

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



С3432
Г-621

24/11-74

P15 - 8218

С.Л.Голубев, Г.М.Осетинский, Б.Фрыцин

4910/2-74

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $^{14}\text{N}(^3\text{He}, \alpha)^{13}\text{N}$

1974

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

P15 - 8218

С.Л.Голубев, Г.М.Осетинский,Б.Фрьцин

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ $^{14}\text{N}(^3\text{He}, \alpha)^{13}\text{N}$

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы опубликовано несколько экспериментальных работ¹⁻⁷, в которых рассматривается вопрос о том, насколько реакции типа $(^3\text{He}, p)$, $(^3\text{He}, d)$, $(^3\text{He}, \alpha)$ в области малых энергий $< 5 \text{ МэВ}$ могут оказаться полезными для понимания механизма реакции и проверки правильности принятой в расчетах структуры ядер, участвующих в реакции. Предполагая отсутствие интерференционных эффектов между различными механизмами, наблюдаемый механизм реакции рассматриваем как результат некогерентной суммы вкладов двух процессов - механизма составного ядра и прямого взаимодействия. Механизм реакции, идущий с образованием составного ядра, описывается по статистической теории Хаузера-Фешбаха. Прямой процесс взаимодействия - по борновскому приближению с искаженными волнами /БПИВ/. И если применимость теории Хаузера-Фешбаха в области малых энергий при выполнении условий $\frac{D_0}{\Gamma} \leq 2$ / D_0 - расстояние между уровнем со спином нуль, Γ - средняя ширина уровней/ больших сомнений не вызывает, то использование БПИВ в этой же области энергий не является бесспорным и изучено недостаточно подробно. Проведение дальнейших исследований в этом направлении, несомненно, представляет теоретический интерес. Этой задаче в значительной степени посвящено проведенное нами исследование реакции $^{14}\text{N}(^3\text{He}, \alpha)^{13}\text{N}$. В интервале энергий 2-4,1 МэВ измерены угловая и энергетическая зависимости дифференциальных сечений, выделены угловые зависимости, соответствующие прямому механизму реакции, и определены /методом БПИВ/ спектроскопические факторы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерены дифференциальные сечения реакции $^{14}\text{N}(^3\text{He}, \alpha)^{13}\text{N}$ для групп α_0, α_1 под углами $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ в л.с. координат. Измерения проводились в интервале энергий $2 \div 4,1$ МэВ с шагом ≈ 50 кэВ. Результаты измерений представлены на рис. 1. Представленные на рисунках ошибки - статистические. Как видно из рисунков, кривые возбуждения для групп α_0, α_1 имеют плавный характер, "резонансной" структуры на кривых возбуждения не наблюдается. Средняя квадратичная ошибка измерений для группы α_0 составляет не более 5%. Она складывается из статистической ошибки при измерении вы-

Получение при $E < 5$ МэВ подробных данных по дифференциальным и полным сечениям для различных каналов реакции может оказаться полезным для введения поправок при исследованиях различных ядерных реакций, где бывает трудно исключить присутствие примесей азота и где реакции на этом азоте создают ненужный фон.

До настоящей работы исследованию реакции $^{14}\text{N}(^3\text{He}, \alpha)^{13}\text{N}$ посвящена одна единственная работа Кнудсена и др.^{/8/}, выполненная в интервале энергий $2,5 \div 8,5$ МэВ. В работе измерены дифференциальные сечения под углами $50, 90, 165^\circ$ для группы $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_{2,3}$, угловые распределения измерены лишь для энергий $4,5; 5,5; 7,0$ МэВ.

2. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения проводились на пучке ускоренных ионов электростатического генератора ОИЯИ. В работе использовались газовые мишени двух типов: "длинная" для измерений дифференциальных сечений и "точечная" - для измерений угловых распределений^{/9/}. Мишени наполнялись ^{14}N до давления 40-50 Тор. Измерения кривых возбуждения проводились одновременно тремя низкоомными поверхностно-барьерными детекторами, расположенными под углами $45^\circ, 90^\circ$ и 135° в л.с. системе координат. Измерения угловых распределений проводились пятью детекторами. Один из них - монитор, фиксировался под углом 30° . Остальные располагались на кронштейне, который мог вращаться относительно оси камеры, обеспечивая измерения выхода реакции в интервале углов $2^\circ \div 165^\circ$ в л.с. координат.

