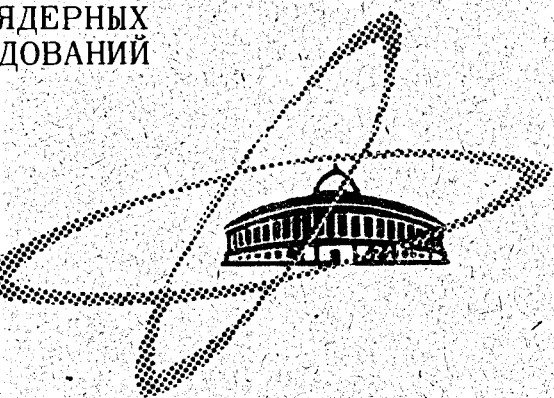


439
644

25/070

ОБЩЕНИЯ
НЕННОГО
СТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ДОВАНИЙ



P15 · 4801

Г. Ширмер, М.И. Кривопустов, Г. Элер, И.В. Сизов

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ
ПРОТОНОВ ИЗ РЕАКЦИИ $^{12}\text{C} (^3\text{He}, p) ^{14}\text{N}$

1969

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

P15 - 4801

Г. Ширмер, М.И. Кривоустов, Г. Элер, И.В. Сизов

ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ
ПРОТОНОВ ИЗ РЕАКЦИИ $^{12}\text{C}({}^3\text{He}, \text{p}) {}^{14}\text{N}$

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

8172/2 49

В в е д е н и е

Исследованию реакций гелия-3 с углеродом посвящено несколько работ/1-6/, тем не менее полученных экспериментальных данных недостаточно для их полного теоретического анализа. Угловые распределения протонов из реакции $^{12}\text{C}(^3\text{He}, p)^{14}\text{N}$ уже при низких энергиях бомбардирующих ионов обладают признаками, характерными как для образования составного ядра, так и для прямых процессов, именно поэтому в настоящее время нельзя сделать однозначного заключения о механизме этой реакции.

В тех случаях, когда экспериментальные результаты интерпретируются на основе резонансной теории в предположении механизма составного ядра, имеющихся сведений об угловых распределениях протонов явно не хватает для проведения такого анализа. Так, угловые распределения p_0 -протонов из реакции $^{12}\text{C}(^3\text{He}, p)^{14}\text{N}$, соответствующих образованию конечного ядра ^{14}N в основном состоянии, в области энергий ионов ^3He от 2,0 до 3,5 Мэв измерены лишь при нескольких значениях энергий/1-3/.

В целях получения наиболее полной информации о механизме взаимодействия ядер гелия-3 с углеродом нами начаты детальные исследования реакции $^{12}\text{C}(^3\text{He}, p)^{14}\text{N}$. Программа этих исследований включает:

1. Подробные измерения функций возбуждения и угловых распределений протонов в широком диапазоне энергий ускоренных ионов.

2. Измерение поляризации протонов, соответствующих образованию конечного ядра ^{14}N в основном и первом возбужденном состояниях. Это позволит получить дополнительные сведения о фазах матричных эле-

ментов S -матрицы, т.е. даст возможность при анализе угловых распределений протонов уменьшить неоднозначность элементов S -матрицы.

В нашем сообщении/7/ содержатся предварительные результаты, полученные при изучении данной реакции. В настоящей работе приводятся экспериментальные данные по функциям возбуждения и угловым распределениям протонов для трех каналов реакции при энергии ускоренных ионов гелия-3 от 2,2 до 3,6 Мэв. Кроме получения сведений о динамике взаимодействия ядер гелия-3 с углеродом эти данные необходимы для обработки результатов поляризационных экспериментов, выполненных нами с помощью поляриметра с кольцевой геометрией/8/.

2. Экспериментальная методика

Исследование реакции $^{12}\text{C} (^3\text{He}, p) ^{14}\text{N}$ выполнено на электростатическом генераторе Лаборатории нейтронной физики. Пучок ионов ^3He , ускоренных на ЭСГ вертикального типа, после поворота магнитным анализатором на 90° и прохождения системы фокусирующих линз выводится в экспериментальный зал, в котором он проходит через отклоняющий магнит, ловушку для улавливания паров масла и других примесей, наполненную жидким азотом, систему коллимирующих диафрагм и попадает на углеродную мишень. Самоподдерживающиеся мишени готовились из реакторного графита путем его испарения в вакууме; их толщина в различных опытах была различной - от 20 до 50 мкг/см^2 . Угловая апертура ионного пучка выведенного в экспериментальный зал, меньше $0,5^\circ$, а диаметр видимого пятна, оставляемого пучком на углеродной мишени, составлял приблизительно 2 мм.

Регистрация протонов осуществлялась одновременно с помощью пяти полупроводниковых кремний-литиевых детекторов, установленных на поворотном диске с угловым интервалом между ними равным 20° . Специальное устройство обеспечивало перемещение и установку всех детекторов под любыми углами в диапазоне от 5° до 165° относительно мишени без нарушения вакуума в камере; шестой неподвижный детектор, установ-

ленный под углом 90° к направлению пучка ускоренных частиц, использовался в качестве монитора. Перед каждым детектором на расстоянии 63 мм от центра углеродной мишени были помещены диафрагмы диаметром 6 мм, ограничивающие угловую апертуру пучка частиц, вылетающих из мишени, в пределах $\pm 3^\circ$.

Для полной остановки ионов ^3He , упруго рассеянных на углероде, и других тяжелых частиц, образующихся в результате реакций с ядрами углеродной мишени и возможных примесей, перед диафрагмами были установлены алюминиевые фольги, толщина которых составляла в различных опытах для разных детекторов 2,8 - 7,9 мг/см². Конструкция держателя мишени обеспечивала достаточно точную фиксацию положения мишени в камере и ее установку под любым углом к направлению бомбардирующих ионов.

