

С 343Δ

B-17

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

ЯФ, 1966, т.3, в.6

С. 1064-1069



P-2323

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

Ван Нэн-мин, Б.Г. Новацкий, Г.М. Осетинский,  
Цзен Най-гун, И.А. Чепурченко

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ  $He^8 + He^3$

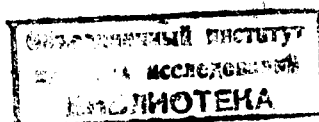
1965

P-2323

Ван Нэя-мин, Б.Г. Новацкий, Г.М. Осетинский,  
Цзен Най-гун, И.А. Чепурченко

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ  $He^A + He^B$

Направлено в журнал "Ядерная физика"



Исследованию реакции  $\text{He}^3 + \text{He}^3 \rightarrow \text{He}^4 + p + p + 12,82 \text{ Мэв}$  I

$\text{Li}^5 + p + Q$  II

$\text{He}^4 + p + \epsilon (\text{Li}^5)$

посвящены три экспериментальные работы<sup>/1,2,3/</sup>. В первых двух работах<sup>/1,2/</sup>, выполненных при энергиях 360 кэв ( Good et al. ) и 240 кэв ( Almqvist et al. ), были измерены энергетические спектры протонов и показано наличие пика, соответствующего образованию  $\text{Li}^5$  в основном состоянии, который накладывается на широкий сплошной спектр от распада на три частицы. В третьей ( Good et al. ) представлены полные сечения реакции в интервале энергий 100–880 кэв. Эти результаты получены умножением дифференциальных сечений, измеренных под углом  $90^\circ$  на  $4\pi$  в предположении о сферической симметрии продуктов реакции. Работа выполнена на твердой мишени, полученной методом напылки. Погрешности измерений не указаны.

Настоящая работа является продолжением исследования этой реакции в более широком интервале энергий с использованием газовой мишени  $\text{He}^3$ . В работе измерены абсолютные значения дифференциальных сечений для угла  $90^\circ$  в интервале энергий 500–1700 кэв и угловые распределения протонов в интервале углов  $0-135^\circ$  при 4-х значениях энергии. Из этих данных получены полные сечения реакции  $\text{He}^3 + \text{He}^3$ . Для проверки методики измерений проведен контрольный опыт по измерению дифференциальных сечений реакции  $D(\text{He}^3, p)\text{He}^4$  в этом же интервале энергий.

### 1. Методика эксперимента

Работа выполнена на электростатическом генераторе Объединенного института ядерных исследований. Газовая мишень  $\text{He}^3$  устанавливалась в центре вакуумной камеры, конструкция которой описана ранее<sup>/4/</sup>. В работе использовались мишени двух типов: "точечная" – для измерения угловых распределений и "длинная" – для измерений абсолютных значений дифференциальных сечений под углом  $90^\circ$ . В качестве

входного окошка газовой мишени использовалась пленка  $Al_2O_3$  (толщиной  $0,04 \text{ мг/см}^2$ ) и слюда (толщиной  $0,066 \text{ мг/см}^2$ ). Потери энергии ионов  $He^3$  в окошках определялись по смещению резонансного пика реакции  $D + He^3 \rightarrow He^4 + p$  и литературным кривым  $\frac{dE}{dx} = f(E)$  для  $Al_2O_3$ <sup>/5/</sup> и слюды<sup>/8/</sup>. Газовая мишень была изолирована от корпуса камеры и служила ловушкой тока. Внутри мишени находилась термонара для измерения температуры газа в ней. Погрешность в измерении температуры составляла  $\pm 1^\circ$ . Мишень наполнялась  $He^3$  стопроцентной концентрации до давления 30–40 мм рт.ст. при работе с входным окошком из слюды. Давление измерялось микроманометром с погрешностью  $\pm 0,2\%$ . Определение потери энергии ионов  $He^3$  в газовой мишени производилось по данным работы<sup>/7/</sup>. По окончании цикла измерений газ мишени возвращался в баллон первоначального хранения. Выход протонов из реакции измерялся поверхностно-барьерными детекторами из кремния р-типа, комплексированного литием. При измерении угловых распределений детектор устанавливался на вращающемся кронштейне на расстоянии 79 мм от центра камеры. Положение детектора относительно пучка могло меняться в пределах  $0-135^\circ$  с фиксацией через каждые  $15^\circ$ . Угловое разрешение вращающегося детектора  $\pm 3,5^\circ$ . Данные угловых распределений нормировались по отсчетам детектора такого же типа, установленного под углом  $45^\circ$ . Импульсы каждого из детекторов через маломощный предусилитель и усилитель направлялись на два 128-канальных амплитудных анализатора. Градуировка по энергии системы детектор-анализатор описана в работе<sup>/8/</sup>.