Схема опыта, блок-схема регистрации импульсов, методика измерений и методика расчетов дифференциальных сечений и угловых распределений аналогичны указанным ранее^{/9/}.

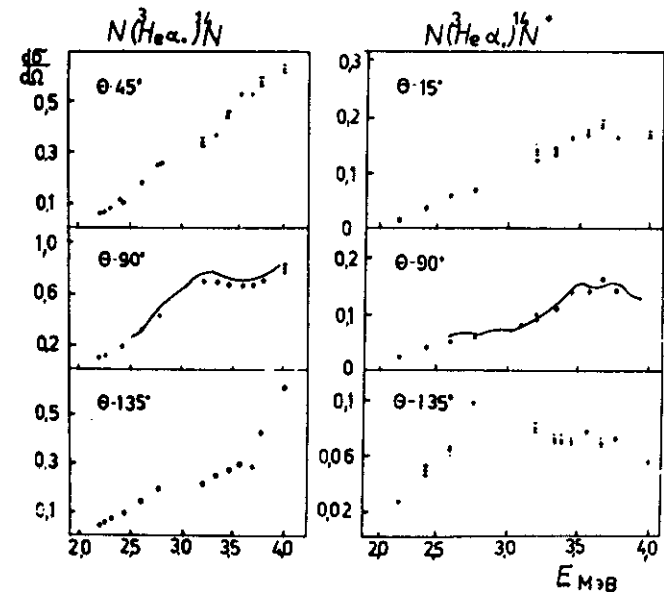


Рис. 1. Дифференциальные сечения реакции $^{14}\text{N}(^3\text{He}, \alpha)^{13}\text{N}$ для группы α_0, α_1 под углами $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ в лабораторной системе координат. По оси абсцисс - энергия в МэВ. По оси ординат - $d\sigma/d\Omega$, в мб/стерад. Сплошная кривая - данные Кнудсена и др.^{/8/}. Приведенные ошибки - статистические.

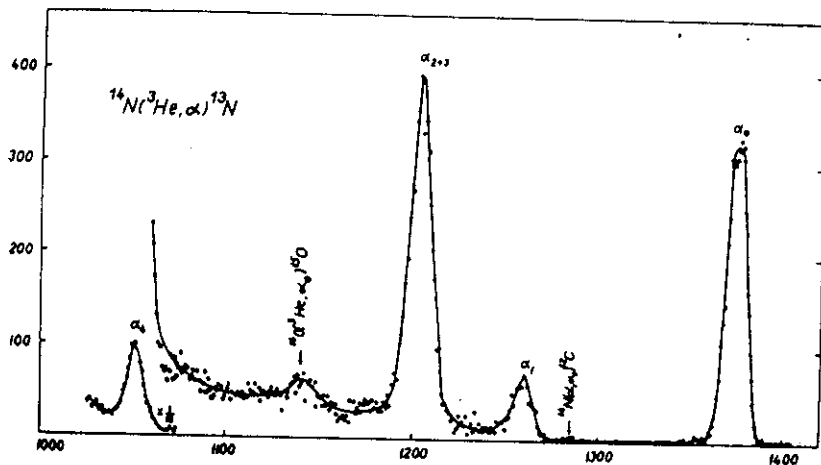


Рис. 2. Типичный энергетический спектр α -частиц из реакции $^{14}\text{N}(^3\text{He}, \alpha)^{13}\text{N}$, измеренный под углом 90° при $E_{^3\text{He}} = 3,4 \text{ МэВ}$.

хода реакции с учетом фона, ошибок в определении числа падающих частиц /1%/, числа атомов мишени /1%/, и в определении геометрического фактора / $\approx 2,5\%$ /. Средняя квадратичная ошибка для канала α_1 составляет $\approx 15\%$. Ее большая величина связана с ошибкой выделения пика α_1 на фоне непрерывного спектра реакции $^{14}\text{N}(^3\text{He}, \alpha)^{12}\text{C}$ /см. рис. 2/. Значения дифференциальных сечений при $\theta = 90^\circ$ сравниваются с данными работы Кнудсена [8]. Для канала α_0 они на 10% ниже данных Кнудсена, для канала α_1 - совпадают /см. рис. 1/. На рис. 3 приведены угловые распределения реакции $^{14}\text{N}(^3\text{He}, \alpha)^{13}\text{N}$, измеренные при пяти значениях энергии в интервале углов $2^\circ \div 170^\circ$ в с.ц.м. Ошибки на графиках статистические. На рис. 4 представлены полные сечения этой реакции, полученные интегрированием угловых распределений. Средняя квадратичная ошибка полных сечений находится в пределах 5-6%. Ошибка в определении энергии пучка в центре мишени не превышала $\approx 30 \text{ кэВ}$. Разброс по энергии при прохождении пучком входного окошка ми-

шени составляет для "длинной" мишени $\approx 20 \text{ кэВ}$, для "точечной" - 40 кэВ .

