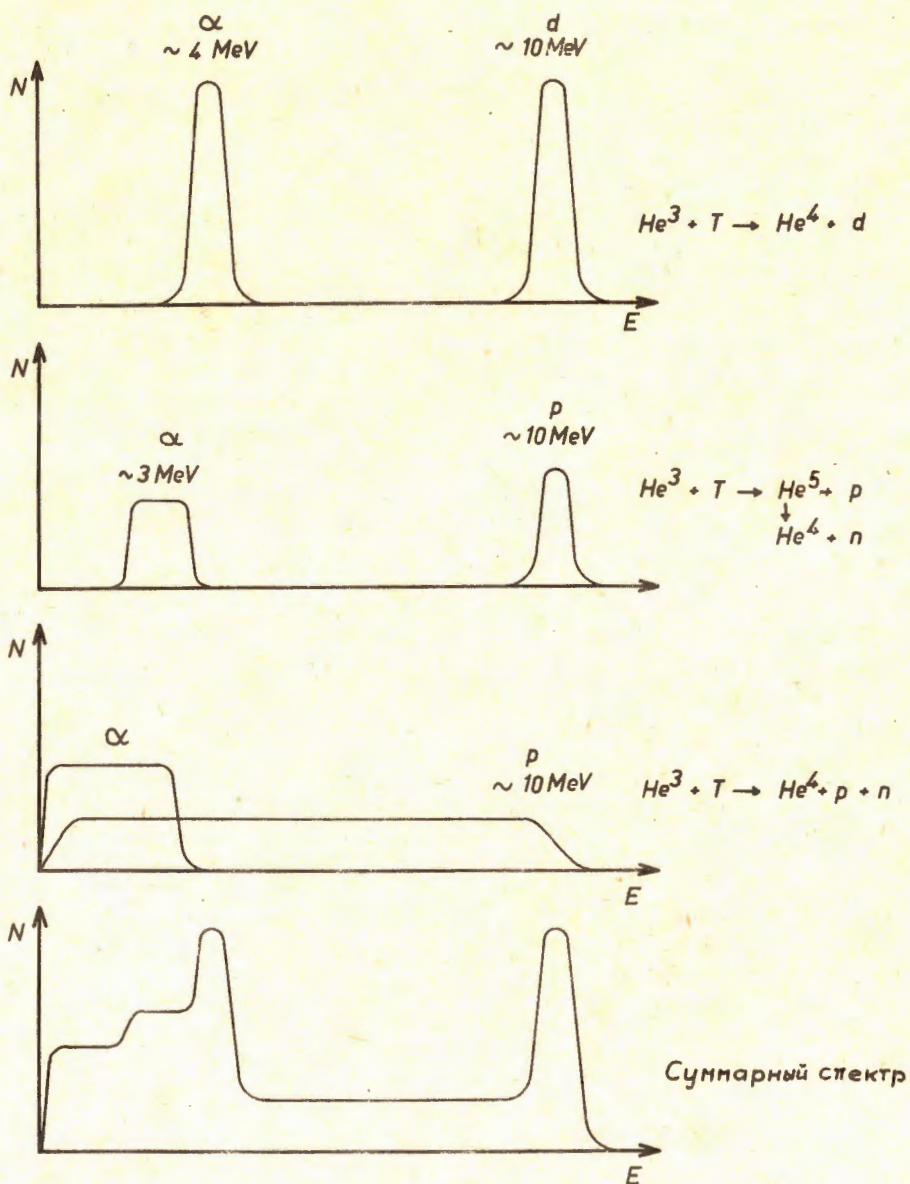


Рис. 2. Ожидаемые спектры продуктов реакции  $\text{He}^3 + \text{T}$ .  
 вверху - без разделяющей фольги;  
 внизу - с разделяющей фольгой  $60 \text{ мг/см}^2$ .