## 2. Дифференциальные сечения под углом $90^\circ$

Дифференциальные сечения под углом  $90^\circ$  измерялись на длинной мишени. Расчет проводился по формуле:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{B \cdot C \cdot 760}{n \cdot L_t \cdot p \cdot G \cdot 6,25 \cdot 10^{-12}}$$

где  $B$  – выход реакции;  $C_{\text{ит}}$  – постоянная интегратора тока;  $L_t$  – число Лотшмита при температуре  $t$ ;  $n$  – отсчеты интегратора тока;  $p$  – давление в мм рт.ст.;  $G$  – геометрический фактор ( $G = 3,17 \cdot 10^{-3}$ ). При обработке результатов вводилась поправка на изменение температуры газа мишени. Поправка на нагревание газа мишени в объеме, где проходил пучок  $He^3$ , не вводилась. Выход протонов из реакции определялся по измерению площади энергетического спектра протонов каналов 1, II реакции. Типичный спектр протонов показан на рис. 1. Вследствие наложения на низкоэнергетический участок непрерывного спектра фоновых импульсов (реакция  $C^{12} + He^3$  и т.д.), этот участок спектра не мог быть использован в расчете. Поэтому в расчете использовалась половина площади, соответствующая высокоэнерге-

тическому участку спектра протонов. Определение канала анализатора, разделяющего экспериментальный спектр на две равные части  $\frac{E_{\text{max}}}{2}$ , производилось на основании графика градуировки энергетической шкалы детектора (рис. 2). Такой метод обработки результатов предполагает, что измеренный нами энергетический спектр симметричен относительно  $\frac{E_{\text{max}}}{2}$ , что справедливо только в системе центра масс. Так как наши данные получены в л.с.к., то принятый метод обработки результатов связан с определенными ошибками. Мы считаем, что поскольку в расчетах используется высокоэнергетический участок спектра, искажения спектра, равно как и ошибка, невелики (энергия протонов непрерывного спектра реакции находится в пределах 5–10 мэв, в то время как энергия налетающих ионов  $He^3$  в системе центра масс имеет максимальное значение 0,8 мэв). Результаты измерений представлены в таблице 1 и рис. 3. Ошибка измерений дифференциальных сечений составляет 7%, она складывается из ошибок определения выхода протонов реакции – 6%, геометрического фактора – 2%, определения числа атомов мишени – 1%, тока пучка – 0,5%. Ошибка в определении энергии взаимодействия  $He^3$  в центре мишени изменяется от 4 до 2% при изменении энергии от 428 до 1700 кэв, соответственно. В контрольном опыте по определению дифференциальных сечений реакции  $He^3 + D \rightarrow He^4 + p + 18,34 \text{ Мэв}$  мишень наполнялась дейтерием чистой  $98,8 \pm 0,5\%$ . В таблице 1 (рис. 4) приведены данные дифференциальных сечений реакции  $He + D$ , измеренные под углом  $90^\circ$  в лабораторной системе координат в интервале энергий 387–1488 кэв. На рис. 4 дана также кривая, полученная делением на  $4\pi$  значений полного сечения реакции, приведенных в работе Кутца и др.<sup>/9/</sup> (рядом авторов была показана сферическая симметрия угловых распределений в рассматриваемой области энергий<sup>/10,11/</sup>).

