

3/1x-7
C 3439
A-177

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



3205/2-73

P15 - 7121

М.Абузейд, Г.М.Осетинский, Я.Тыкэ, Б.Фрьшин

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ ${}^2\text{H} ({}^3\text{He}, p) {}^4\text{He}$

1973

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

P15 - 7121

М.Абузейд, Г.М.Осетинский, Я.Тыкэ, Б.Фрыщин

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ ${}^2\text{H} ({}^3\text{He}, p) {}^4\text{He}$

Введение

В связи с некоторым прогрессом в теоретическом рассмотрении процессов, протекающих при взаимодействии малосклонных систем, весьма важно получение более полных и точных данных по угловым распределениям, дифференциальным и полным сечениям этих процессов. В этом смысле интересна реакция ${}^2\text{H}({}^3\text{He}, p){}^4\text{He}$. Ее изучение представляет также дополнительный интерес, связанный с удобством использования ее для контрольных измерений на пучке ускоренных ионов ${}^3\text{He}$. Большое сечение этой реакции, слабая зависимость выхода α -частиц и протонов от углов и энергий, их моноэнергетичность, доступность приобретения дейтерия в качестве газа мишень - все это делает ее весьма полезной для эффективной проверки методики эксперимента и калибровки детекторной аппаратуры.

Известно, что исследованию реакции ${}^2\text{H} + {}^3\text{He}$ /или ${}^3\text{He} + {}^2\text{H}$ / в энергетическом интервале до 5 Мэв посвящено несколько экспериментальных работ /1-8/. Основная их часть выполнена на пучке ускоренных ионов дейтерия в различных и весьма узких интервалах энергий и посвящена в основном определению сечения и некоторых квантовых характеристик уровня ${}^5\text{Li}$. Подробному исследованию этой реакции в широком интервале энергий /0,24 - 3,56 Мэв/ посвящена всего одна работа Джарнелла /8/. В работе определены квантовые характеристики уровня ${}^5\text{Li}$, дана энергия резонанса, полное сечение в резонансе и измерены /с погрешностью 5%/ угловые распределения при восьми значениях энергии в интервале углов $15-135^\circ$ в лабораторной системе координат. Пересчет этих угловых распределений для интересующей нас реакции ${}^2\text{H}({}^3\text{He}, p){}^4\text{He}$ дает информацию для интервала углов $40-165^\circ$ в системе центра масс, что для ряда применений явно недостаточно.

Учитывая это, мы провели исследование реакции ${}^2\text{H}({}^3\text{He}, p){}^4\text{He}$ в интервале энергий 1,4 - 4,4 Мэв с целью получения более подробных данных по дифференциальным сечениям и угловым распределениям в интервале углов 0-165° в лабораторной системе координат. Получение их позволило провести расчет коэффициентов разложения угловых распределений по полиномам Лежандра и рассчитать полные сечения реакции.

2. Методика эксперимента

Работа выполнена на электростатическом генераторе ЭГ-5 Объединенного института ядерных исследований. Схема опыта представлена на рис. 1. Ионы ${}^3\text{He}$, ускоренные на ЭГ и проанализированные по импульсам магнитным анализатором ЭГ, отклоняются раздаточным магнитом СП-10 на угол 45° и, пройдя участок анода и коллиматор / $l_R = 100$ мм, диаметр выходной диафрагмы 1,8 мм/, попадают на газовую мишень, установленную в центре камеры мишени. В работе использовались газовые мишени двух типов: "длинная" - для абсолютных измерений дифференциальных сечений и "точечная" - для измерений угловых распределений. Длинная мишень состоит из корпуса длиной 35 мм со съемными передней и тыльными стенками. В передней стенке имеется отверстие диаметром 4 мм, в тыльной - 6 мм. Обе стенки заклеиваются слюдяной фольгой толщиной 0,12 - 0,15 мг/см². Такая конструкция обеспечивает выпуск пучка частиц из мишени, что значительно уменьшает нагревание газа, находящегося в ней. Для вывода продуктов реакции из мишени в корпусе мишени под углами 45, 90, 135° имеются щели шириной 2±0,1 мм, высотой 6 мм. Щель заклеивается органической пленкой, покрытой непрозрачным слоем алюминия. Толщина пленки 1 мг/см². Мишень изолировалась от корпуса камеры и присоединялась к цилиндру Фарадея. Перед входным окошком мишени установлена изолированная диафрагма, которая /при подаче на нее потенциала - 600в/ обеспечивает задержку вторичных электронов, выбиваемых пучком.