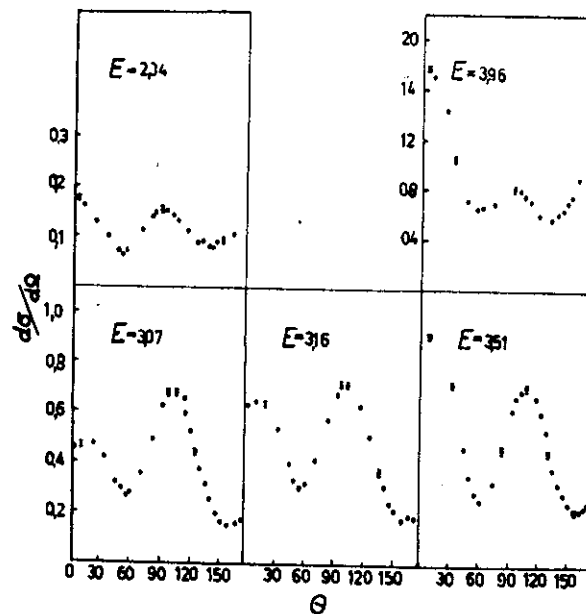


Рис. 3. Угловые распределения α -частиц реакции $^{14}\text{N}(^3\text{He}, \alpha)^{13}\text{N}$. По оси абсцисс - угол в системе центра масс. По оси ординат - дифференциальные сечения в мб/стерад в той же системе. Приведенные ошибки - статистические.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Структура кривых возбуждения и форма угловых распределений указывают на сложность механизма реакции, которую, как уже упоминалось, можно представить в виде некогерентной суммы двух процессов, идущей через составное ядро, и прямого процесса взаимодействия. В аналитическом виде:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{эксп.}} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{прям. пр.}} + \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{сост. ядро.}}$$

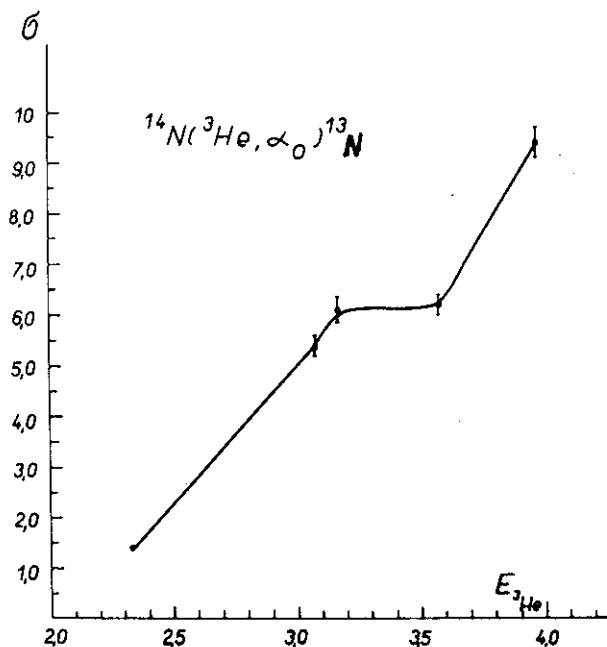


Рис. 4. Проинтегрированные по углам полные сечения реакции $^{14}\text{N}(^3\text{He}, \alpha)^{13}\text{N}$ в диапазоне углов 2° - 162° . По оси абсцисс - энергия в МэВ. По оси ординат - полные сечения реакции в миллибарнах.

$$= N C^2 S_{\ell_j} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{БПИВ}} + N \frac{\lambda^2}{8\pi(2i+1)(2J+1)} \cdot \frac{D_0}{\Gamma} \times \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)^{x-\Phi}, \quad /1/$$

где N - константа нормировки $N=2l$, S_{ℓ_j} - спектроскопический фактор, C^2 - изоспиновый коэффициент Клебша-Гордона, $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{БПИВ}}$ - дифференциальное сечение прямого механизма реакции, рассчитываемое по борновскому приближению искаженных волн /БПИВ/, $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)^{x-\Phi}$ - дифференциальное сечение реакции, идущей через составное

ядро и рассчитываемое по теории Хаузера-Фешбаха, Γ, D_0 - средняя ширина уровней и расстояния между уровнями со спином $0, i, j$ - спины падающей частицы и ядра мишени соответственно, N - фактор ослабления.