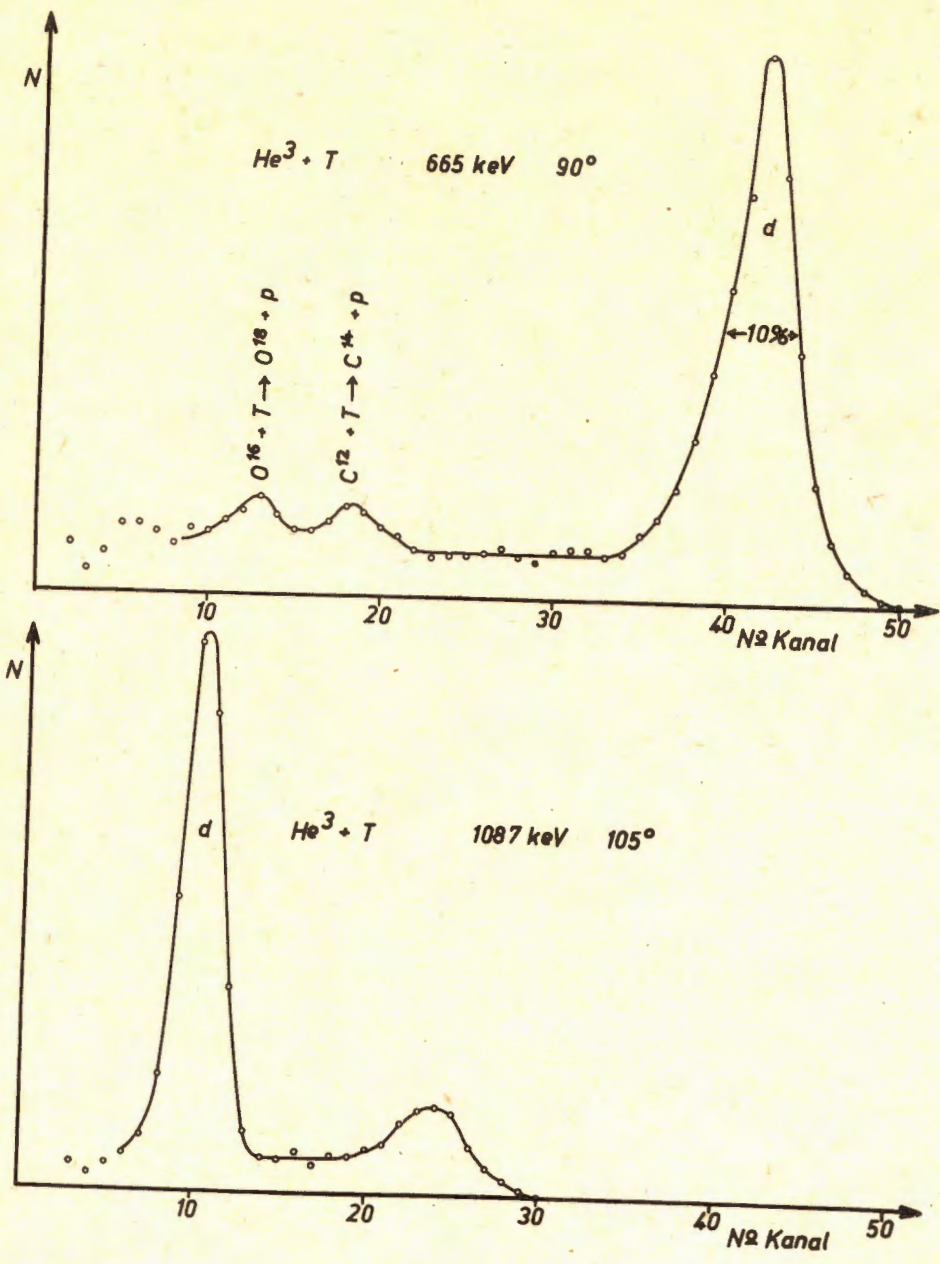


Рис. 3. Энергетический спектр частиц реакции  $He^3 + T$ .  
 вверху - без разделяющей фольги;  
 внизу - с разделяющей фольгой  $60 \text{ мг/см}^2$ .