Точечная мишень представляет собой цилиндр диаметром 5 мм. На расстоянии 5 мм от запаянного конца на поверхности цилиндра с охватом 300° имеется шель шириной 5 мм, заклеиваемая Ni фольгой толщиной 0,7 - 1,0 мг/см². Число атомов в мишени определялось по измерению давления дейтерия в ней. При таком определении учитывалась чистота дейтерия, направляемого в мишень /в нашем случае $98,8 \pm 0,5\%$ /, температура его в мишени и ее изменение при прохождении пучка ионов ^3He . Учитывалось также изменение изотопного состава газа мишени при прохождении этого пучка.

Давление газа /в обычном режиме - 30 мм рт.ст./ измерялось дифференциальным микроманометром с погрешностью 0,2% /микроманометр калибровался по образцовому водяному манометру/. Температура газа и ее изменение определялись с помощью дифференциальной термопары малой теплоемкости, введенной в мишень. Измерение температуры газа мишени вдоль пучка не производилось. Установлена лишь допустимая верхняя граница интенсивности пучка, не вызывающая, в пределах ошибок измерений, изменения выхода реакции по сравнению с выходом при "нулевом" токе. Последний определялся экстраполяцией кривой зависимости выхода реакции от тока пучка, падающего на мишень к нулевому значению.

Указанные условия обеспечивались при бомбардировке мишени пучком с интенсивностью от 0,05 - 0,1 мка.

Влияние изотопного обмена в мишени /дейтерия на водород/, приводящего к уменьшению выхода реакции, было четко установлено путем сравнения выходов при одинаковых энергиях для мишени с дейтерием, проработавшей длительное время, и свежезаполненной. Измерения, проводимые под тремя углами в течение 16 часов непрерывного облучения, показали уменьшение выхода продуктов реакции на 0,4% на каждые 100 мккулон тока ^3He , падающего на мишень. Хотя указанное уменьшение концентрации дейтерия в мишени можно учесть, в целях уменьшения ошибок, связанных с введенным таким рода поправкам, газ мишени заменялся после прохождения 100 - 150 мккул ^3He .

Число атомов ${}^3\text{He}$, падающих на мишень, определялось по измерению тока пучка, падающего на цилиндр Фарадея. Измерение проводилось интегратором тока, линейность которого в диапазоне токов 0,1 - 0,5 мка была не хуже 1%. Для токов 0,05-0,002 мка это значение находилось в интервале 2 - 3%.

При использовании полученных данных вводилась поправка на образование двухзарядных ионов ${}^3\text{He}$ в пучке из-за перезарядки на остаточном газе в ионопроводе на участке от отклоняющего магнита СП-10 до мишени. Вклад компонент $(\text{HH})^+$ и $(\text{HNN})^+$ в пучке из-за малости этих величин не учитывался. Известно¹⁹, что компонента пучка $(\text{HNN})^+$ в нормальных условиях работы высокочастотного ионного источника в несколько раз меньше компоненты $(\text{HH})^+$. Величина же компоненты $(\text{HH})^+$, определенная нами экспериментально, не превышала ~ 0,3%. Столь высокая чистота пучка объясняется, по-видимому, тем, что пучок с массой три, в составе которого находятся эти компоненты, при входе в камеру магнита СП-10 "очищается" за счет развала и последующей ионизации комплексов $(\text{HNN})^+$ и $(\text{HH})^+$ на остаточном газе в ионопроводе. Учет вклада дважды ионизированных ионов ${}^3\text{He}$ в измерение тока, падающего на цилиндр Фарадея, осуществлялся согласно полученной нами формуле:

$$Q = 1 + \sigma_{12} N x - \frac{1}{2} \sigma_{12} N^2 x^2 (\sigma_{12} - \sigma_{21}),$$

где Q - эффективный заряд ионов в пучке ${}^3\text{He}$ в единицах заряда электрона; σ_{12} - сечение образования двухзарядных ионов ${}^3\text{He}$; σ_{21} - сечение процесса перехода ${}^3\text{He}^{++}$ в ${}^3\text{He}^+$; N - число атомов остаточного газа в 1 см^3 ионопровода; x - длина участка ионопровода, на котором учитывается перезарядка.