Стандартная относительная ошибка измерений составляет  $\pm 3\%$ . Она складывается из ошибки в измерении выхода протонов реакции – 1%, геометрического фактора – 2%, измерения числа атомов газовой мишени – 1,5%, числа падающих частиц – 0,5%. Ошибка в определении энергии взаимодействия изменяется от 3 до 1,5% при предельных энергиях от 428 до 1702 кэв, соответственно. Как видно из рисунка, полученные значения дифференциальных сечений в пределах ошибок хорошо совпадают с данными работы Кутца<sup>/9/</sup>. Следует заметить, что при определении сечений реакции  $He^3 + He^3$  и  $He^3 + D$  чистота пучка ионов  $He^3$  не измерялась. Однако хорошее согласие полученных сечений последней реакции с литературными данными подтверждает, что примеси ионов  $DH^+$ ,  $NNH^+$  в пучке ионов  $He^3$  малы.

Таблица 1

Реакция $He^3 + He^3$			Реакция $He^3 + D$	
$E_{He^3}$ (кэВ)	$\delta E\%$	$\frac{d\sigma}{d\Omega}(90^\circ) \times 10^{-27} \text{ см}^2/\text{стр}$	$E_{He^3}$ (кэВ)	$\frac{d\sigma}{d\Omega}(90^\circ) \times 10^{-27} \text{ см}^2/\text{стр}$
426	4	0,047	387	26,4
493		0,0605		27,1
552		0,0895	429	28,1
671	3,5	0,211	495	36,1
		0,180	532	44,5
795		0,441		51
797		0,385	612	50,5
		0,324		50,2
890		0,403		52,2
		0,423		51,4
994	$\pm 3,0$	0,627		53,1
1143		0,803	673	57,6
		0,780		56,8
1160		0,752	735	59,2
		0,809		59,9
1230		0,795	799	58,5
		0,784		57,9
		0,891	862	48,9
1295	$\pm 2,5$	1,168	933	55,8
1452		1,325	998	49,2
1455		1,236		49,4
		1,113		46,9
1466	$\pm 2$	1,300		46,5
1702		1,476		50,2
				42,3
				42,5
				37,2
				33,4
				33,4
				35,6
				35,8
				35,2
				36,2
				37,3
				36,5
				35,2
				35,2
			1148	26,3
				29,9
			1301	22,3
			1458	18,5

Таблица II

Угловые распределения (Мб/стерад) и полные сечения реакции  $He^3 + He^3$ 

Угол в л.с.к. $\theta$	$E_{He^3}$			
	882 кэВ	1152 кэВ	1250 кэВ	1452 кэВ
0	0,534	0,918	1,268	1,820
	0,594	1,039	1,257	
15	0,516	1,041	1,247	1,836
30	0,529	0,943	1,239	1,733
45	0,500	0,861	1,119	1,580
		0,979	1,158	
	0,501			
60	0,517	0,930	1,155	1,474
75	0,488	0,832	1,005	1,382
90	0,430	0,778	0,934	1,25
105	0,415	0,776	0,938	1,162
120	0,375	0,677	0,804	1,080
135	0,360	0,592	0,784	1,058
полное сечение ( $10^{-27} \text{ см}^2$ )	5,48	9,84	12,04	16,23
	$\pm 0,33$	$\pm 0,59$	$\pm 0,72$	$\pm 0,97$

3. Угловые распределения и полные сечения реакции  $He^3 + He^3$ 

Результаты измерений угловых распределений даны в таблице II и рис. 5. Стандартная относительная ошибка измерения угловых распределений составляет в среднем  $\pm 9\%$ . Она складывается из ошибок:

1. Определения выхода протонов реакции (с учетом статистической ошибки) - 6%.
2. Статистической ошибки измерения монитором - 2%.
3. Ошибки нормировки по значениям дифференциальных сечений под углом  $90^\circ$  - 7%.

Полученные результаты по угловым распределениям указывают на заметный вклад во взаимодействие более высоких моментов. Используя графический метод разделения участков энергетического спектра соответствующего различным каналам

реакции, мы получили угловые распределения каждого канала реакции (рис. 7). Из-за неопределенности, связанной с выделением протонного пика второго канала, ошибка в определении его вклада составляет ~20-30%.