Анализ дифференциального сечения по формуле /1/ проводился без усреднения угловых распределений по энергиям. Обоснованность такого подхода подтверждается рядом экспериментальных работ /11-15/, в которых получаемая спектроскопическая информация согласуется с данными, где это усреднение проводилось. Введение фактора ослабления необходимо, поскольку расчет дифференциального сечения по теории Хаузера-Фешбаха не принимает во внимание вклада в сечение реакции от прямого процесса взаимодействия. Это приводит к завышенному значению $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)^{x-\Phi}$. Умножив $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)^{x-\Phi}$ на фактор ослабления N можно учесть это завышение /10/. Поскольку теоретическое описание коэффициента затруднено, его величина определяется из эксперимента.

Согласно работе /16/, использовалась следующая методика оценки N . Вначале определялось его значение для такого канала реакции $^{14}\text{N} + ^3\text{He}$, где можно быть уверенным в преобладающей роли составного ядра в процессе взаимодействия. В качестве таковой был выбран канал a_1 , угловое распределение которого измерено Кнудсом /8/ и др. при $E_{^3\text{He}} = 4,5$ МэВ. Преобладание вклада указанного механизма для этой реакции вытекает из структуры начального /8-19/ и конечного состояний /20/. Особенно важна работа /21/. Значение N находилось по минимуму экспериментального углового распределения так, чтобы расчетная кривая по теории Хаузера-Фешбаха, умноженная на N , касалась минимальной точки экспериментальной кривой. Полученное нами значение $N=0,36$ использовалось в качестве начальной точки для энергетической экстраполяции этой величины в области наших энергий. Энергетическая зависимость $N=N(E)$ была получена на основании угловых распределений группы a_0 , рассматриваемой реакции методом, указанным в работе /16/ с последующей нормировкой этой зависимости к значению $N=0,36$ при $E = 4,5$ МэВ. Такой метод оценки величины N является некоторым прибли-

жением. Однако использование его не приводит в конечном итоге к существенному изменению результатов анализа по БПИВ, являющейся основной целью настоящей работы.

Расчет дифференциального сечения по теории Хаузера-Фешбаха проводился по программе "LIANA"/²³ на ЭВМ CDC-6200 с включением в нее входных данных /энергия, масса, спины, четности, параметры оптических потенциалов/ для уровней всех открытых каналов реакции, по которым может распадаться компаунд-ядро при данной энергии его возбуждения. Рассматриваемые каналы реакции, а также число учитываемых уровней представлены в табл. 1.

Применимость теории в нашем случае определялась выполнением условия $\frac{D_0}{\Gamma} < 2^{1/10}$, где Γ - средняя ширина уровня; D_0 - расстояние между уровнями со спином 0.

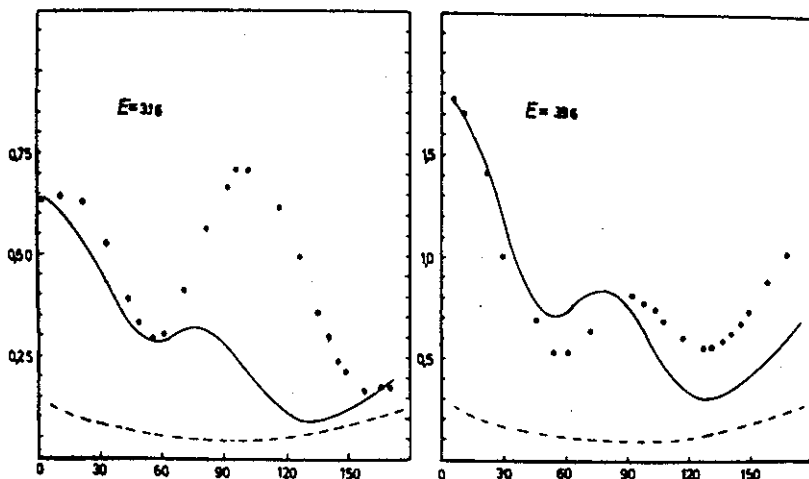


Рис. 5. Угловые распределения реакции $^{14}\text{N}(^3\text{He}, \alpha)^{13}\text{N}$. Пунктирная кривая получена в результате расчета по Хаузеру-Фешбаху. Сплошная кривая - сумма вкладов сечений реакции, рассчитанных по БПИВ+Хаузер-Фешбах. Точки - экспериментальные данные. По оси абсцисс - угол в системе центра масс, по оси ординат - $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ мб/стерад. $S = 1,49$.