Величина Q - эффективное рассчитывалась для каждой энергии и вводилась как поправка в формулы расчета дифференциального сечения. Величина Q не превышала 1,01 - 1,015 / например, при $E = 4,4 \text{ Мэв}$, $\sigma_{12} = 2,4 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2/\text{атом}$, $\sigma_{21} = 0,036 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2/\text{атом}$ и при вакууме в ионопроводе $\sim 3 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$ $Q = 1,009/$.

При измерении кривых возбуждения протоны из реакции детектировались тремя кремниевыми поверхностно-барьерными детекторами с дрейфом лития, установленными под углами 45, 90, 135°. Измерение угловых распределений осуществлялось пятью детекторами этого же типа. Один из них /монитор/ устанавливался под углом 45° /рис. 1/. Четыре детектора устанавливались с угловым интервалом 45° на кронштейне, который мог вращаться относительно оси камеры без нарушения вакуума в ней. Вращение фиксировалось через 5° и обеспечивало измерение выхода в интервале углов 0 - 165° в лабораторной системе координат.

Перед детекторами на расстоянии 49,5 мм устанавливались диафрагмы с отверстием диаметром 4±0,01мм. Отверстия перекрывались фольгой, обеспечивающей торможение упруго рассеянных $^3\text{He}^+$. Импульсы от детекторов через предусилители и пороговые усилители направлялись на амплитудный анализатор типа АИ-4096, где через специальную кодирующую систему поступали в разные группы магнитно-запоминающего устройства /МЗУ/ анализатора /МЗУ анализатора разбивалось на 8 групп по 512 каналов в каждой группе/. Аналогично на одну из групп МЗУ подавались импульсы от интегратора тока. Такой метод одновременной записи импульсов от детектора и интегратора тока исключает необходимость введения поправок на мертвое время анализатора при проведении как относительных, так и абсолютных измерений.

Блок-схема измерений представлена на рис. 1. Данные по дифференциальным сечениям и угловым распределениям были получены на основании расчета площади пика протонов на энергетическом спектре рассматриваемой реакции. Расчет дифференциального сечения проводился по формуле:

$$\sigma = \frac{B \xi k Q}{n \Omega_1 P G 6,25 \cdot 10^{12}} \cdot 10^{-27} \text{ см}^2,$$

где B - число зарегистрированных частиц в выделенном спектре; Q - эффективный заряд пучка ионов $^3\text{He}^+$ еди-

ницах заряда электрона; k - постоянная интегратора, определяющая число отсчетов на микрокулон заряда, измеренного им; n - отсчеты интегратора тока; \mathcal{L}_t - число Лошмидта при температуре t ; p - давление в мм. рт. ст.; G - геометрический фактор.

/Для нашего эксперимента геометрический фактор составлял $1,259 \cdot 10^{-3}$ /. ξ - коэффициент, учитывающий чистоту пучка (ξ_1) и чистоту дейтерия (ξ_2) в газовой мишени. $\xi = \xi_1 \xi_2$ $\xi_1 = 1,003$, $\xi_2 = 1,018$, $\xi = 1,121$.

При измерении угловых распределений выход протонов под углом θ ; в относительных единицах нормировался по данным отсчета детектора монитора. Абсолютные значения дифференциальных сечений получались в результате нормировки данных относительных измерений по абсолютным измерениям под углом 90° в лабораторной системе координат.

Результаты измерений

На рис. 2а /I, II, III/ представлены данные по абсолютным значениям дифференциальных сечений под углами 45 , 90 и 135° в лабораторной системе координат в интервале $1,37$ - $4,33$ Мэв. Представленные на кривой ошибки - статистические.

