

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



С 3439
0-728

14/1/74
P15 - 7401

Г.М.Осетинский, Сон Вон Нам, М.А.Фарук

126/2-74

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИЙ $^{22}\text{Ne} (^3\text{He}, p) ^{24}\text{Na}$,
 $^{22}\text{Ne} (^3\text{He}, \alpha) ^{21}\text{Ne}$

1973

ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

Г.М.Осетинский, Сон Вон Нам, М.А.Фарук

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИЙ $^{22}\text{Ne} (^3\text{He}, p) ^{24}\text{Na}$,
 $^{22}\text{Ne} (^3\text{He}, \alpha) ^{21}\text{Ne}$

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Настоящая работа посвящена исследованию механизма реакции $^{22}\text{N}(^3\text{He}, p)^{24}\text{Na}$, $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, \alpha)^{21}\text{Ne}$ и измерению дифференциальных и полных сечений реакций в интервале 2,9 - 4,1 МэВ. До настоящей работы исследование этих реакций проводилось в области энергий, больших 9МэВ¹⁻⁴, где основное внимание уделялось анализу угловых распределений с целью получения спектрометрической информации о конечных ядрах ^{24}Na и ^{21}Ne .

1. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Работа выполнена на пучке ионов ^3He электростатического генератора ЭГ-5 ОИЯИ. Исследования проводились на газовой мишени, которая наполнялась неоном с обогащением ^{22}N -80% до давления 50 тор. Измерения кривых возбуждения и угловых распределений α -частиц и протонов из реакций производилось одновременно пятью поверхностно-барьерными детекторами, установленными в камере рассеяния. Один из них, монитор, устанавливался под углом 30°. Остальные располагались на кронштейне, который мог вращаться относительно оси камеры, обеспечивая измерения угловых распределений в интервале углов 2 - 165° в л.с. Энергетическое разрешение каждого из спектрометрических каналов составляло 50 ÷ 60 кэВ для $E_\alpha = 5,5$ МэВ. Данные по дифференциальным сечениям и угловым распределениям получались вычислением площади энергетического спектра соответствующего канала реакции за вычетом фона. Из-за наличия в неооне примеси ^{14}N из дифференциальных сечений и угловых распределений реакции $^{22}\text{N}(^3\text{He}, p)^{24}\text{Na}$ и

$^{22}\text{Ne}(^3\text{He},\alpha)^{21}\text{Ne}$ вычитался вклад групп $p_{3,4}$ и α_0 из реакции $^{14}\text{N}+^3\text{He}$, поскольку /в соответствии с кинематикой реакции/ импульсы этих групп регистрируются примерно в тех же каналах амплитудного анализатора, что и импульсы основной реакции. Поправка определялась из проведенных нами измерений дифференциальных сечений и угловых распределений реакций $^{14}\text{N}(^3\text{He},p)^{16}\text{O}$, $^{14}\text{N}(^3\text{He},\alpha)^{13}\text{N}$. Схема опыта, конструкция мишеней, блок-схема регистрации импульсов, методика измерений и методика расчетов дифференциальных сечений и угловых распределений аналогичны описанным ранее /5/. Ошибка в определении энергии ± 20 кэВ. Разброс по энергии пучка при прохождении им входного окошка мишени составлял ≈ 20 кэВ.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

а/ Реакция $^{22}\text{Ne}(^3\text{He},p)^{24}\text{Na}$

На рис. 1 приведен типичный энергетический спектр реакции $^{22}\text{Ne}(^3\text{He},p)^{24}\text{Na}$, измеренный под углом 135° при $E_{^3\text{He}} = 3,95$ МэВ. На рис. 2 и 3 представлены результаты измерений дифференциальных сечений реакции $^{22}\text{Ne}(^3\text{He},p)^{24}\text{Na}$ для групп $p_0, p_{1,2}, p_3, p_{4,5}$. Измерения проводились под углами $45, 90$ и 135° в интервале энергий $2,9 - 4$ МэВ с шагом по энергии 50 кэВ. Для исключения ошибок, связанных с определением геометрического фактора и чистоты пучка, выход протонов из реакции нормировался по выходу протонов реакции $^2\text{H}(^3\text{He},p)\alpha$, дифференциальные сечения которой известны /5/. Средняя квадратичная ошибка измерений дифференциальных сечений не превышает 13% . Она складывается из ошибки измерения выхода реакции с учетом фона $/\pm 12\%/$, ошибки определения числа ионов ^3He , падающих на мишень $/1\%/$, ошибки определения числа атомов мишени $/0,5\%/$, ошибки нормировки $/4\%/$.

