

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



С 3432  
Д-401

16/12-74

P15 - 8024

К. Джанобилов, Х.Р.Саад, И.В.Сизов

3684/2-74

ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАКЦИИ  $^{10}\text{B}(^3\text{He},\text{p})^{12}\text{C}$

**1974**

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

P15 - 8024

К. Джанобиллов, Х.Р. Саад, И.В. Сизов

ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАКЦИИ  $^{10}\text{B}(^3\text{He}, p)^{12}\text{C}$

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Взаимодействие ускоренных ионов гелия-3 с ядрами  $^{10}\text{B}$  при энергиях в несколько МэВ приводит к возбуждению составного ядра  $^{13}\text{N}$  с энергиями свыше 20 МэВ. При таких энергиях возбуждения должна перекрываться область непрерывного спектра составного ядра. Выявление возможных аномалий в функциях возбуждения, отражающих характер высоковозбужденных состояний, представляет несомненный интерес.

Исследованию реакций  $^{10}\text{B}({}^3\text{He}, \text{p})^{12}\text{C}$  посвящено несколько работ.

Авторами <sup>/1-3/</sup> реакции  $^{10}\text{B}({}^3\text{He}, \text{p})^{12}\text{C}$  применялись для изучения возбужденных состояний конечного ядра  $^{12}\text{C}$ . В исследованиях <sup>/4-6/</sup> проводились измерения  $\gamma$ -лучей, отвечающих переходам с различных состояний ядра  $^{12}\text{C}$ . Измерениям функций возбуждения, угловых распределений и поляризации протонов с целью получения сведений о механизме реакции посвящены работы <sup>/7-10/</sup>. В работе <sup>/7/</sup> проведены измерения функций возбуждения в интервале энергий  $E_{3\text{He}} = 1,8 - 5,0$  МэВ. Обнаружены резонансы при энергиях ускоренных частиц 2; 3,7; 4,1 и 4,6 МэВ. Для пяти значений энергий измерены угловые распределения протонов.

В работе <sup>/8/</sup> аналогичные измерения выполнены в интервале энергий  $1,2 - 12,0$  МэВ. Функции возбуждения получены для угла  $155^\circ$ . Измерены угловые распределения протонов групп  $p_0$  и  $p_1$  при 12 значениях энергии. Изучение механизма реакции  $^{10}\text{B}({}^3\text{He}, \text{p})^{12}\text{C}$  проводилось также путем измерения поляризации протонов <sup>/9/</sup>. Анализ угловых распределений протонов групп  $p_0$  и  $p_1$ , измеренных при  $E_{3\text{He}} = 10, 13$  МэВ, выполнен в работе <sup>/10/</sup>.

Все предшествующие исследования рассматриваемой реакции указывали на сложный характер взаимодействия. Угловые распределения для области углов больше  $90^\circ$  интерпретируются в предположении механизма составного ядра, под передними углами дают вклад прямые процессы.

Область малых энергий /до 4 МэВ/ исследована мало. Имеющиеся данные об угловых распределениях протонов, полученные с энергетическим интервалом 600-1000 кэВ, не позволяют проследить за характером энергетической зависимости угловых распределений протонов.

Настоящая работа посвящена детальному измерению функций возбуждения и угловых распределений двух групп протонов, соответствующих основному и первому возбужденному состояниям конечного ядра  $^{12}\text{C}$ .

### ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты выполнены на электростатическом генераторе ЭГ-5 Лаборатории нейтронной физики. Измерения проводились на тонких /  $50 \text{ мкг/см}^2$  / мишенях из бора естественного изотопного состава. Протоны регистрировались кремний-литиевыми полупроводниковыми детекторами. Для измерений угловых распределений протонов использовалось шесть подвижных детекторов, седьмой, установленный под углом  $90^\circ$  относительно падающего пучка ионов гелия-3, служил в качестве монитора. Спектры продуктов реакций регистрировались 4096-канальным амплитудным анализатором /8 групп по 512 каналов/. Полная схема экспериментального устройства показана на рис. 1. На Рис. 2 приведен спектр частиц, регистрируемых одним из детекторов. Группы протонов  $p_0$  и  $p_1$  из реакции  $^{10}\text{B}(^3\text{He}, p)^{12}\text{C}$  хорошо выделяются из общего спектра.

В измерениях функций возбуждения выход реакции нормировался на отсчеты интегратора тока. В измерениях угловых распределений - на отсчеты детектора-монитора.