Импульсы от каждого из шести детекторов попадают в предварительные усилители, основные усилители и далее через специальную кодирующую схему поступают в разные блоки памяти 4096 (512x8) - канального амплитудного анализатора. Благодаря тому, что импульсы от всех детекторов регистрируются одним анализатором, а их загрузка почти одинакова, поправка на мертвое время анализатора при проведении относительных измерений не вводилась.

На рис. 1 показан типичный спектр протонов из реакции $^{12}\text{C}(^3\text{He}, p)^{14}\text{N}$, измеренный одним из детекторов. Число протонов в каждой из групп, зарегистрированных детекторами в данном измерении, нормировалось на число импульсов в p_0 - пике "мониторного" детектора, полученное в этом же опыте. Впоследствии проводилась еще одна нормировка - на функцию возбуждения, измеренную мониторным детектором под углом 90° . В энергетических интервалах, охватывающих резонансы в функциях возбуждения протонных каналов при энергии ионов ^3He , равной 2,5 и 3,0 Мэв, измерения выполнены с тонкими углеродными мишенями толщиной около 20 кэв.

Применение в данном эксперименте детекторов (конструктивно описанная камера рассчитана на размещение на поворотном диске 16 детекторов) позволяет быстро проводить детальные измерения функций возбуждения (или угловых распределений) - при этом существенно возраста-

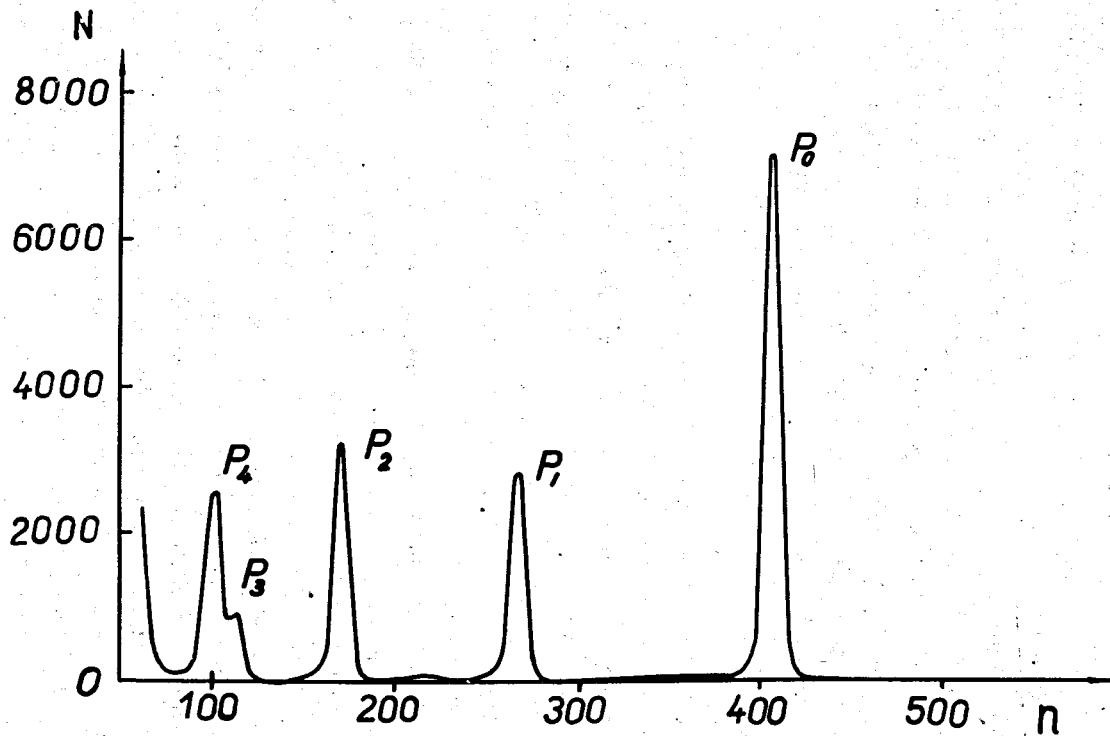


Рис. 1. Спектр протонов из реакции $^{12}\text{C}({}^3\text{He}, p){}^{14}\text{N}$ (n - номер канала амплитудного анализатора, N - число импульсов в канале).

ет эффективность использования ионного пучка и рабочего времени ускорителя. С другой стороны, такая методика эксперимента значительно увеличивает количество физической информации, накапливаемой за одно измерение, поэтому важное значение приобретает вопрос автоматизации обработки результатов измерений. Часть протонных спектров из анализатора передавалась в Вычислительный центр, записывалась там на магнитную ленту и затем обрабатывалась с помощью высокоэффективной автоматической системы: осциллограф со световым карандашом, подключенный к электронной цифровой вычислительной машине/8/.

Сочетание описанной выше методики эксперимента по изучению угловых распределений продуктов ядерных реакций с указанной системой накопления и обработки информации позволяет существенно ускорить выполнение подробных исследований.

3. Результаты измерений

$^{12}\text{C}(^3\text{He}, p)^{14}\text{N}$ (основное состояние; $Q = 4779$). Из измерений функций возбуждения p_0 -группы, выполненных при 26 разных углах (часть результатов этих измерений показана на рис. 2), можно надежно установить существование резонансной структуры. Отдельные резонансы, не являясь строго изолированными, оказывают сильное влияние друг на друга, так что вид функций возбуждения в резонансной области явно несимметричен относительно энергий максимумов в ходе кривой. Функции возбуждения для больших углов при энергии ионов выше 2,6 Мэв содержат широкий пик, который при $\theta > 130^\circ$ обнаруживает структуру: отчетливо видны два пика. Это указывает либо на значительную интерференцию между резонансами, в результате чего положение пика смещается с изменением угла, либо на наличие четвертого уровня в данном диапазоне энергий, который в настоящих измерениях четко не обнаруживается.