Таблица 1

Исследуемая реакция / открытые каналы реакции		$^{14}\text{N} + ^3\text{He}$				Таблица 2			
		$^{14}\text{N}(^3\text{He}, \text{He})\text{M}$	$^{14}\text{N}(^3\text{He}, \text{P})\text{O}$	$^{14}\text{N}(^3\text{He}, \alpha)^{\beta}\text{N}$	$^{14}\text{N}(^3\text{He}, \text{d})\text{O}$	τ_w fm	α_w fm	V_{sc}	I
Число уровней, учитываемых программой	3	45	17	3	1,81	0,592		I	
Частица	^3He	^3He	P	n	d	α			
	Входной канал	150	54	80	52	200			
	Выходной канал								
		16,0	11,8	5,75	8,5	8,93			
	α_v fm	0,829	0,75	0,65	0,87	0,555			
	τ_v fm	0,99	1,17	1,25	1,15	1,375			
	W мэВ								
	τ_w fm								
	α_w fm								
	V_{sc}								
	I								

Таблица 3

$E_{^3\text{He}}$ мэВ	2,34	3,07	3,16	3,51	3,96	среднее S значение
S	1,74	0,93	1,33	1,27	2,16	1,49
S_{max}	1,74	1,39	1,84	1,86	2,83	1,93

Параметры оптических потенциалов, необходимых для расчетов по БПИВ и теории Хаузера-Фешбаха для входного канала, взяты из работы ^{/22/}. Для выходных каналов: из работы ^{/22/} для α -частиц/ и работ ^{/24-27/} для каналов с вылетом n, p, d -частиц/. Значения используемых параметров приведены в табл. 2.

Расчеты ($\frac{d\sigma}{d\Omega}$) БПИВ проводились на ЭВМ БЭСМ-4 по программе ^{/28/}. При расчетах предполагается подхват $1p_{1/2}$ нейтрона. Волновая функция подхваченного нейтрона рассчитывалась в потенциале Вудса-Саксона с обычными параметрами. Спектроскопические факторы для группы α_0 определялись по формуле ^{/1/} путем сравнения расчетных значений дифференциальных сечений с экспериментальными под углом 5° .

На рис. 5 приведены экспериментальные и расчетные значения дифференциальных сечений, где в качестве спектроскопического фактора принималось среднее значение $S = 1,49$, полученное из анализа измеренных угловых распределений. Данные для S приведены в табл. 3.

В этой же таблице приведены максимальные значения спектроскопического фактора (S_{max}), которые получают в предположении отсутствия вклада механизма составного ядра. Как видно из таблицы, значение $S = 1,49$ хорошо согласуется с теоретическими значениями $S = 1,38$ и $S = 1,2$, опубликованными в работах ^{/6, 29/}, а также со значениями S , определяемыми экспериментально в ряде работ: $1,76$ ^{/30/}, $1,3$ ^{/19/}, $1,52$ ^{/31/}, $1,44$ ^{/32/}, и $1,62$ ^{/18/}.

Полученное согласие экспериментально определяемых значений спектроскопических факторов с теоретическими представляется интересным хотя и не неожиданным. При этих же энергиях и при таких же /или близких/ значениях оптических параметров аналогичное совпадение наблюдалось при исследованиях реакций

$^{15}\text{N}(^3\text{He}, \alpha)^{14}\text{N}$, $^{15}\text{N}(^3\text{He}, d)^{16}\text{O}$, $^{15}\text{N}(^3\text{He}, p)^{17}\text{O}$ и т.д.

Таким образом, при надежном выделении прямого процесса взаимодействия метод БПИВ даже в области

малых энергий может оказаться полезным для проверки правильности теоретических предположений относительно структуры возбужденных состояний ядер, участвующих в реакции.