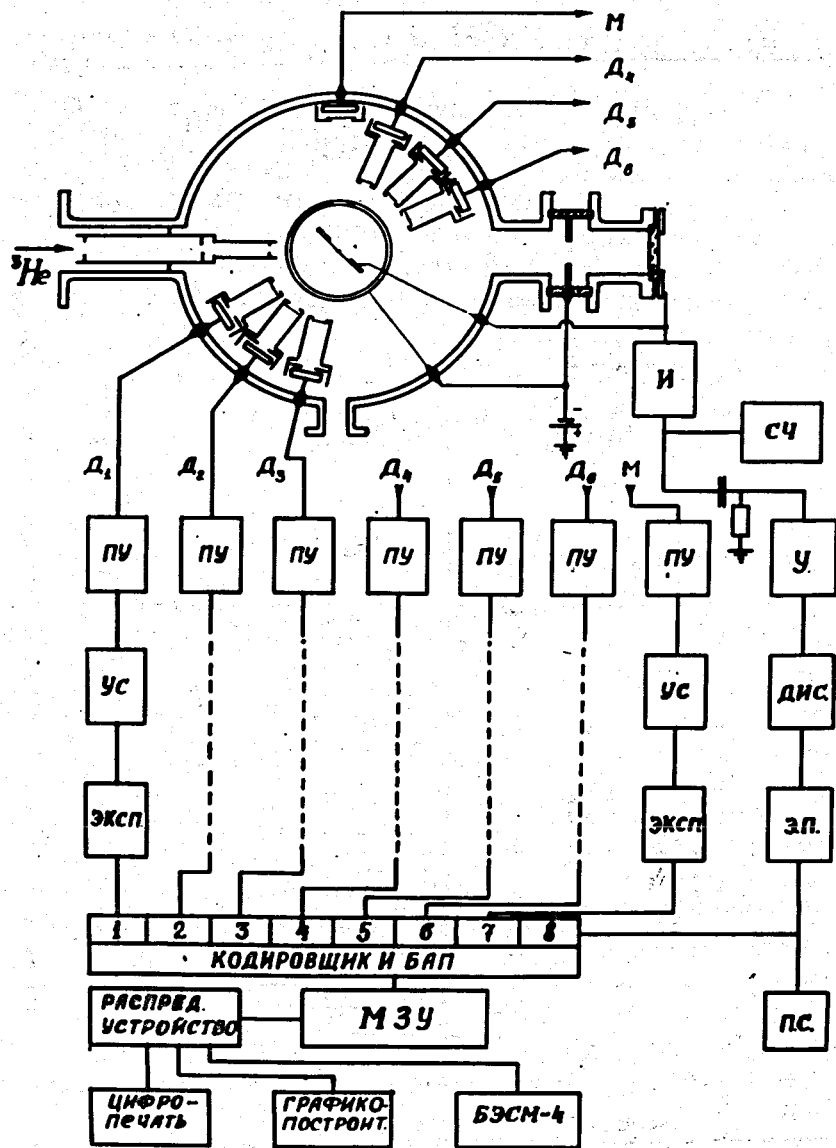


Рис. 1. Схема экспериментального устройства.