На рис. 3 показаны угловые распределения протонов, характер которых монотонно изменяется с ростом энергии бомбардирующих ионов. Асимметрия угловых распределений относительно 90° в системе центра

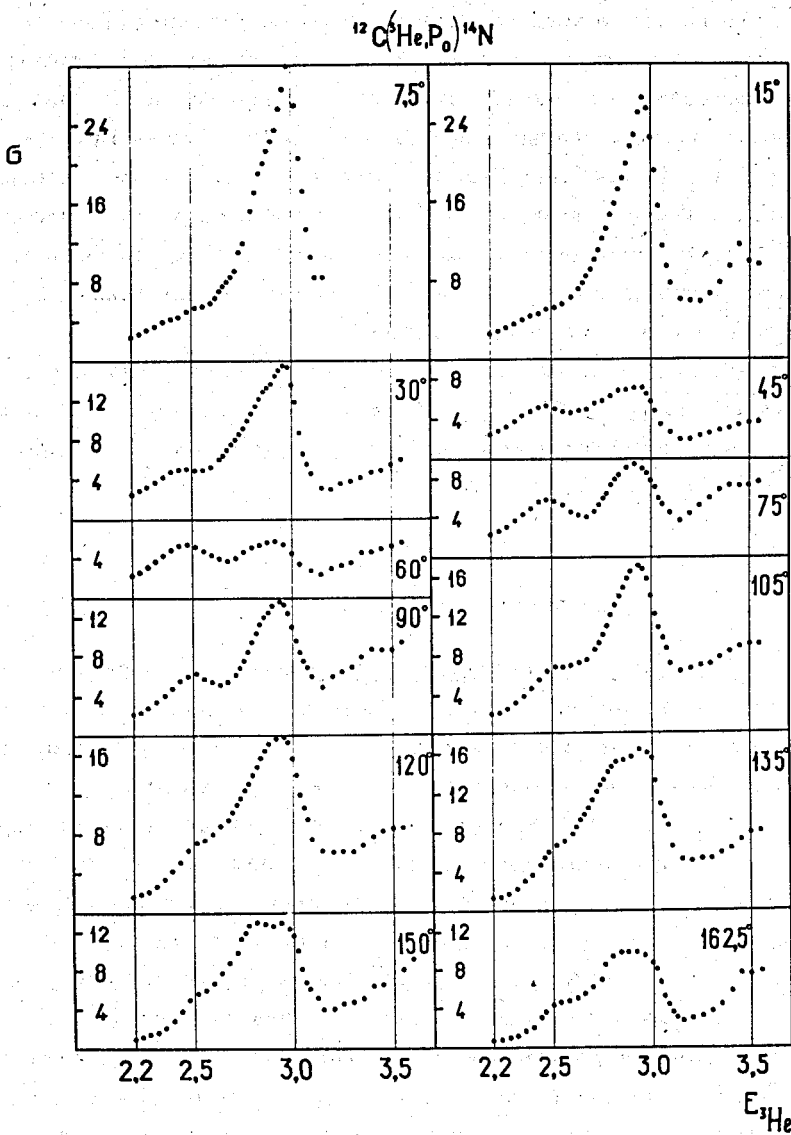


Рис. 2. Функции возбуждения P_0 - канала реакции $^{12}\text{C}(\text{He}, p)^{14}\text{N}$ для разных углов (E_{He} - в МэВ, σ - в относительных единицах, угол - в лабораторной системе).