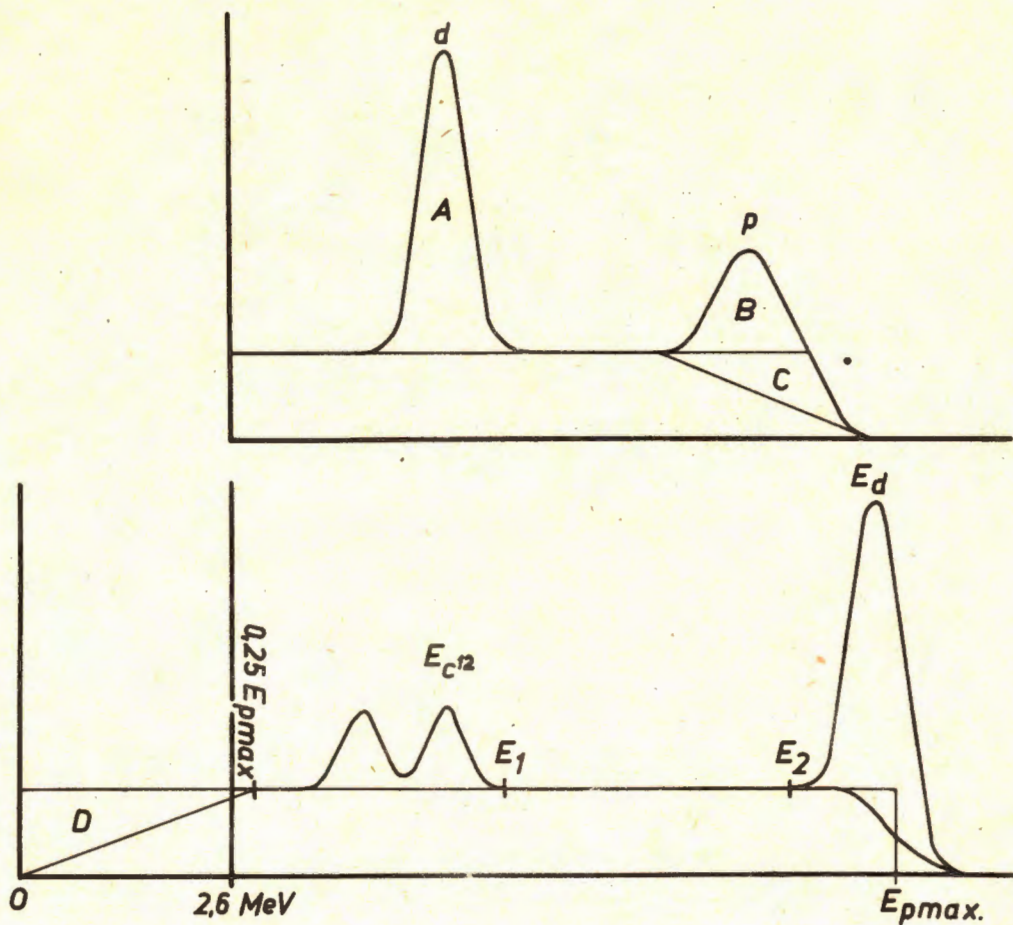


Рис. 4. К методике обработки спектров

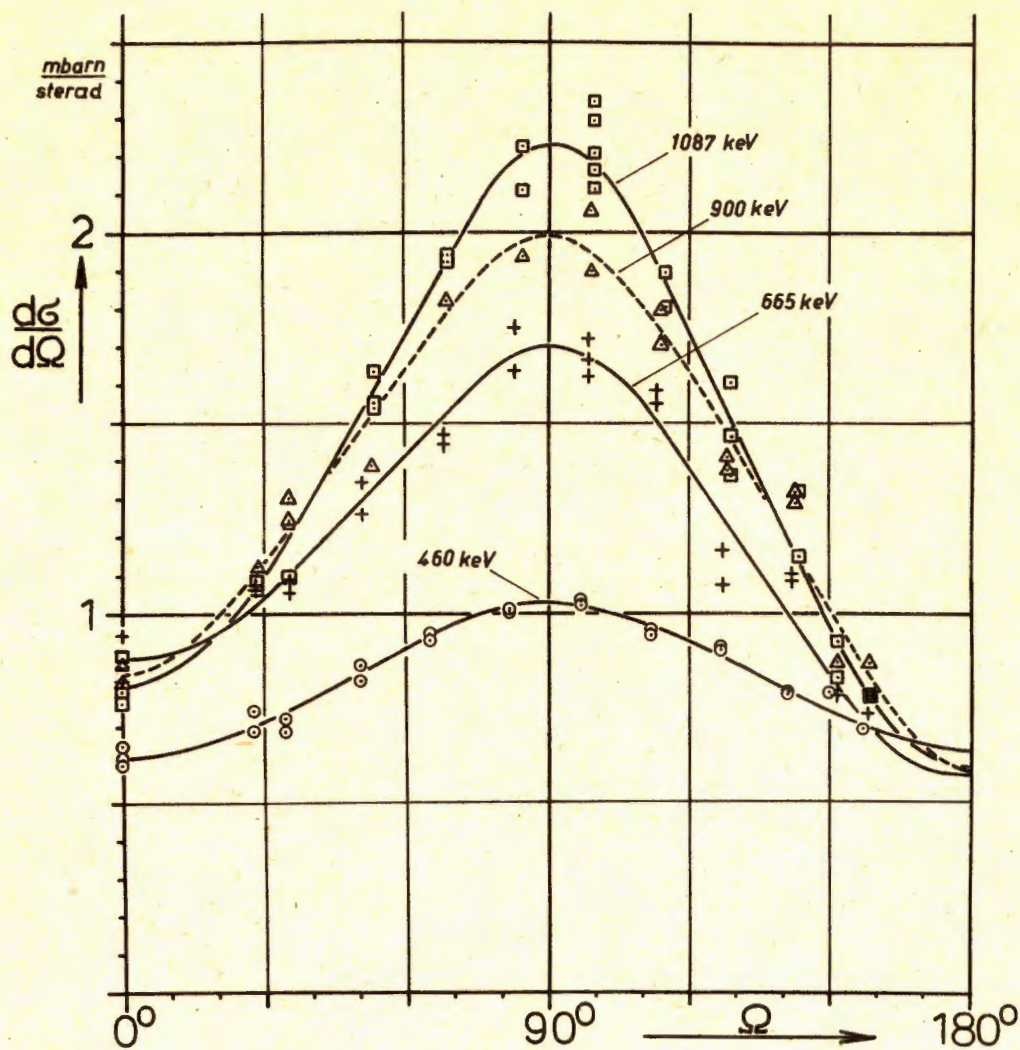


Рис. 5. Угловые распределения дейтронов канала /1/ реакции  $\text{He}^3 + \text{T}$  в системе центра масс