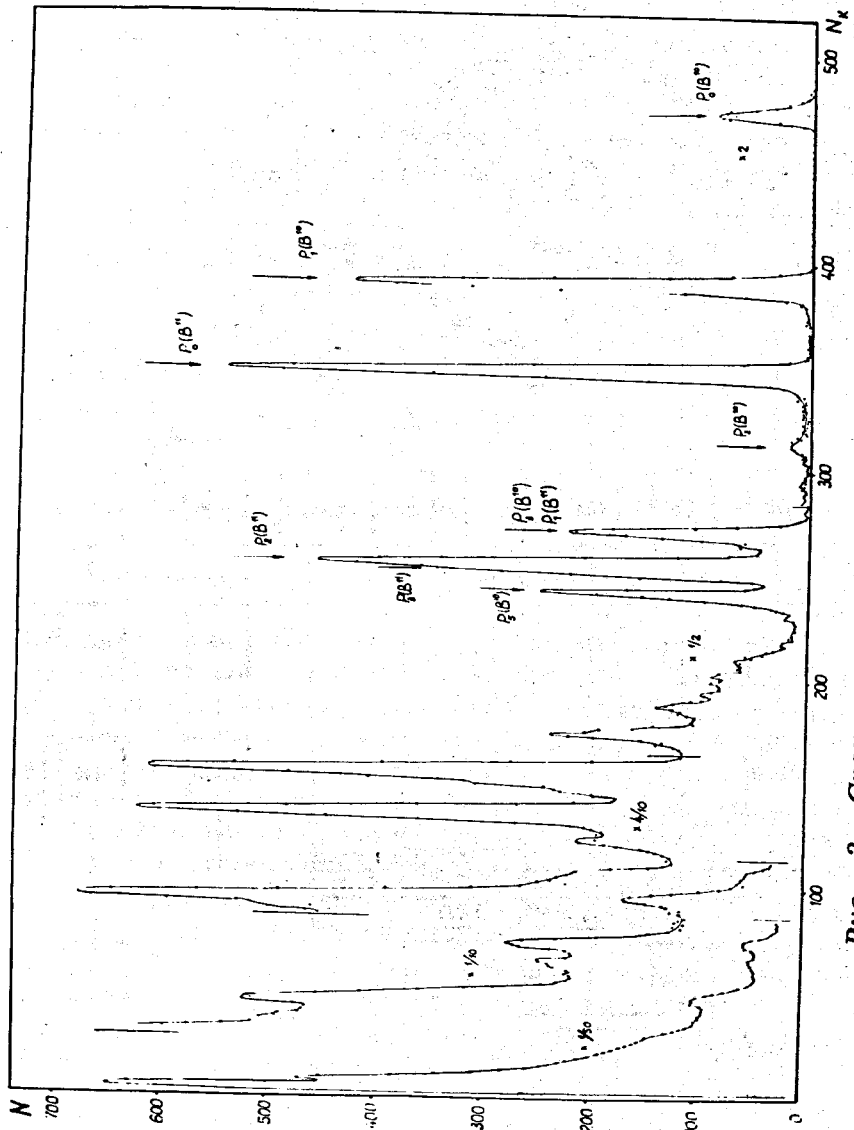


Рис. 2. Спектр частиц из реакции гелия-3 на боре.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Функции возбуждения реакций  $^{10}\text{B}({}^3\text{He}, p_0){}^{12}\text{C}$  и  $^{10}\text{B}({}^3\text{He}, p_1){}^{12}\text{C}^*$  измерялись в интервале энергий  $E_{\text{He}^3}$  от 1,5 до 4,3 МэВ с шагом  $\sim 50$  кэВ для углов вылета протонов 10, 40, 70, 90, 120 и 150° л.с.

Результаты измерений функций возбуждения /в относительных единицах/ представлены на рис. 3. Ошибка измерений отдельной точки на кривых составляет /5-7/ %