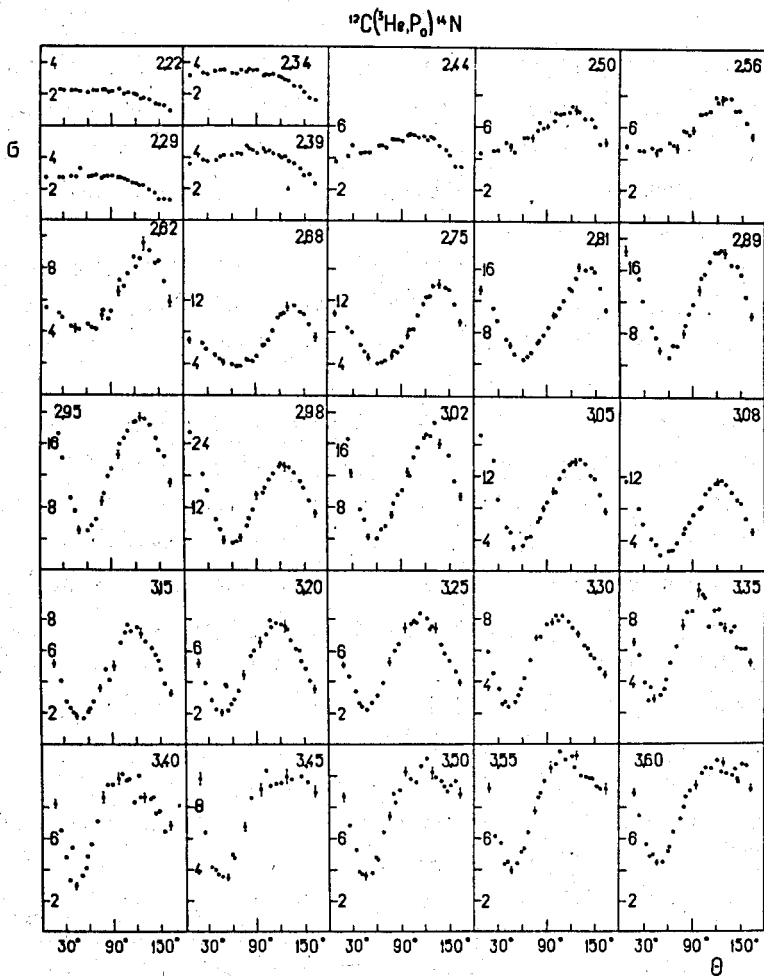


Рис. 3. Угловые распределения протонов (в системе центра масс) из реакции $^{12}\text{C}(^3\text{He},\text{p})^{14}\text{N}$ (σ - в относительных единицах).

масс указывает на значительную интерференцию между резонансами с различной чётностью.

$^{12}\text{C}(^3\text{He}, p)^{14}\text{N}^*$ (состояние 2,31 Мэв; $Q = 2468$ кэв). Функции возбуждения протонного канала p_1 были измерены при 26 углах; часть результатов этих измерений приводится на рис. 4. При энергии ионов $^3\text{He} = 2,5$ Мэв отчётливо проявляется резонансный эффект. Пик, отвечающий этому резонансу, смещается на 50–100 кэв в область меньших по сравнению с положением P_0 - пика энергий. Резонанс при 3 Мэв заметен только для малых углов; в области больших углов полностью отсутствует влияние этого резонанса на ход функции возбуждения данного канала.

На рис. 5 представлена часть измеренных угловых распределений p_1 - протонов. Угловые распределения для этой группы протонов сильнее других протонных групп изменяются с ростом энергии. В области резонанса при 3,0 Мэв угловые распределения почти симметричны.

$^{12}\text{C}(^3\text{He}, p_2)^{14}\text{N}^*$ (состояние 3,95 Мэв; $Q = 834$ кэв). Часть измеренных функций возбуждения протонного канала показана на рис. 6. Для этой группы протонов наблюдается качественное сходство с функцией возбуждения p_0 - канала. Различие состоит лишь в том, что для P_2 - канала при энергии ионов 2,5 Мэв резонанс проявляется более отчётливо. При больших углах и при энергии бомбардирующих ионов выше 2,6 Мэв резонансные пики проявляются слабо; на малый вклад резонансных эффектов указывает и вид угловых распределений, которые приведены на рис. 7. Во всем энергетическом интервале наблюдается устойчивость формы угловых распределений с чётко выраженной тенденцией увеличения выхода реакции под малыми углами с ростом энергии ускоренных частиц.

4. Разложение угловых распределений по полиномам Лежандра

Угловые распределения протонов, преобразованные из лабораторной системы координат в систему центра инерции, представлялись в виде разложения по полиномам Лежандра

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{k^2} \sum_L a_L P_L(\cos \theta) . \quad (1)$$

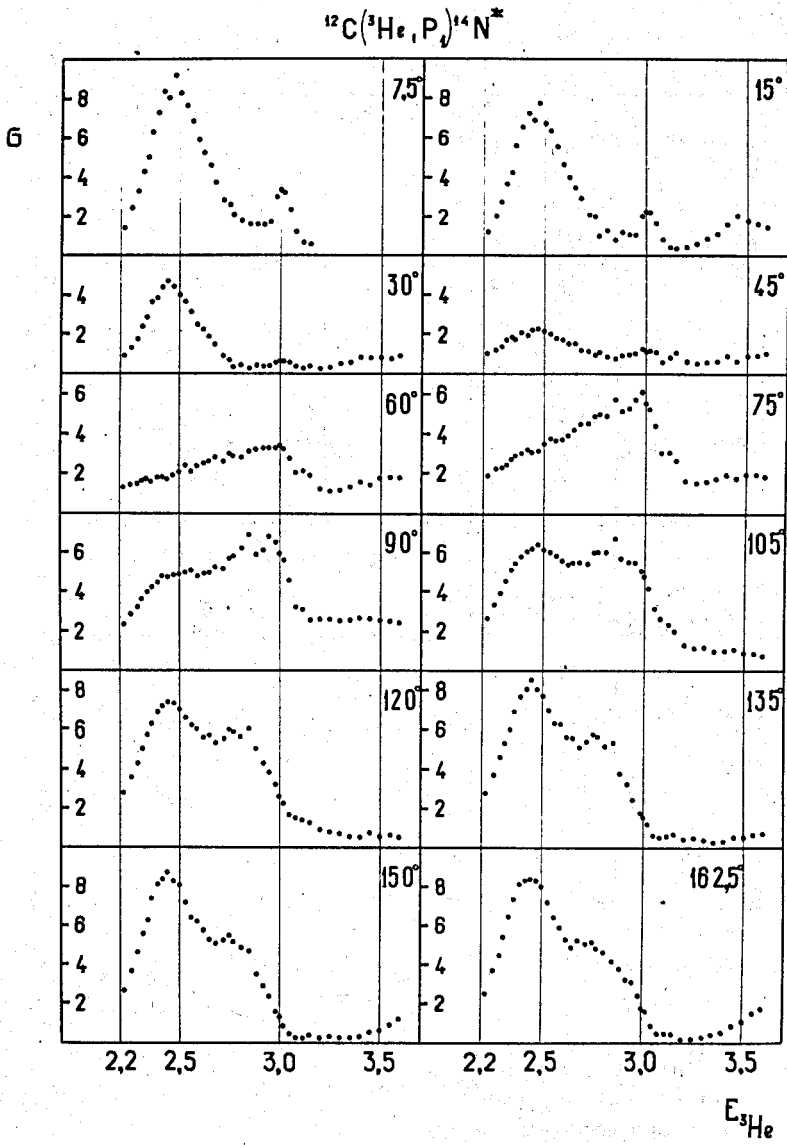


Рис. 4. Функции возбуждения ρ_1 - канала реакции $^{12}\text{C}(^3\text{He}, \text{p})^{14}\text{N}^*$ для разных углов ($E_{^3\text{He}}$ - в Мэв, σ - в относительных единицах, угол - в лабораторной системе).