На рис. 4 представлены результаты измерения угловых распределений протонов из исследуемой реакции для состояний $p_{1,2}, p_3, p_{4,5}$, выполненных при четырех

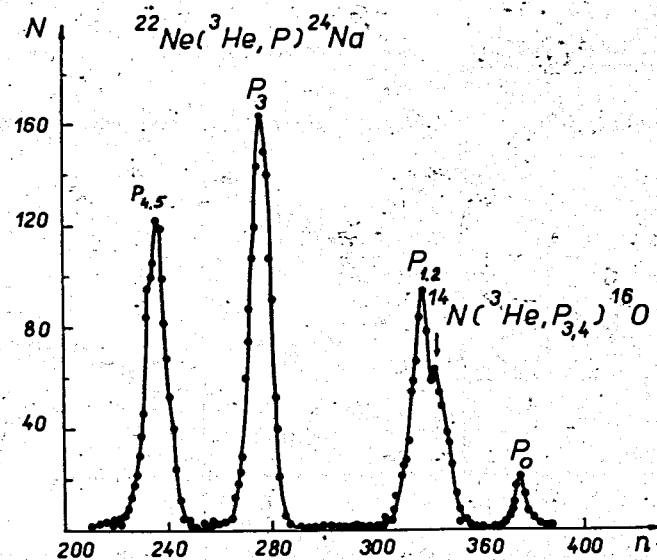


Рис. 1. Типичный энергетический спектр реакции $^{22}\text{Ne}(^3\text{He},p)^{24}\text{Na}$, измеренный под углом 135° при $E_{^3\text{He}} = 3,95$ МэВ.

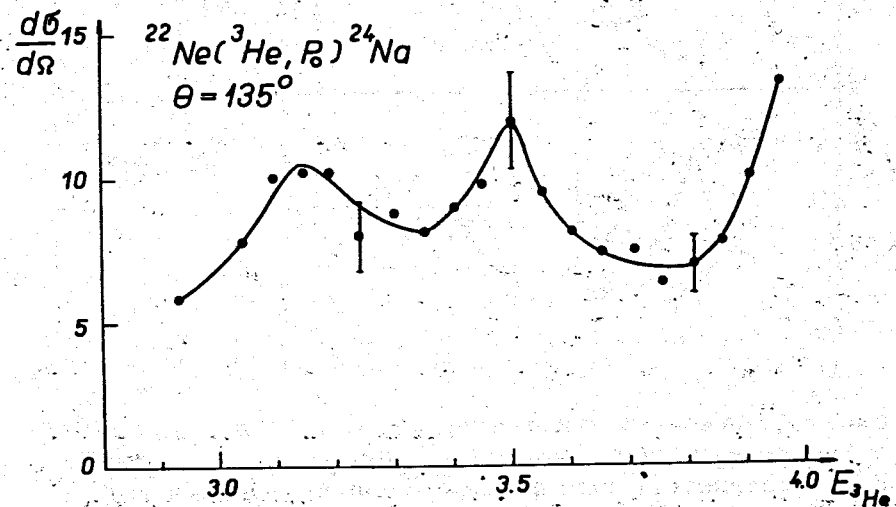


Рис. 2. Дифференциальные сечения реакции $^{22}\text{Ne}(^3\text{He},p)^{24}\text{Na}$. По оси абсцисс - энергия в МэВ. На оси ординат - $d\sigma/d\Omega$ в мкБ/стерад.