Средняя квадратичная ошибка измерений дифференциальных сечений составляет $\pm 3\%$. Она получена на основании следующих ошибок эксперимента /см. таблицу I и рис. 2б/:

1/ ошибки выделения пика протонов на энергетическом спектре - 1% ;

2/ ошибки определения давления газа в мишени - $0,4\%$;

3/ ошибки определения чистоты дейтерия в мишени - $0,5\%$;

4/ ошибки определения постоянной интегратора тока - $0,8\%$;

5/ ошибки определения геометрического фактора - $2,5\%$;

6/ ошибки, вносимой в определение числа частиц, падающих на мишень, из-за ошибки в определении чистоты пучка - $0,15\%$.

В таблице I представлены данные угловых распределений, измеренных в интервале углов $2,3 - 165^\circ$ в лабораторной системе координат. Они получены на основании представления экспериментальных данных в виде разложения по полиномам Лежандра:

$$f(\theta) \approx \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{k^2} \sum B_L P_L(\cos \theta),$$

где P_L - полиномы Лежандра; k - волновое число; B_L - коэффициенты разложения.

Выбор количества членов разложения определялся наилучшей подгонкой "теоретической" кривой к экспериментальным точкам, критерием которого являлся минимум

$\frac{\chi^2}{n-m}$, где n - число параметров, m - число

точек. Расчеты проводились на электронно-вычислительной машине БЭСМ-4. Значение минимального угла измерения угловых распределений, соответствующего установке детектора под углом 0° , получено расчетным путем с использованием методики, описанной в /10/.

Согласно измерениям, для углов $2,2-40^\circ$ в системе центра масс, где данные отсутствовали, дифференциальные сечения сохраняют общую тенденцию возрастания при приближении к нулю градусов. При остальных углах, где экспериментальные данные известны /40-135° /8/, угловые распределения в пределах ошибок совпадают. Полные сечения реакций монотонно убывают, принимая значения от /157±19/ до /90±1/ мб при энергиях 2,141 - 3,976 Мэв соответственно.

Средняя квадратичная ошибка измерения угловых распределений составляет 4%. Она определяется:

1. Ошибкой относительного хода кривой угловых распределений, вычисляемой при подгонке экспериментальных данных угловых распределений функцией $f(\theta)$. При вычислении матрицы ошибок в программу расчета вводились а/ ошибка измерения выхода реакции; в/ ошибка измерения выхода реакции при измерении монитором.

2. Ошибкой абсолютных значений кривой возбуждения под углом 90° в лабораторной системе координат.

Ошибка в измерении энергии взаимодействия ускоренных ионов ${}^3\text{He}$ в центре мишени складывается из ошибки в определении энергий частиц, падающих на мишень $/\pm 0,5\%/$, и ошибки в определении толщины входного окошка газовой мишени $/\pm 20$ кэв/, ошибки в определении потери энергии в газе мишени $/\sim 2$ кэв при измерениях на "точечной" мишени и 8 кэв при измерениях на "длинной" мишени/. В интервале энергий 1,368 - 4,414 Мэв ее величина монотонно изменяется от 1,5 до 0,6% соответственно.

В таблице II приведены коэффициенты разложения B_0, B_1, B_2 . Из анализа их энергетической зависимости можно заключить, что взаимодействие ${}^2\text{H} + {}^3\text{He}$ нельзя описать с помощью только одного механизма составного ядра, поскольку для возможности описания через этот механизм необходимо предположить участие минимум трех уровней /двух уровней одинаковой и одного противоположной четности/. Однако трудно себе представить наличие такого набора уровней для ядра ${}^5\text{Li}$ /кстати не наблюдаемых экспериментально/, который мог бы дать столь монотонное поведение коэффициентов B_1 с энергией, как это видно из таблицы. Очевидно, что в указанном процессе имеется существенный вклад механизма прямого взаимодействия. Количественное описание вклада каждого из этих механизмов затруднительно из-за отсутствия надежного аппарата, учитывающего прямой процесс для малонуклонных систем.

Авторы благодарны М.В.Савенковой за помощь в обработке экспериментальных результатов.