Вычисления показали, что характер угловых распределений для каждого канала реакции различен. Если для трехчастичного канала распределение монотонно спадает от 0 до 135°, то в угловых распределениях протонов реакции  $He^3 + He^3 \rightarrow Li + p$  наблюдается слабый максимум при углах 45-80°. Интересно отметить, что характер этих распределений аналогичен угловым распределениям для трехчастичного и двухчастичного канала реакции  $He^3 + T^{1/8}$ .

В таблице II и на рис. 6 представлены полные сечения реакции, полученные интегрированием угловых распределений. Ряд точек кривой при энергиях до 800 кэВ (425 кэВ, 800 кэВ), для которых угловые распределения не измерялись, получены умножением дифференциальных сечений под углом 90° на  $4\pi$ . Последнее не вносит значительной ошибки, поскольку уже при энергии 882 кэВ угловое распределение мало отличается от изотропного. Ошибка в измерении полных сечений без учета ошибок при измерении энергии в среднем составляет 10%. В таблице III приведены данные по соотношениям между ветвями реакции, измеренными под углом 90° (получены графическим разделением, упомянутым выше).

Т а б л и ц а III

$E_{He^3}$ (кэВ)	796	890	994	1143	1160	1295	1455	1702
$(\frac{\sigma_{II}}{\sigma_a})_{90^\circ}$	13,7	14,1	13,4	16,2	21	19	21,7	26,0

Определение  $\epsilon(Li^5)$

Определение энергии развала  $\epsilon(Li^5)$  производилось на основании измерения положения пика протонов на энергетическом спектре реакции при различных углах и энергиях.

Расчет производился по обычным кинематическим формулам.

Получены следующие значения

$$Q = (10,97 \pm 0,47) \text{ МэВ}$$

$$\epsilon(Li^5) = (1,89 \pm 0,47) \text{ МэВ}$$

$$M_{Li^5} = 5,01246 \pm 0,0006 \text{ (относит. } M_{C_{12}} = 12)$$

Эти результаты в пределах ошибок согласуются с данными ряда экспериментальных работ /12,13/.

Представляло бы интерес сравнение результатов настоящей работы с результатами изучения взаимодействий  $T + T$ ,  $T + He^3$  с целью выделения зарядово-независимых характеристик этих взаимодействий. Однако ввиду наличия трехчастичных каналов реакций обычная форма R-матричной теории не может быть применена. Поэтому до настоящего времени мы такого сравнения провести не смогли.

Авторы приносят глубокую благодарность Ф.Л.Шаширо, В.И.Фурману, Ли Ван Секу за интерес к работе и обсуждения результатов.

Л и т е р а т у р а

1. W.Good, W.E.Kunz and C.D.Moak. Phys. Rev., 83, 845 (1951).
2. E.Almqvist, K.W.Allen et al.. Phys. Rev., 91, 1022 (1953).
3. W.Good, W.E.Kunz and C.D.Moak. Phys. Rev., 94, 97 (1954).
4. Г.М.Осетинский, Цзен Най-гун, И.А.Чепурченко. Препринт ОИЯИ Р-1172, Дубна, 1963.
5. Handbuch der Physik XXXIV, 193 (1958).
6. А.М.Говоров, Ли Га Ен, Г.М.Осетинский, В.И.Салацкий, И.В.Сизов. Препринт ОИЯИ Р-725, Дубна 1961.
7. S.K.Allison, S.D.Warchaw. Rev. Mod. Phys., 25, 779 (1953).
8. Ван Нэй-мин, Б.Г.Новачкий, Г.М.Осетинский, Цзен Най-гун, И.А.Чепурченко. Препринт ОИЯИ Р-2038, Дубна 1965.
9. W.E.Kunz. Phys. Rev., 97, 456 (1955).
10. I.L.Yamell, R.H.Lovberg, W.R.Stratton. Phys. Rev., 90, 292 (1953).
11. I.P.Conner, T.W.Bonner, J.R.Smith. Phys. Rev., 88, 468 (1952).
12. I.M.Blair, N.M.Hintz et al. Phys. Rev., 96, 1023 (1954).
13. R.T.Frost, S.S.Hanna. Phys. Rev., 110, 939 (1958).