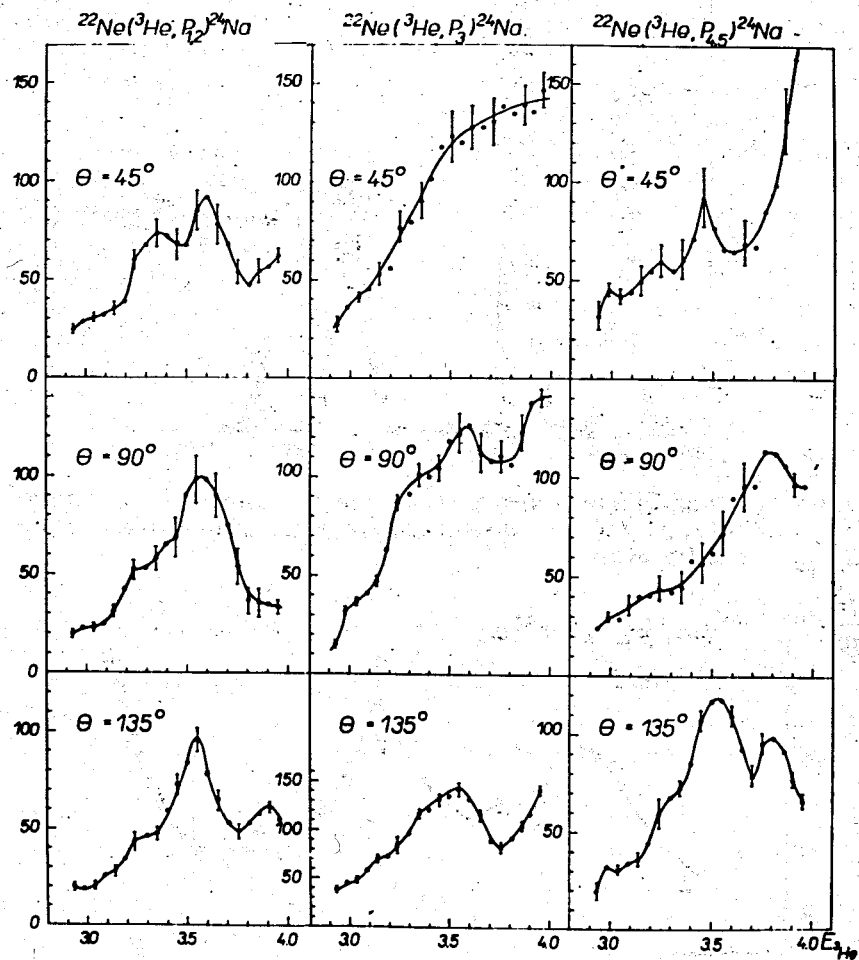


Рис. 3. Дифференциальные сечения реакции $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, p_{1,2})^{24}\text{Na}^*$, $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, p_3)^{24}\text{Na}^*$, $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, p_{4,5})^{24}\text{Na}^*$ под углами 45° , 90° , 135° соответственно. На оси абсцисс - энергия в МэВ. По оси ординат - дифференциальное сечение в мкБ/стерад.