Литература

1. T.W.Bonner, Y.P.Conner, A.B.Lilie. *Phys. Rev.*, 88, 473 (1952).
2. A.B.Lilie, T.W.Bonner, Y.P.Conner. *Phys. Rev.*, 86, 630 (1952).
3. G.Freiz, H.Holmgren. *Phys. Rev.*, 93, 825 (1954).
4. W.E.Kunz. *Phys. Rev.*, 97, 456 (1955).
5. А.П.Ключарев. *ДАН СССР*, 109, 737 /1956/.
6. D.L.Boath, R.S.Hill. *Proc. Phys. Soc.*, A70, 863 (1957)
7. Ван Нэм Мин, Б.Г.Новацкий, Г.М.Осепинский, И.А.Чепурченко, Цзей Нам Гун. *ЯФ*, п. III, вып.6 /1966/.

8. Y.L. Yarnell, R.H. Lovberg, W.R. Stratton. *Phys. Rev.*, 90, 292 (1953).
9. А.М. Говоров, Ли Га Ен, Г.М. Осетинский, В.И. Салацкий, И.В. Сизов. *ЖЭТФ*, 41, 703 /1961/.
10. Б. Сикора, И. Тыкэ, Я. Тыкэ. Депонированное издание ОИЯИ, Б12-15-61 /1971/.

*Рукопись поступила в издательский отдел
27 апреля 1973 года.*

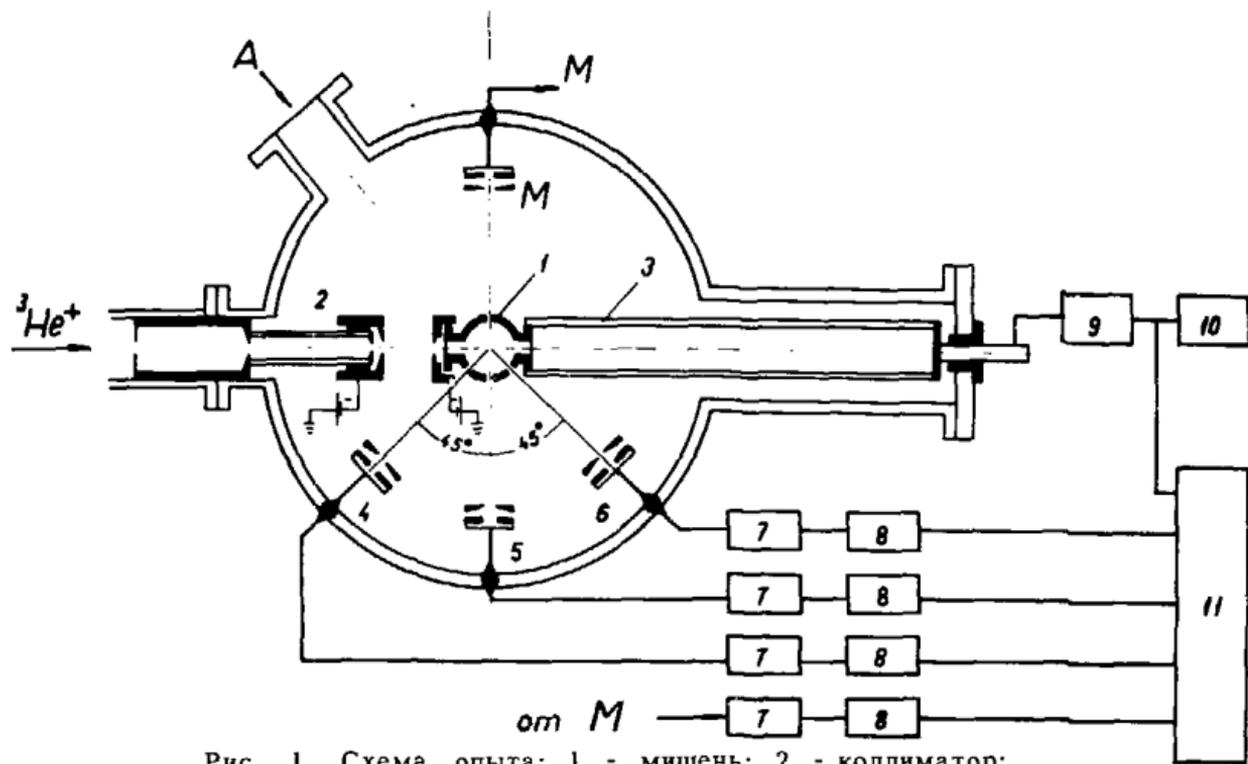


Рис. 1. Схема опыта: 1 - мишень; 2 - коллиматор; 3 - ловушка тока; 4,5,6 - кремниевые детекторы; 7 - предусилители; 8 - усилители; 9 - интегратор тока; 10 - пересчетный прибор; 11 - анализатор АИ-4096.