6

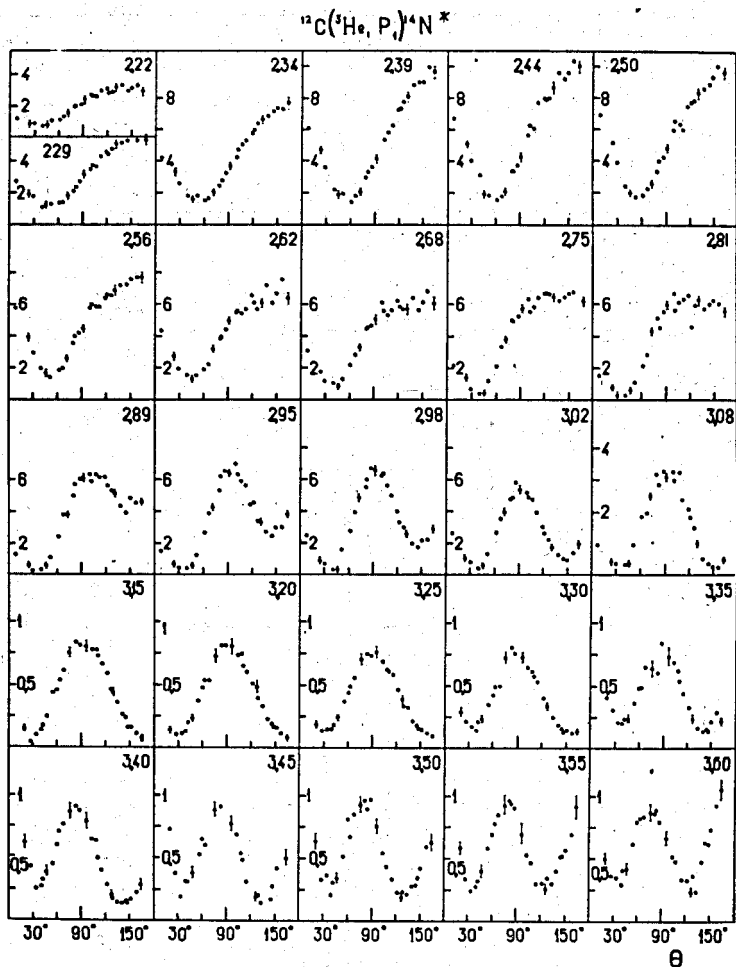


Рис. 5. Угловые распределения протонов (в системе центра масс) из реакции $^{12}\text{C}(^3\text{He}, p_1)^{14}\text{N}^*$ (σ - в относительных единицах).

Коэффициенты разложения a_L определялись методом наименьших квадратов. С целью нахождения минимума характеристической величины критерия $\chi^2 = \sum \left(\frac{\sigma_{\text{эксп}} - \sigma_{\text{расч}}}{\Delta \sigma_{\text{эксп}}} \right)^2$ и приемлемого соотношения между величиной коэффициентов a_L и их ошибками Δa_L для каждого углового распределения выполнялось несколько подгонок с разным числом коэффициентов (т.е. с разным максимальным значением L в разложении по полиномам Лежандра). В уравнении для χ^2 - критерия $\sigma_{\text{эксп}}$ и $\sigma_{\text{расч}}$ - дифференциальные сечения, полученные в эксперименте и рассчитанные по формуле (1), а $\Delta \sigma_{\text{эксп}}$ - экспериментальная ошибка измерения дифференциального сечения.

На рис. 8,9,10 представлены энергетические зависимости коэффициентов разложения по полиномам Лежандра угловых распределений первых трех групп протонов из реакции $^{12}\text{C}(^3\text{He}, p)^{14}\text{N}$.

Подробные экспериментальные данные по угловым распределениям протонов позволили выявить характерные черты в сложной энергетической зависимости коэффициентов разложения по полиномам Лежандра.

Для групп протонов P_0 и P_2 из эксперимента надежно извлекаются коэффициенты разложения до шестого порядка по L ; для группы P_1 коэффициент a_6 во всем исследованном интервале энергий практически равен нулю.

З а к л ю ч е н и е

Проведенные исследования показывают, что в функциях возбуждения и в кривых полных сечений для первых трех каналов реакции $^{12}\text{C}(^3\text{He}, p)^{14}\text{N}$ проявляется заметная резонансная структура, которая свидетельствует о преобладающем механизме образования составного ядра, а наблюдаемые резонансы можно отождествить с уровнями составного ядра ^{15}O .

В настоящее время проводится анализ полученных экспериментальных данных на основе резонансной теории ядерных реакций с целью получения информации о параметрах состояний промежуточного ядра исходя из свойств состояний исходного ядра и конечного ядра-продукта реакции.