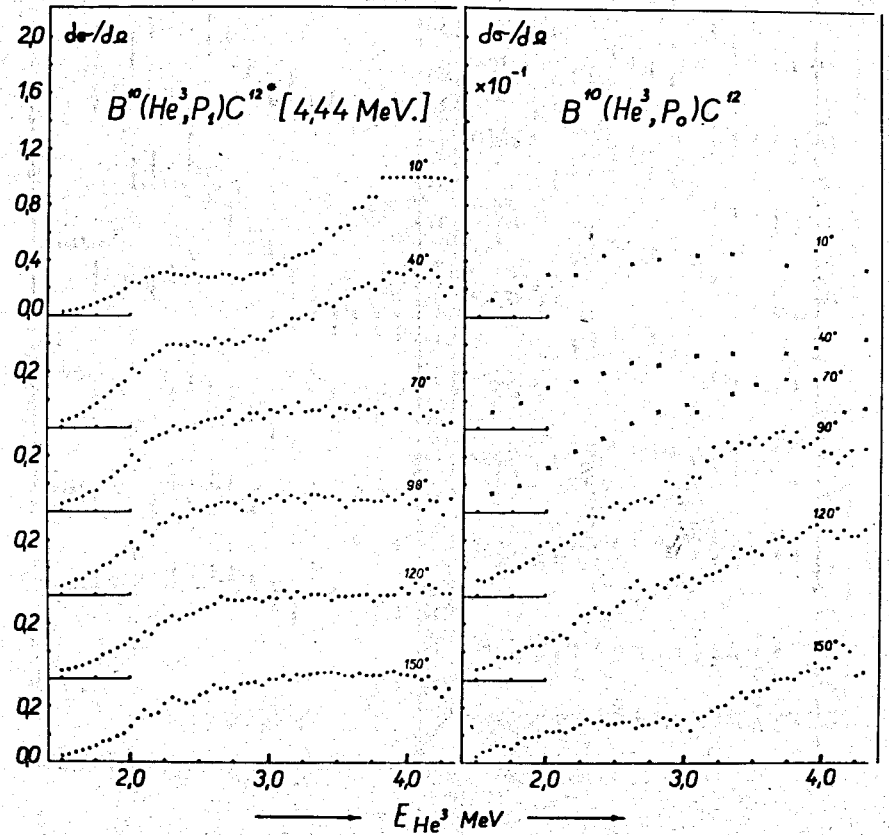


Рис. 3. Функции возбуждения реакций  $^{10}\text{B}({}^3\text{He}, p_0){}^{12}\text{C}$  и  $^{10}\text{B}({}^3\text{He}, p_1){}^{12}\text{C}^*$ . Дифференциальные сечения даны в относительных единицах.

и состоит из статистической ошибки, ошибки измерения тока, ошибки выделения соответствующего пика на спектре и учета фоновой подложки.

На рис. 4 и 5 показаны угловые распределения протонов групп  $p_0$  и  $p_1$ . Отмеченные стрелками ошибки включают те же ошибки, что и в измерениях функций возбуждения,

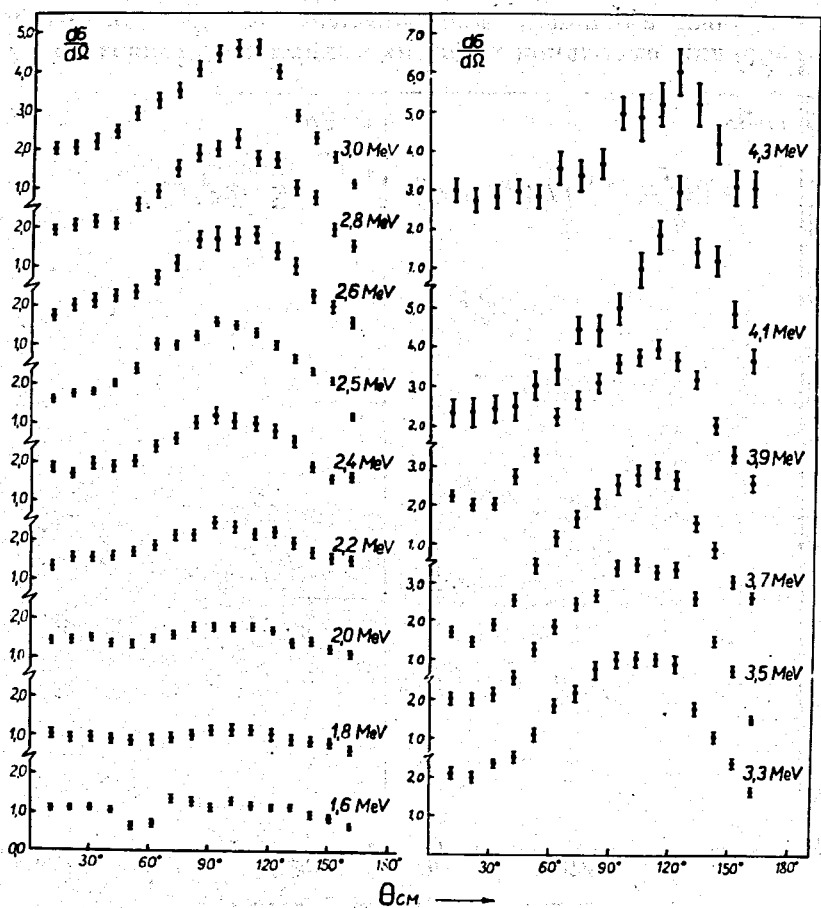


Рис. 4. Угловые распределения протонов из реакции  $^{10}\text{B}(^3\text{He}, p_0)^{12}\text{C}$ . Дифференциальные сечения даны в относительных единицах.

только вместо ошибки измерения тока здесь учитывается ошибка нормировки на детектор-монитор.