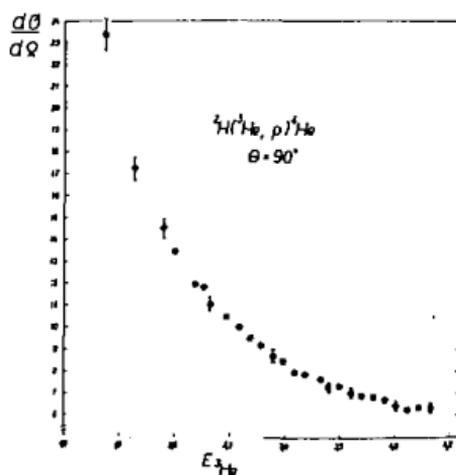
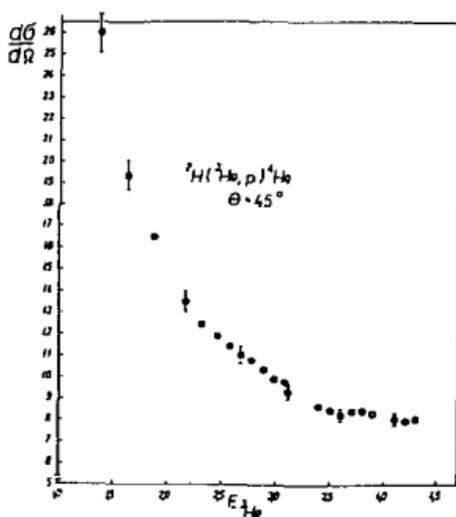


Рис. 2а. Дифференциальные сечения реакции ${}^2H({}^3He, p){}^4He$ в интервале энергий 1,4 - 4,4 Мэв под углами $45^\circ/II/$; $90^\circ/III/$; $135^\circ/III/$. По оси абсцисс - энергия 3He в Мэв. По оси ординат - дифференциальное сечение в мб/стерад.

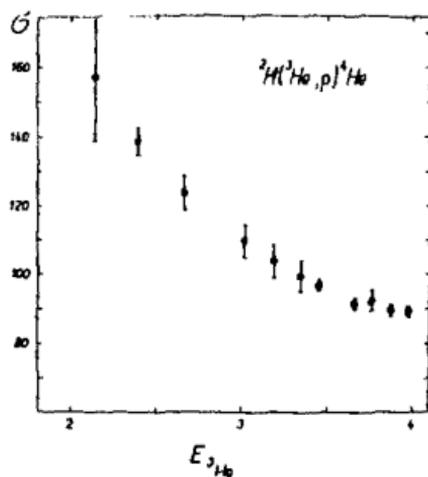
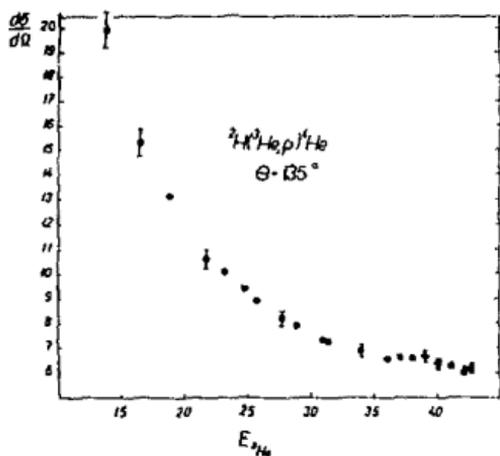


Рис. 26. Полные сечения реакции ν в этом же интервале энергий. По оси абсцисс энергия ${}^3\text{He}$ в Мэв. По оси ординат - полное сечение в миллибарнах.