Авторы выражают благодарность Я.Тыкэ, Сон Вон Наму, М.В.Савенковой за помощь в работе.

Литература

1. М.Абузейд, Ким Сын Нам, Г.М.Осепинский, Я.Тыкэ, Б.Фрыцин. Сообщение ОИЯИ, P15-7128, Дубна, 1973.
2. Г.М.Осепинский, Я.Тыкэ, Б.Фрыцин. Сообщение ОИЯИ, P15-7515, Дубна, 1973.
3. Г.М.Осепинский, Я.Тыкэ, Б.Фрыцин. Сообщение ОИЯИ, 7156, Дубна, 1973.
4. М.Абузейд, Г.М.Осепинский, Я.Тыкэ, Б.Фрыцин. Сообщение ОИЯИ, P15-7216, Дубна, 1973.
5. R.Stock, R.Bock, P.David, M.M.Dumm and T.Tamura. Nucl.Phys., A104, 136 (1967).
6. S.Cohen, D.Kurath. Nucl.Phys., A101, 1 (1967).
7. W.Bohne, H.Hornmeyer, H.Lettau, H.Morgenstern, J.Scheer, F.Sihel-schmidt. Nucl.Phys., A128, 537 (1969).
8. A.K.Knudson, and F.C.Yong. Nucl.Phys., A149, 323 (1970).
9. М.Абузейд, Г.М.Осепинский, Я.Тыкэ, Б.Фрыцин. Сообщение ОИЯИ, P15-7121, Дубна, 1973.
10. P.E.Hodson. Nuclear Reactions and Nuclear Structure, Clarendon Press, Oxford, 1971.
11. R.C.Ritter. Eric Sheldon and Michael Strang. Nucl. Phys., A140, 609 (1970).
12. J.Bomer, H.Fuchs, K.Grabisch, V.Janitski and G.Roschert. Nucl. Phys., A172, 618 (1971).
13. M.P.Etten and G.H.Lenz. Nucl. Phys., A179, 448 (1972).
14. P.D.Georgopolus, W.A.Lochstet and E.Bleuler. Nucl. Phys., A183, 625 (1972).
15. J.A.Cookson. Nucl.Phys., A180, 89 (1972).
16. Г.М.Осепинский, В.М.Семенов, Сон Вон Нам, М.А.Фарук. Сообщение ОИЯИ, P15-8217, Дубна, 1974.
17. S.Lie. Nucl.Phys., A181, 517 (1972).
18. R.L.Kozub, L.A.Kull and E.Kashy. Nucl.Phys., A99, 540 (1967).
19. F.Hintenberger, G.Mairle, U.Schmidt, Rohr P.Turek, G.J.Wagner. Nucl.Phys., A106, 161 (1968).
20. W.W.True. Phys. Rev., 130, 1530 (1963).
21. H.V.Jager, H.R.Kissener and R.A.Eramzhian. Nucl. Phys., A171, 16 (1971).
22. C.H.Herling, L.Cohen and J.D.Silverstein. Phys.Rev., 178, 1551 (1969).
23. W.R.Smith. Computer Phys. Commun., 1, 181 (1969).
24. R.Weibezahn, H.Freisleben, F.Puhlhofer and R.Bock. Nucl. Phys., A176, 645 (1971).
25. M.P.Etten and G.H.Lenz. Nucl.Phys., A179, 44s (1972).
26. B.D.Murphy, R.M.Strang and R.C.Ritter. Nucl.Phys., A168, 328 (1971).
27. R.C.Ritter, E.Sheldon and M.Strang. Nucl.Phys., A140, 609 (1970).
28. К.А.Гриднев, Л.В.Краснов, Н.М.Кухмина, В.К.Лукьянов, В.И.Нухмина, В.И.Фурман. Препринт ОИЯИ, 2458, Дубна, 1968.
29. S.Varma and P.Goldhammer. Nucl.Phys., A125, 193 (1969).
30. M.Gailard, K.Bonche, L.Fenvrais, P.Gaillard, A.Guichard, M.Gusakov, J.L.Leonhardt, J.R.Pizzi. Nucl.Phys., A119, 161 (1969).
31. D.Bachelier, M.Bernas, J.Brissand, C.Detzas, D.Radvanyi. Nucl.Phys., A126, 60 (1969).
32. I.S.Towner. Nucl. Phys., A126, 197 (1964).

Рукопись поступила в издательский отдел
19 августа 1974 года.