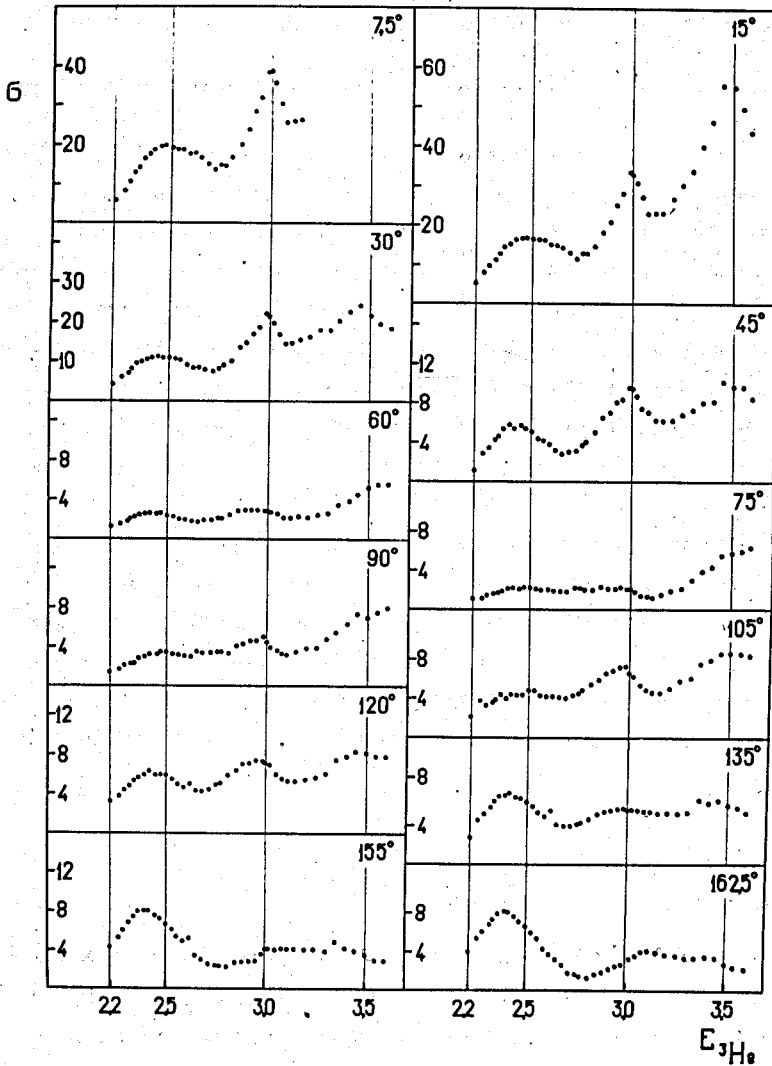
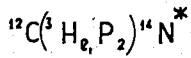


Рис. 6. Функции возбуждения P_2 канала реакции $^{12}\text{C}({}^3\text{He}, \text{p})^{14}\text{N}$ для разных углов ($E_{3\text{He}}$ в МэВ, σ - в относительных единицах, угол - в лабораторной системе).

$^{12}\text{C } ^3\text{He, p}_2 \text{ } ^{14}\text{N}^*$

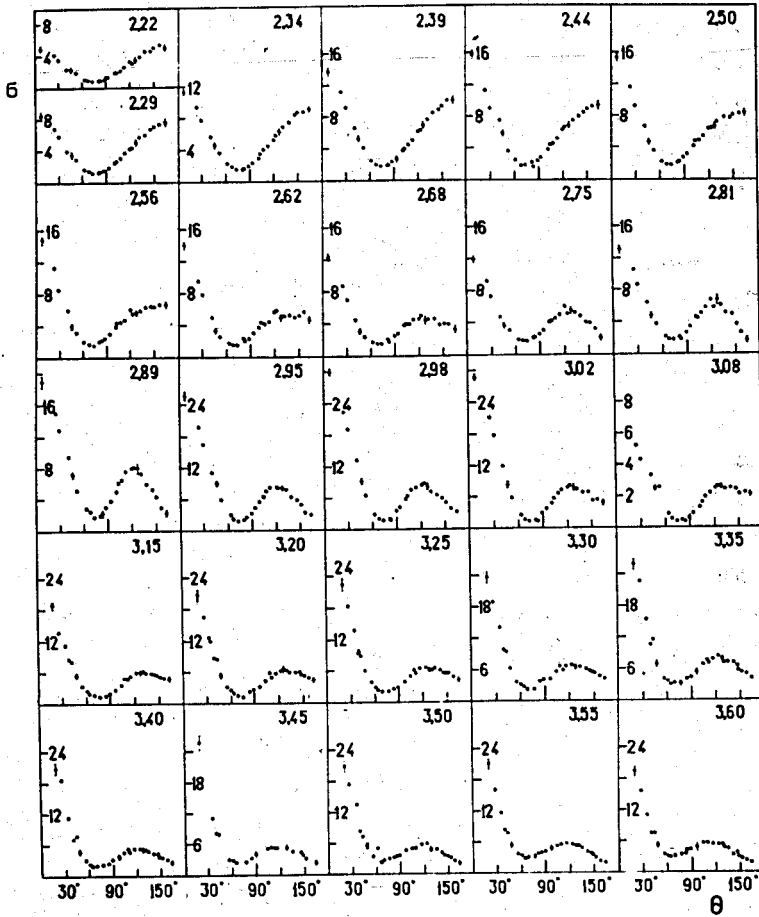


Рис. 7. Угловые распределения протонов (в системе центра масс) из реакции $^{12}\text{C } (^3\text{He, p}_2) ^{14}\text{N}^*$ (σ - в относительных единицах).