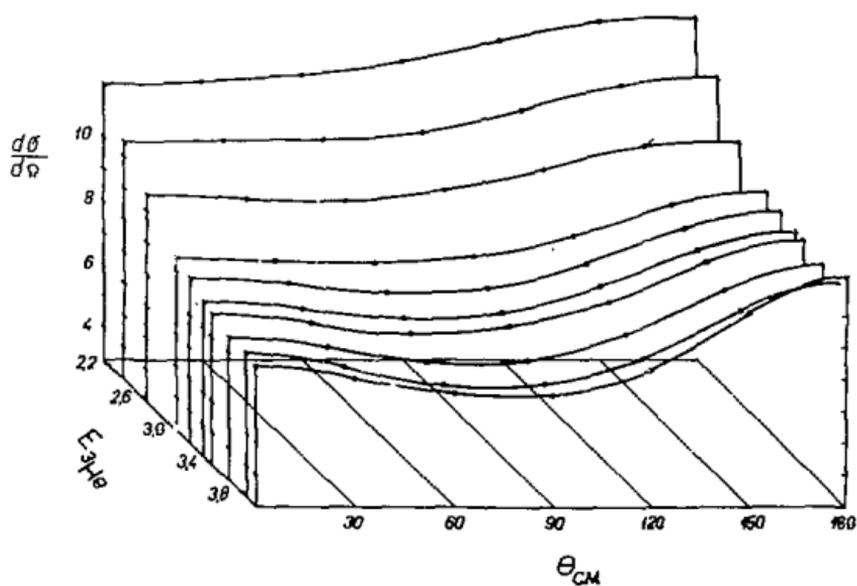


Рис. 3. а/ Угловые распределения протонов реакции ${}^2\text{H}({}^3\text{He}, \text{p}){}^4\text{He}$.

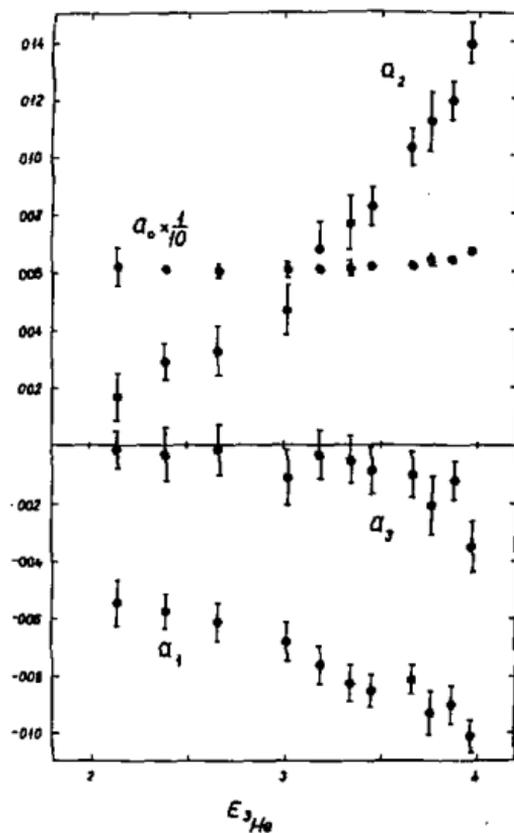


Рис. 3. б/ Энергетическая зависимость коэффициентов разложения функции $f(\theta)$ по полиномам Лежандра.

Таблица 1
 Дифференциальные и полные сечения реакции ${}^2\text{H}({}^3\text{He}, p){}^4\text{He}$

E_{He} (Мэв) σ нс.	2,140	2,394	2,660	3,016	3,186	3,348
2	14,4	13,56	12,29		10,56	10,76
5	15,1	13,42	12,28		10,95	10,35
10				10,98		10,45
15	14,92	13,32	12,31		10,85	
20				10,83		
25	14,6	13,11	11,99		10,54	
30				10,73		9,69
35	14,27	12,82	11,71		10,15	9,56
40				10,18		9,41
45	14,1	12,82	11,11		9,45	9,00
50	14,1	12,25	10,92	9,71	9,15	8,70
55						8,40
60	13,9	11,79	10,61		8,65	
65				9,32		8,13
70	13,0	11,52			8,46	
75						7,83
80	12,45	11,12	9,99		8,15	
85				8,52		
90	12,3	10,9	9,60	8,40	7,70	7,30
95	11,9	10,64	9,46		7,88	7,58
100						7,46
105	12,51	10,43	10,49		7,91	
115	11,9	10,3	8,91		7,41	
120	11,55			7,71		
125	11,15	9,87			7,55	7,19
130	11,36		8,75	7,59	7,30	7,1
135	10,76	9,9	8,75		7,54	
140		9,73	8,51	7,45	7,16	7,57
145						
150	10,69	9,38			7,31	7,09
155				7,12		7,22
160	10,63	9,64	8,44		7,63	
165	10,86	9,41			7,20	7,14
σ полн. (мб)	157 \pm 19	139 \pm 4	124 \pm 5	-110 \pm 5	104 \pm 5	100 \pm 4