Рукопись поступила в издательский отдел  
7 августа 1965 г.

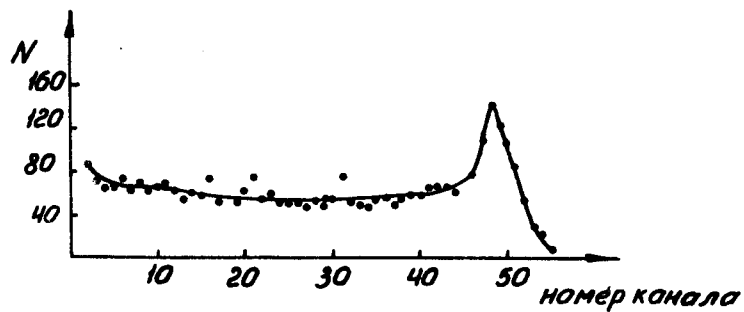


Рис. 1. Типичный спектр протонов из реакции  $\text{He}^3 + \text{He}^3$  под углом  $90^\circ$ .

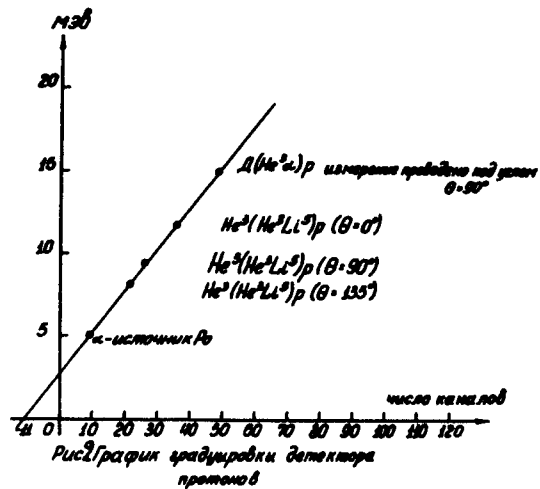


Рис. 2. График градуировки детектора протонов.

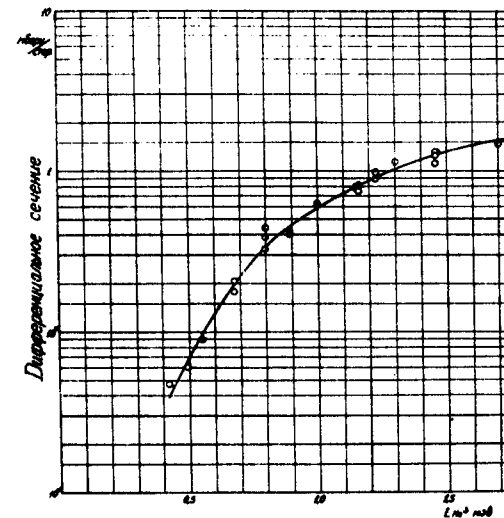


Рис. 3. Дифференциальные сечения реакции  $\text{He}^3 + \text{He}^3$  под углом  $90^\circ$  в лабораторной системе координат.

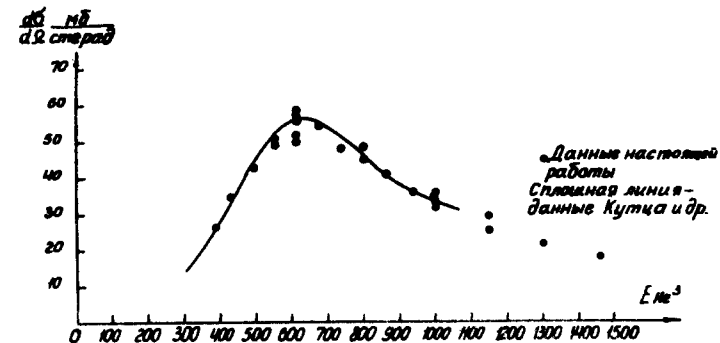


Рис. 4. Дифференциальные сечения реакции  $\text{D}(\text{He}_3, \alpha)\text{p}$  под углом  $90^\circ$ .