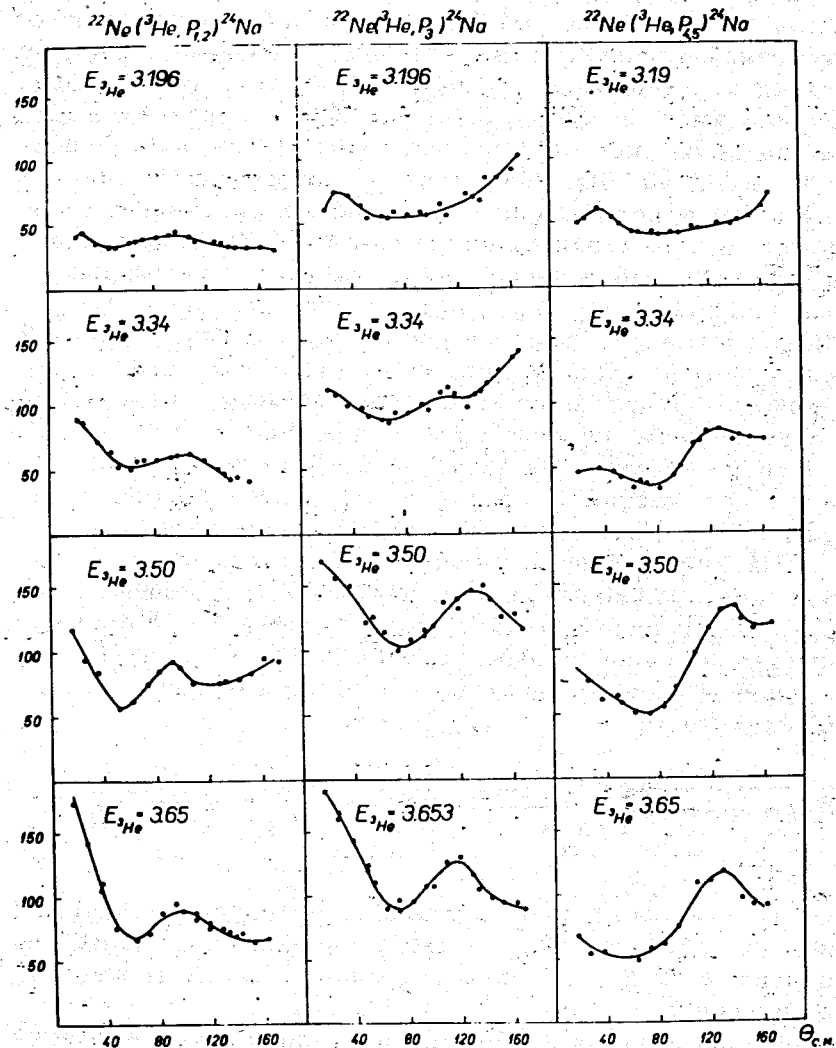


Рис. 4. Угловые распределения протонов из реакций $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, p_{1,2})^{24}\text{Na}^*$, $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, p_3)^{24}\text{Na}^*$, $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, p_{3,4})^{24}\text{Na}^*$. По оси абсцисс - угол в системе центра масс. По оси ординат - дифференциальные сечения в мкБ/стерад.

значениях энергии. Измерения проводились в интервале углов $15^\circ - 165^\circ$ в л.с. Средняя квадратичная ошибка измерений угловых распределений, включающая коридор ошибок и ошибку нормировки кривых по данным дифференциальных сечений под углом 90° , не превышает 15%. Как видно из рис. 2 и 3, кривые возбуждения, измеренные под углами $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ в л.с., с возрастанием энергии изменяются немонотонно /исключение составляет лишь группа p_3 , измеренная под углом 45° /. Наблюдающиеся на кривых возбуждения максимумы не коррелированы между собой ни по углам, ни по группам протонов. Исключение составляет широкий максимум при $E_{ZHe} = 3,55$ МэВ для группы $p_{1,2}$. Однако, как будет указано в дальнейшем, появление этого максимума, по-видимому, не связано с проявлением группы уровней составного ядра ^{25}Mg с энергией возбуждения 23,22 МэВ. Возможно, что появление его частично связано с сильной интерференцией прямого и компаунд-процессов взаимодействия.

Указанная выше особенность поведения функции возбуждения позволила извлечь информацию о величине когерентной ширины, которая идентифицируется со средним значением полной ширины уровней компаунд-ядра Γ .

Определение Γ производилось по автокорреляционной функции /6/.

$$C(\epsilon) = \frac{\langle \sigma(E) - \langle \sigma(E) \rangle \rangle \langle \sigma(E+\epsilon) - \langle \sigma(E+\epsilon) \rangle \rangle}{\langle \sigma(E) \rangle \langle \sigma(E+\epsilon) \rangle} \quad /1/$$

где $\langle \rangle$ - усреднение, взятое по интервалу изучаемой энергии, $\sigma(E), \sigma(E+\epsilon)$ - дифференциальное сечение при энергии E и $E+\epsilon$, соответственно, ϵ - шаг измерений по энергии.