Таблица 1 /продолжение/
 Дифференциальные и полные сечения реакции ${}^2\text{H}^2\text{He}, \text{H}^4\text{He}$

E_{He} (Мэв) в ясе.	3,454	3,664	3,770	3,870	3,976
2	10,26	10,21	9,97	10,14	10,04
5	10,39	10,06		10,27	10,17
10			9,92		
15	10,29	9,97		10,04	10,07
20			9,92		
25	9,85	9,65		9,45	9,22
30			9,30		
35	9,34	8,88		9,06	8,83
40			8,87		
45	8,78	8,33	8,72	8,24	8,52
50	8,48	8,40	8,06	8,07	8,22
55			7,64		
60	8,23	7,79		7,47	7,6
65			7,50		
70	7,82	7,29			6,76
75			7,32		
80	7,52	6,90		6,80	6,59
85					
90	7,40	6,70	6,80	6,70	6,70
95	7,29	6,80		6,79	6,59
100			6,59	6,40	
105		6,86		6,66	6,56
115	7,03	6,65		6,37	6,27
120	7,01	6,72	6,62	6,52	6,26
125	6,92	6,47		6,27	6,33
130	6,92	6,47	6,69	6,50	
135	6,92	6,40		6,36	6,48
140	6,93	6,57	6,77	6,44	6,49
145		8,70			
150	6,99	6,56		6,43	6,54
155					
160	7,02	6,67		6,82	7,00
165	7,10		6,92	6,96	7,20
$\sigma_{\text{полн.}} (\text{мб.})$	$97 \pm 1,6$	$92 \pm 1,1$	93 ± 3	$90 \pm 1,3$	90 ± 1

Таблица II
 Коэффициенты разложения по полиномам Лежандра угловых
 распределений протонов из реакции ${}^3\text{He}(p, p'){}^3\text{He}$

$F_{J M_0}$	B_0	$\pm \Delta B_0$	$-B_1$	$\pm \Delta B_1$	B_2	$\pm \Delta B_2$	$-B_3$	$\pm \Delta B_3$
2141	0,0620	0,0074	0,0055	0,00082	0,0017	0,00082	0,00019	0,0008
2394	0,0610	0,002	0,0058	0,0003	0,0029	0,0107	0,0003	0,0009
2660	0,0605	0,0025	0,0061	0,0006	0,0033	0,0009	0,00015	0,0009
3016	0,0609	0,003	0,0068	0,0007	0,0047	0,00086	0,0011	0,001
3186	0,0609	0,003	0,0076	0,0006	0,0068	0,0009	0,00034	0,0008
3269	0,0618	0,001	0,0071	0,0007	0,0051	0,0008	0,00016	0,0009
3348	0,0614	0,003	0,0082	0,0006	0,0076	0,0009	0,00049	0,0008
3454	0,0616	0,001	0,0085	0,0006	0,0082	0,0007	0,00089	0,0008
3558	0,0595	0,001	0,0080	0,0005	0,0065	0,0007	0,00061	0,0008
3664	0,0618	0,001	0,0081	0,0006	0,0103	0,0007	0,0010	0,0008
3768	0,0642	0,002	0,0093	0,0007	0,011	0,001	0,0021	0,001
3871	0,0641	0,0009	0,0090	0,0006	0,0119	0,0007	0,0012	0,0008
3976	0,070	0,0007	0,010	0,0005	0,140	0,0007	0,0035	0,0009