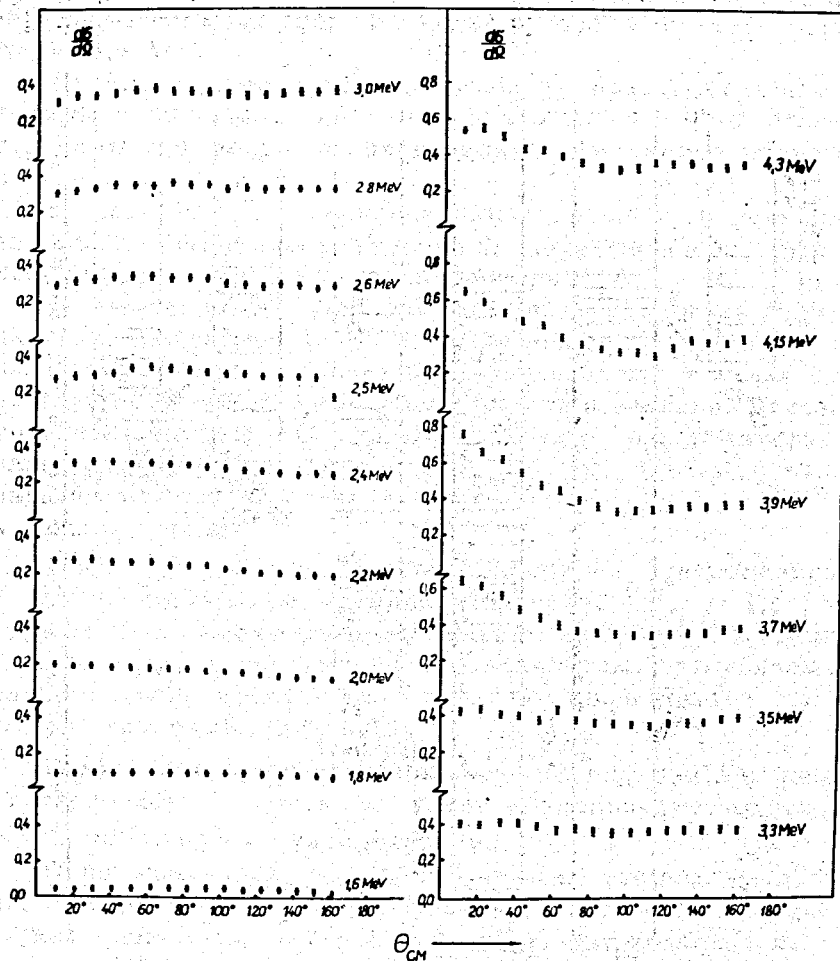


Рис. 5. Угловые распределения протонов из реакции  $^{10}\text{B}(^3\text{He}, p_1)^{12}\text{C}$ . Дифференциальные сечения - в относительных единицах.

В функциях возбуждения можно отметить некоторые аномалии на плавно возрастающих кривых при энергиях  $E_{\text{He}^3} = 2,2; 2,8; 2,7$  и  $3,05$  МэВ. Эти аномалии проявляются не при всех углах измерения, не очень четко выражены и слабо отражаются на характере угловых распределений.