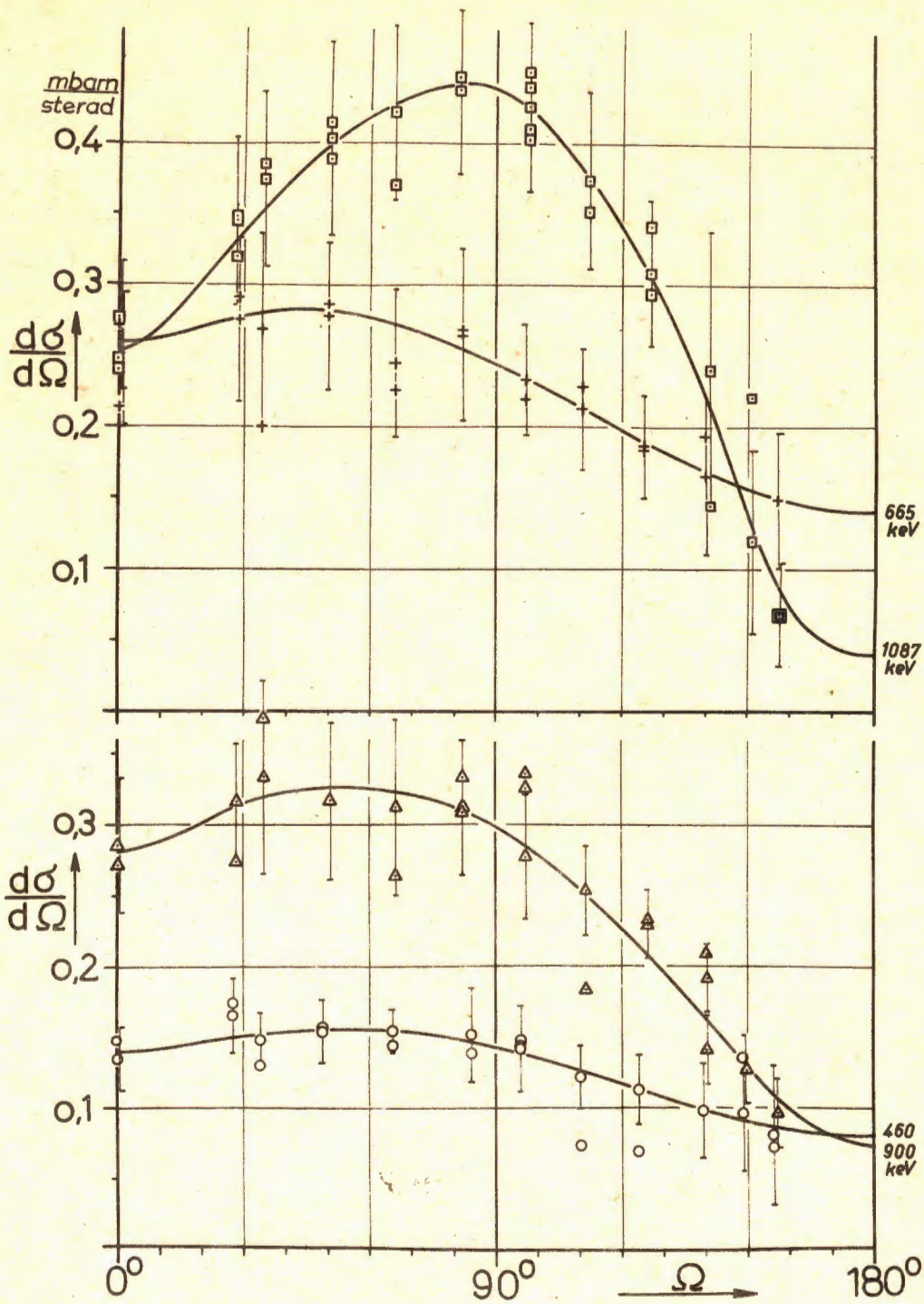


Рис. 6. Угловые распределения протонов канала /3/ реакции  $\text{He}^3 + \text{T}$  в системе центра масс