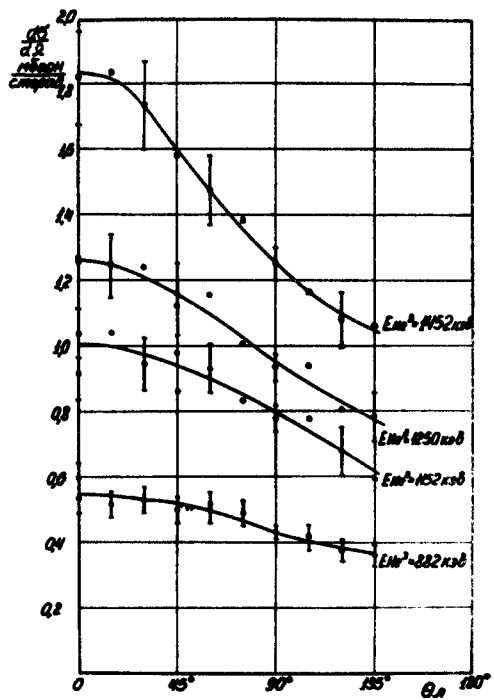


Рис. 5. Угловые распределения реакции  $\text{He}^3 + \text{He}^3$  в лабораторной системе координат.

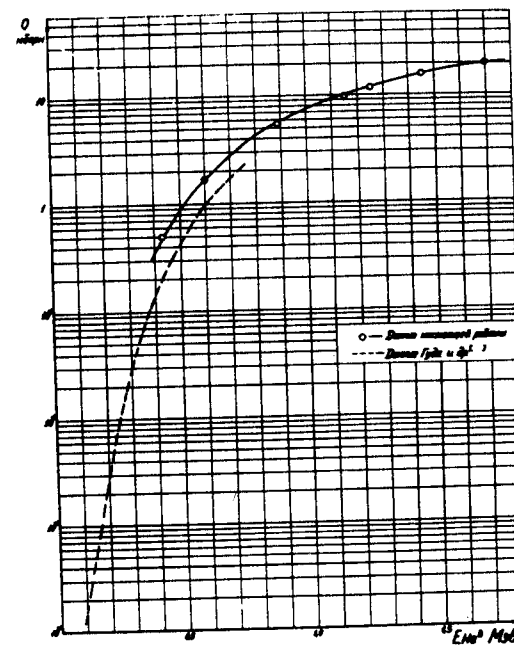


Рис. 6. Полные сечения реакции  $\text{He}^3 + \text{He}^3$ .



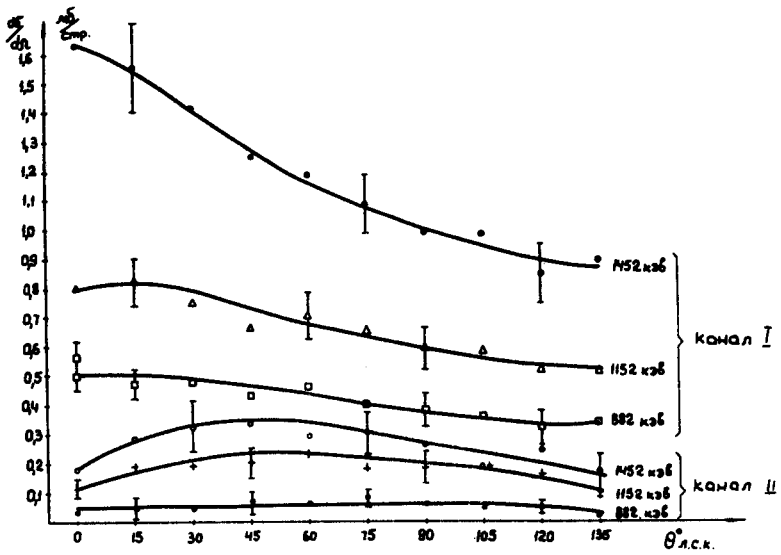


Рис. 7. Угловые распределения протонов каналов I , II реакции.