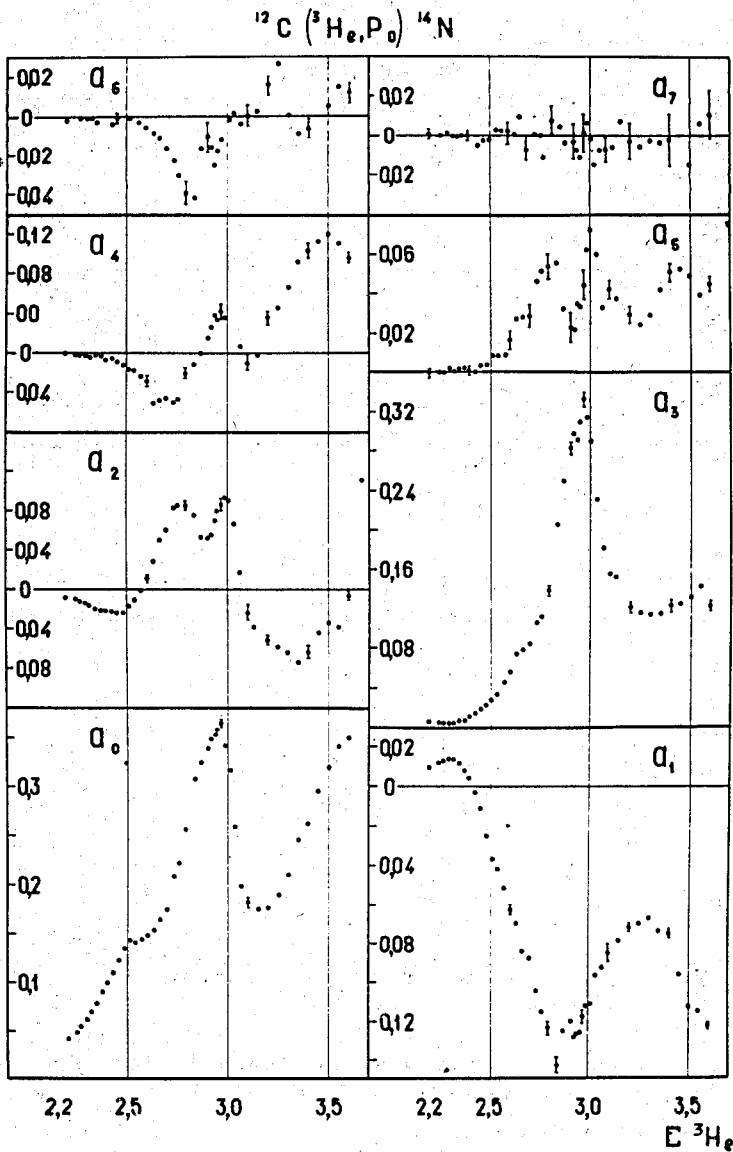


Рис. 8. Энергетическая зависимость коэффициентов разложения по полиномам Лежандра угловых распределений протонов из реакции $^{12}\text{C} (^3\text{He}, p_0) ^{14}\text{N}$.

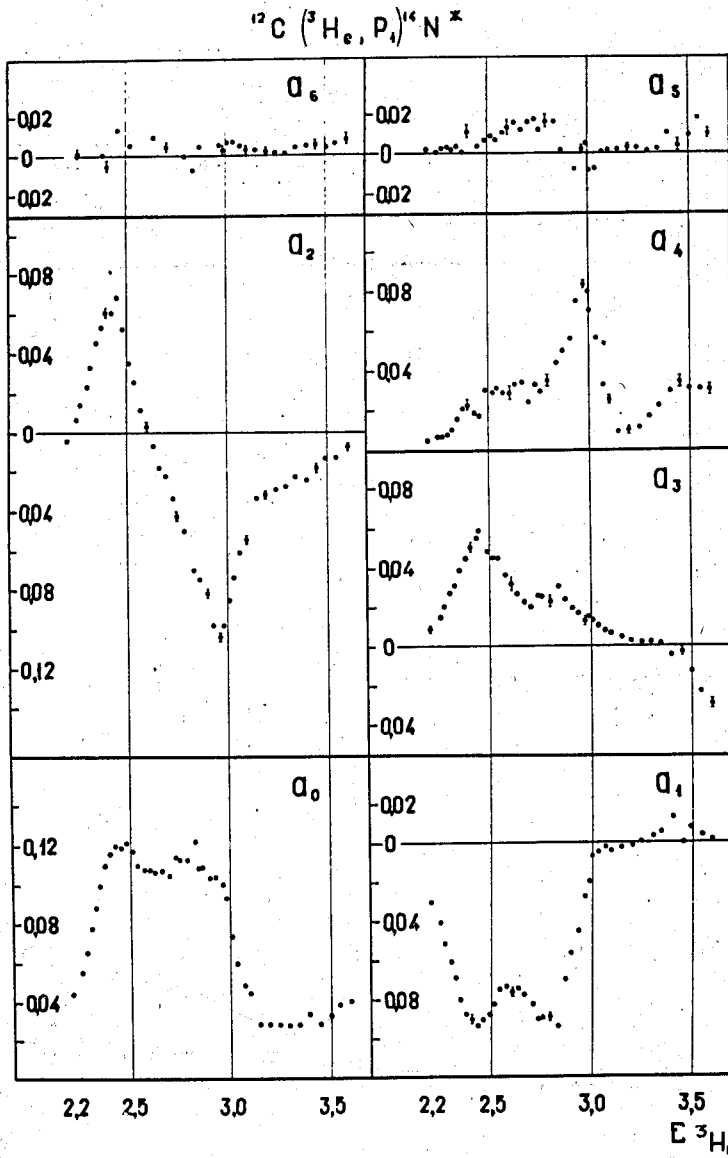


Рис. 9. Энергетическая зависимость коэффициентов разложения по полиномам Лежандра угловых распределений протонов из реакции $^{12}\text{C} (^3\text{He}, p_1) ^{14}\text{N}^*$.