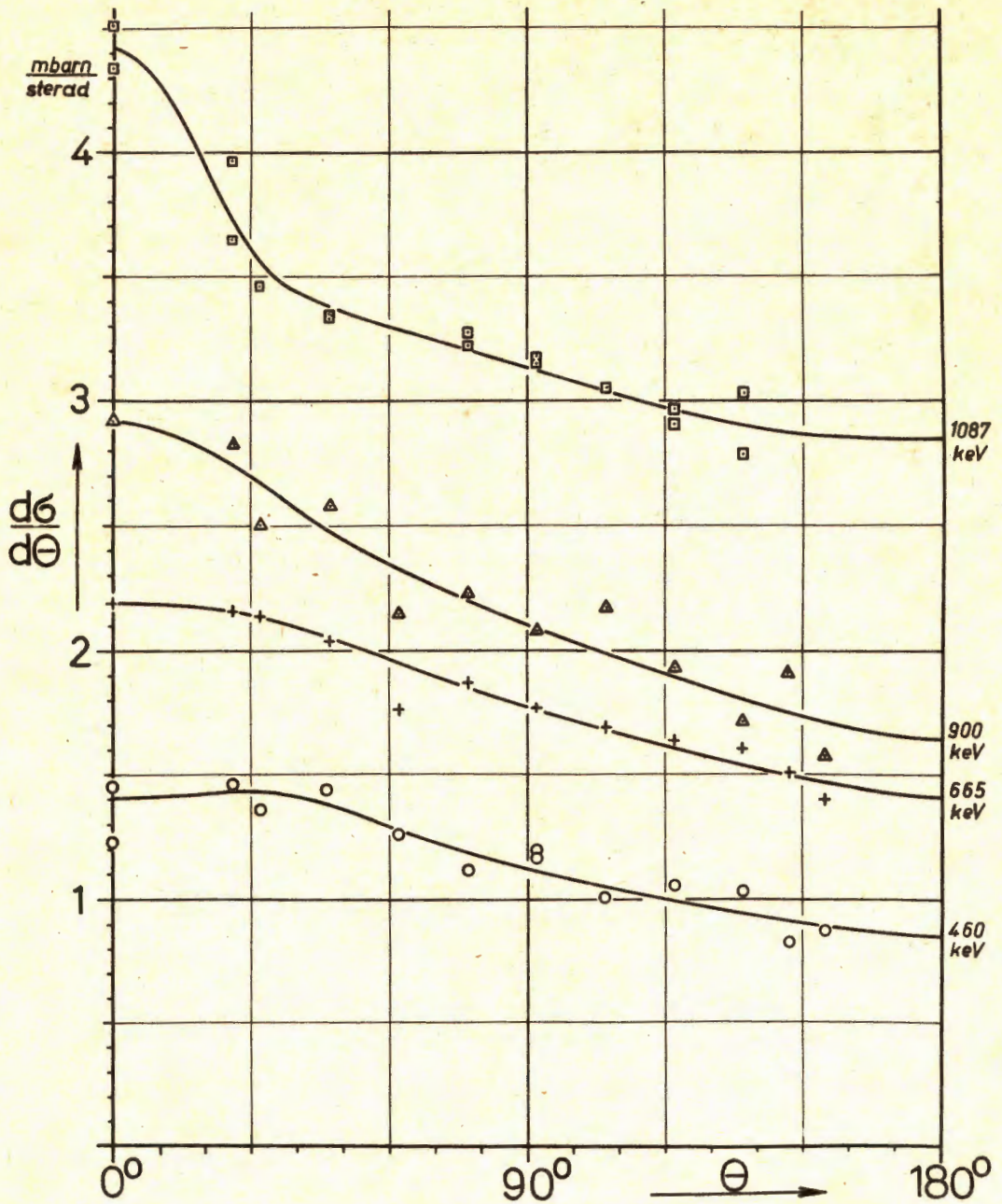


Рис. 7. Угловые распределения непрерывного спектра протонов канала /2/ реакции  $\text{He}^3 + \text{T}$  в лабораторной системе. /Шкала ординат кривой для 1087 Кэв смещена на 1 мб/стерад вверх/