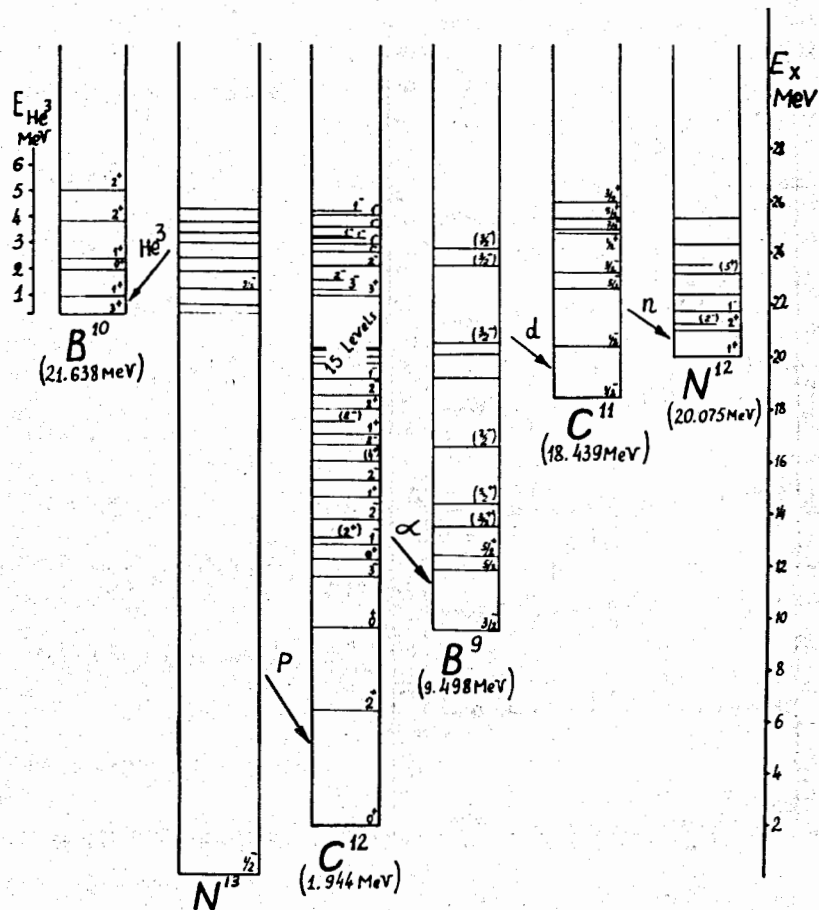


Рис. 6. Уровни ядер  $^{10}\text{B}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^9\text{B}$ ,  $^{11}\text{C}$  и  $^{12}\text{N}$ , используемые в расчетах угловых распределений по статистической теории.

Угловые распределения протонов группы  $P_0$  почти изотропны в с.ц.м. при самых низких энергиях исследованного интервала; затем наблюдается преимущественный выход реакции в области средних углов /в районе  $90^\circ$ /. Максимум в угловом распределении постоянно смещается в область больших углов и находится при угле  $\sim 130^\circ$  для  $E_{\text{He}^3} = 4,4$  МэВ.

Угловые распределения группы  $P_1$  практически изотропны в интервале энергий гелия-3  $1,6 \div 3,3$  МэВ. Выше  $3,3$  МэВ в угловых распределениях намечается подъем под передними углами.

Анализ угловых распределений протонов проводился на основе статистической теории Хаузера-Фешбаха<sup>/11/</sup> и резонансной теории Блатта-Биденхарна<sup>/12/</sup>.

В первом случае для расчетов использовалась стандартная программа LIANA<sup>/13/</sup>. Параметры для различных выходных каналов реакции брались на основе имеющихся данных об уровнях ядер, участвующих в реакции. Схемы уровней конечных ядер, соответствующих различным каналам реакции, приведены на рис. 6. Используемые параметры оптических потенциалов взяты из работ<sup>/14-18/</sup> и даны в таблице.

Рассчитанные угловые распределения сравнивались с усредненными по интервалу энергии  $E_{\text{He}^3} = 1,6 \div 3,3$  МэВ угловыми распределениями протонов для групп  $P_0$  и  $P_1$ . Такое усреднение оправдано тем, что угловые распределения практически сохраняют свою форму в указанном интервале энергий.

Результаты сравнения показаны на рис. 7. На основе статистической теории не удастся воспроизвести даже общих черт угловых распределений.

Основанием применения резонансной теории являлось наличие резонансной структуры в функциях возбуждения. В исследованном интервале энергий наблюдались аномалии в функции возбуждения при энергиях  $2,2; 2,8$  и  $3,8$  МэВ.

Предполагая, что эти аномалии связаны с уровнями составного ядра  $^{13}\text{N}$  с энергиями возбуждения  $23,3; 23,8; 24,5$  МэВ мы сделали попытку воспроизвести

Реакции	$\sqrt{E}$ МэВ	$Z$	$Q$	$W$	$Z'$	$\alpha'$	$\sqrt{S_0}$	Литера- тура
$^{10}\text{B} + ^3\text{He}$	168	1,2	0,78	21	1,4	1,9	5,5	I4
$^{12}\text{C} + p$	45,4	1,07	0,662	3,36	1,431	0,628	6,13	I5
$^{10}\text{B} + \alpha$	212,1	1,373	0,520	4,828	1,699	0,563	0	I6
$^{12}\text{C} + d$	133,6	0,9	0,9	13,78	2,052	0,276	6,00	I7
$^{10}\text{B}(^3\text{He}, n)$	46,5	1,29	0,66	36,5	1,25	0,5	24,0	I8