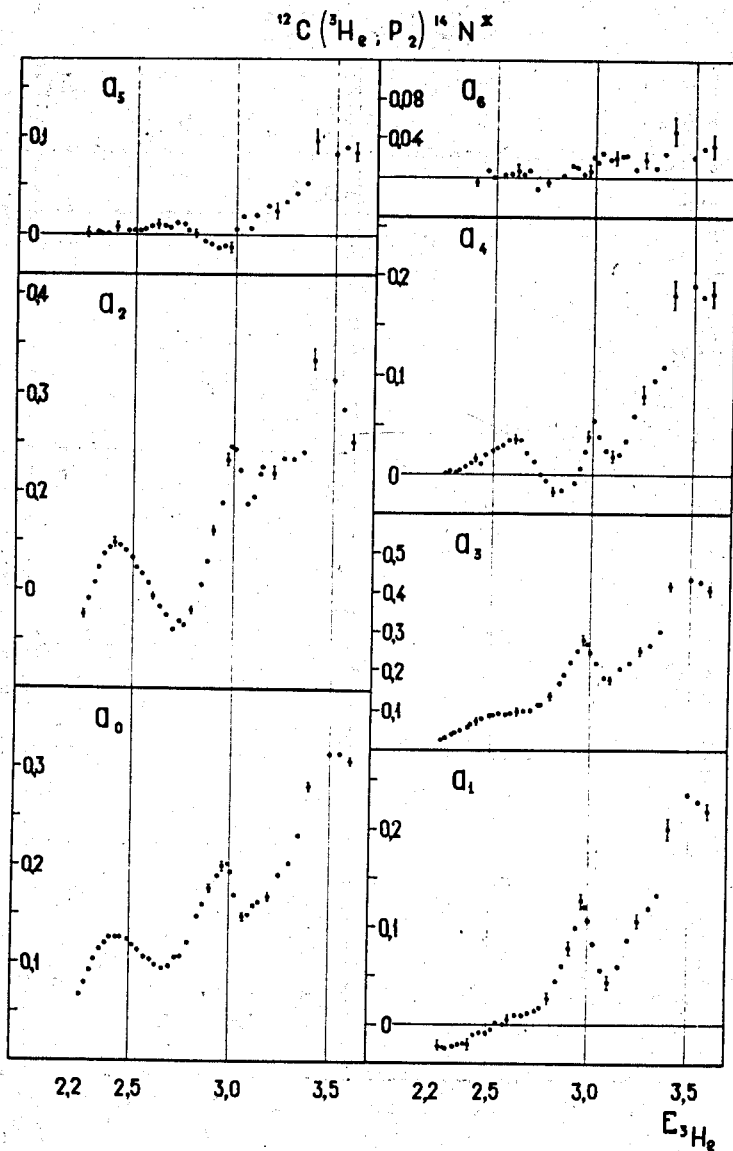


Рис. 10. Энергетическая зависимость коэффициентов разложения по полиномам Лежандра угловых распределений протонов из реакции $^{12}\text{C} (^3\text{He}, p_2) ^{14}\text{N}^*$.

В заключение авторы выражают благодарность Ф.Л.Шапиро за внимание к данной работе, Х.Е.Вибике, Й.Томику, В.Р.Трубникову, В.И.Фурману, и Г.Шульцу за составление программ и консультации по проведению расчётов на электронно-вычислительных машинах. Авторы благодарят Р.Краузе за наладку электронной аппаратуры, И.А.Чепурченко и группу эксплуатации за обеспечение работы ускорителя, Роземари Краузе, Ингрид Цахер и Христу Ширмер за помощь в обработке спектров.

Л и т е р а т у р а

1. D.A. Bromley, K. Almquist, H.E. Cove, A.E. Litherland, E.B. Paul, A.J. Fergusen. *Phys. Rev.*, 105, 957 (1957).
2. R.L. Johnson, H.D. Holmgren, C.A. Woliski, E. Ceer Illsley. *Phys. Rev.*, 109, 884 (1958).
3. Hsin-Min Kuan, T.W. Bonner, J.R. Risser. *Nucl. Phys.*, 51, 481 (1964).
4. C.A. Ludemann. *Diss.* 1965, at the University of Maryland.
5. S. Hinds, R. Middleton. *Proc. Phys. Soc.*, 75, 745 (1960).
6. M.W. Fulbright, W. Palker Alford, O.M. Bilanink, V.K. Deshpande, J.W. Verba. *Nucl. Phys.*, 70, 533 (1965).
7. M.I. Krivopustov, I.V. Sizov, G. Schirmer and H. Oehler. *Proceedings of the Second Conference on Nuclear Reactions with Light Nuclei and Nuclear Structure, October 1967, Rossendorf*, p. 140-142.
8. М.И.Кривопустов, И.В.Сизов, Г.Ширмер, Г.Элер. *Препринт ОИЯИ P15-3504, Дубна 1967.*
M.I. Krivopustov, I.V. Sizov, G. Schirmer, H. Oehler. Proceedings of the Second Conference on Nuclear Reactions with Light Nuclei and Nuclear Structure, October 1967, Rossendorf, p. 137-139.
9. З.В.Лысенко, Й.Томик, В.Р.Трубников. *Препринт ОИЯИ 10-3331, Дубна 1967.* И.Звољски, В.И.Приходько. *Препринт ОИЯИ 6-3517, Дубна 1967.*

Рукопись поступила в издательский отдел

14 ноября 1969 года.