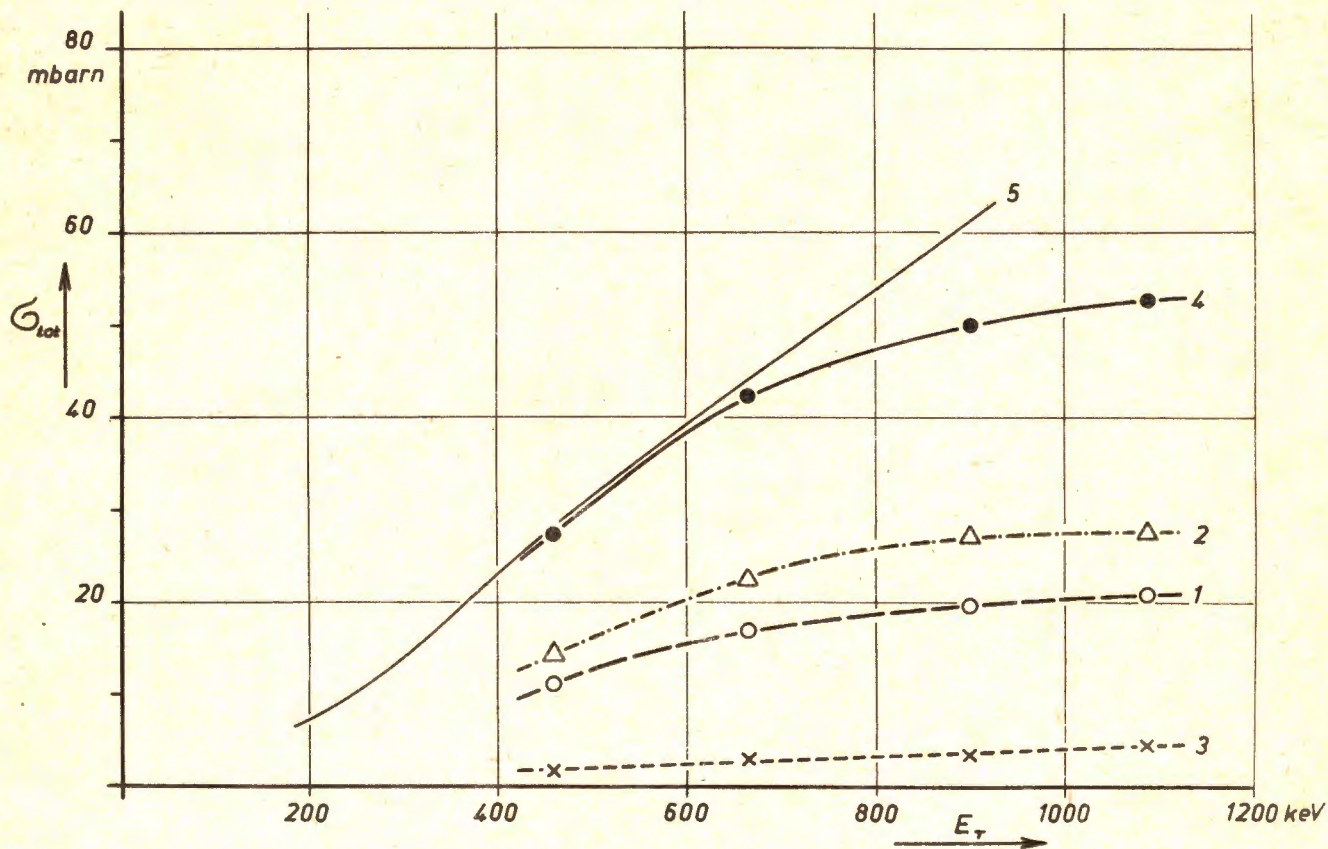


Рис. 8. Полные сечения реакции  $\text{He}^3 + \text{T}$ .

Кривая 1 - канал /1/,

Кривая 2 - канал /2/,

Кривая 3 - канал /3/,

Кривая 4 - полное сечение реакции  $\text{He}^3 + \text{T}$ ,

Кривая 5 - сечение реакции  $\text{He}^3 + \text{T}$ , взятое из работы Ли Га Ена и др.<sup>/3/</sup>.