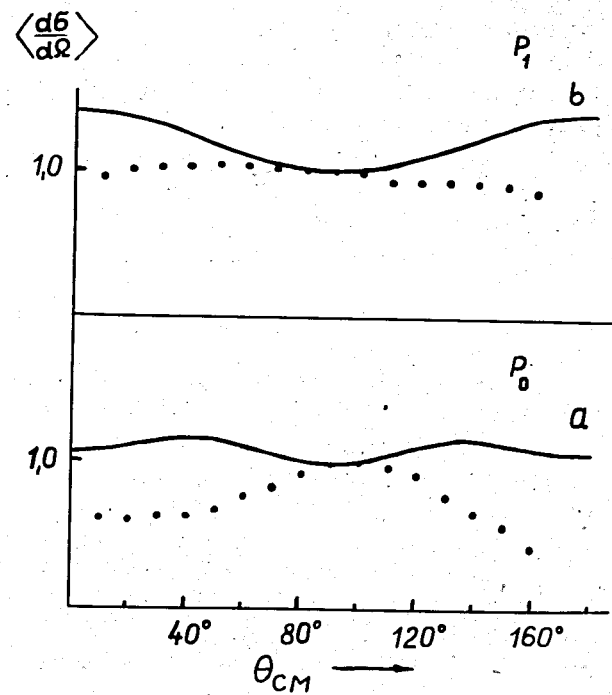


Рис. 7. Подгонка угловых распределений протонов из реакций  $^{10}\text{B}(^3\text{He}, p_0)^{12}\text{C}$  и  $^{10}\text{B}(^3\text{He}, p_1)^{12}\text{C}^*$  по Хаузру-Фешбаху. Точки соответствуют усредненным экспериментальным угловым распределениям. Сплошные линии - результаты расчета.

характер угловых распределений обеих групп протонов  $/P_0$  и  $P_1$  / с определенными значениями спина и четности уровней ядра  $^{13}\text{N}$ .

Общее выражение для дифференциального сечения  $/^{12}/$  имеет вид:

$$\left(\frac{d\sigma_{\alpha\alpha'}}{d\Omega}\right) = \frac{1}{k^2} \sum_{L=0}^{\infty} a_L P_L(\cos\theta) - \sum_Z \bar{Z}(\ell_1 J_1 \ell_2 J_2; sL) \times \\ \times Z(\ell'_1 J_1 \ell'_2 J_2; sL) \times (T_{\alpha's'\ell'}^{J_1}) (T_{\alpha s \ell}^{J_2}) P_L(\cos\theta),$$



где  $aa'$  - индексы канала реакции,  $Z(l_1 j_1 l_2 j_2; sL)$  и  $Z(l'_1 j'_1 l'_2 j'_2; sL)$  -  $Z$  - коэффициенты, выражаемые через коэффициенты Рака,  $P_L(\cos \theta)$  - полиномы Лежандра,  $T_{a'sl}^j$  - матричные элементы перехода.

По этой формуле для резонансных энергий при  $E_{3He} = 2,2; 2,8$  и  $3,7$  МэВ были рассчитаны коэффициенты разложения  $a_L$  при полиномах Лежандра для разных значений спина и четности  $J^\pi$  составного ядра  $^{13}N$  от  $J^\pi = 3/2^\pm$  до  $J^\pi = 9/2^\pm$ .

Расчеты проводились в предположении "изолированного уровня" составного ядра. Хотя такое приближение не может быть строго оправданным, тем не менее оно наиболее часто употребляется на практике. Не учитывался также возможный вклад прямых процессов.

Рассчитанные таким образом коэффициенты разложения сравнивались с экспериментальными значениями, найденными из разложения угловых распределений по полиномам Лежандра методом наименьших квадратов. В результате такого сравнения были определены возможные значения спина и четности составного ядра  $^{13}N$  для резонанса при  $E_{3He} = 2,2$  МэВ  $J^\pi = 3/2^+$  или  $5/2^+$  и для резонанса при  $E_{3He} = 2,8$  МэВ  $J^\pi = 5/2^+$ .

Для резонанса при  $J^\pi = 3,7$  МэВ определение спина и четности оказалось затруднительным. Возможно, что при этой энергии уже значительную роль играют прямые процессы, которыми в расчетах мы пренебрегали.

На рис. 8 показаны результаты сравнения экспериментальных угловых распределений с расчетами по резонансной теории.

Заметный подъем при малых углах в угловых распределениях протонов группы  $p_1$ , намечающийся при  $E_{3He} > 3,5$  МэВ, может быть объяснен на основе механизма двухнуклонного срыва в приближении плоских волн с передаваемым моментом  $L=0$  [19].

Проведенные исследования показывают, что в рассматриваемом интервале энергий  $E_{3He}$  механизм реакции сложный. Удовлетворительное описание угловых распределений при энергиях 2,2 и 2,8 МэВ по резонансной теории может свидетельствовать о преобладании механизма образования составного ядра. Уровням  $^{13}N$  можно приписать определенные значения спина и четности.

14.

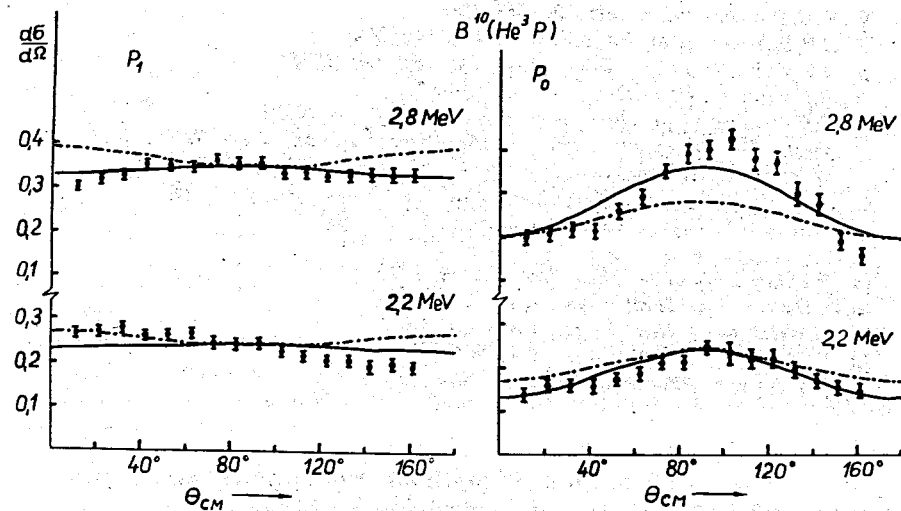


Рис. 8. Подгонка угловых распределений по резонансной теории. Точки соответствуют экспериментальным данным, штрих-пунктир - расчеты для  $J^\pi = 3/2^+$ , сплошная линия - для  $J^\pi = 5/2^+$ .

С возрастанием энергии бомбардирующих частиц заметный вклад могут давать прямые процессы.

В заключение авторы выражают благодарность И.М.Франку за постоянное внимание к работе, В.Г.Тяшину, Н.И.Линькову, А.Д.Вороновой, В.Г.Заецу - за помощь, группе эксплуатации ЭГ-5 - за обеспечение настоящих экспериментов.

#### Литература

1. C.R.Browne et al. Phys.Rev., 125, 992 (1962).
2. E.Almqvist et al. Phys.Rev., 114, 1040 (1959).
3. D.E.Alburger et al. Phys.Rev.C., 5, No. 2, 384 (1972).
4. H.M.Kaun et al. Nucl.Phys., 60, 509 (1964).

15

5. R.A.Bell et al. *Nucl.Phys.*, A179, 408 (1972).
6. F.C.Barker. *Phys.Lett.*, 21, 318 (1966).
7. J.P.Schiffer et al. *Phys.Rev.*, 104, 1064 (1956).
8. J.R.Patterson et al. *Proc. Phys.Soc.*, 88, 641 (1966).
9. D.F.Simons. *Phys.Rev.*, 155, 1132 (1967).
10. F.C.Parker et al. *Bull. Am. Phys. Soc.*, 7, 60 (1962).
11. *Nucl. Spectroscopy Part B* - (Academic Press, New York) 9 (1960).  
W.Hanser, H.Feschbach. *Phys.Rev.*, 87, 366 (1952).
12. J.M.Blatt and L.C.Biedenharn. *Rev.Mod. Phys.*, 24, 258 (1952).
13. W.R.Smith. *Computer Phys. Comm.*, 1, 181 (1969).
14. J.L.Duggan et al. *Nucl.Phys.*, A151, 107 (1970).
15. P.D.Gzeaves et al. *Nucl.Phys.*, A179, 1 (1972).
16. P. David et al. *Nucl.Phys.*, A182, 234 (1972).
17. H.Wilch et al. *Nucl.Phys.*, A160, 609 (1971).
18. W.Bohne et al. *Phys.Rev.*, C2, 2072 (1970).
19. H.C.Newns. *Proc.Phys.Soc.*, 76, 489 (1960).

Рукопись поступила в издательский отдел  
17 июня 1974 года.