Анализ функций возбуждения и угловых распределений позволяет сделать заключение о сложности механизма реакции. Немонотонный характер кривых возбуждения, сильная зависимость угловых распределений от энергии указывает на существенную роль механизма составного ядра. Вместе с тем, наблюдающееся для групп $p_{1,2}, p_3$ увеличение с ростом энергии дифференциального сече-

ния под малыми углами указывает на наличие определенного вклада прямого механизма реакции. Оценка этого вклада (Y) проведена по формуле /6/

$$C(\theta) = \frac{1 - Y^2}{N_f^{max}}, \quad /2/$$

где $C(\theta)$ определяется по формуле /1/, когда $\epsilon = 0$, где $N_f^{max} = \frac{1}{2} [(2s_a + 1)(2s_b + 1)(2i + 1)(2j + 1)]$, s_a, s_b, i, j - спины падающей и вылетающей частиц, ядра-мишени и конечного ядра соответственно, Y - доля механизма прямого взаимодействия. Результаты расчета Γ и Y приведены в таблице 1. Расчеты проводились для кривых возбуждения, измеренных под углом 135° в л.с. Как видно из таблицы, вклад прямого процесса взаимодействия в механизм реакции не превышает 40%.

Используя значение Y , мы сделали попытку описания усредненных по энергии угловых распределений групп $p_{1,2}, p_3$ по статистической теории Хаузера-Фешбаха /7/.

Таблица 1

Группа	p_0	$p_{1,2}$	p_3	$p_{4,5}$
угол	135	135	135	135
Γ макс (кэВ)	51	88	68	75
N_f макс	18	16	6	-
Y %	-	22	37	-
Γ мин (кэВ)	-	40	26	-
x-ф				

Использование этой теории представляется возможным, поскольку плотность уровней составного ядра ^{25}Mg достаточно велика /8/ /например, при $E_{ZHe} = 3,5$ МэВ, расстояние между уровнями составляет 0,57 кэВ/.

На рис. 5 представлены усредненные угловые распределения для групп протонов $p_{1,2}, p_3$. Пунктирная кривая - расчетные угловые распределения, полученные по методу Хаузера-Фешбаха. Значения коэффициентов трансмиссии $T_\ell = 1 - |\eta_\ell|^2 / \eta_\ell$ - коэффициент отражения ℓ -парциальной волны/, используемых в расчетах дифференциальных сечений по методу Хаузера-Фешбаха $(d\sigma/d\Omega)^{x-\phi}$, были получены по программе SAT /9/ на ЭВМ CDC -1604A.

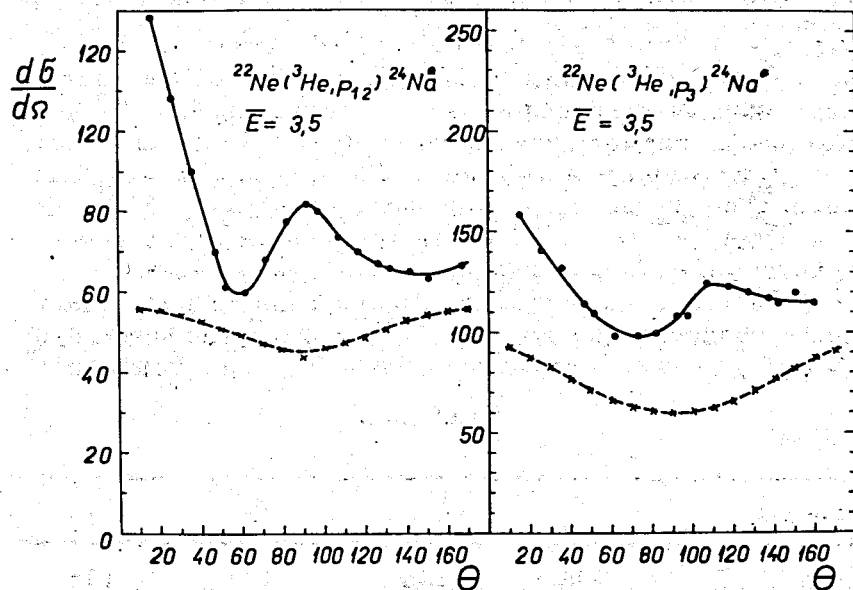


Рис. 5. Усредненные значения угловых распределений для реакций $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, p_{1,2})^{24}\text{Na}^*$ и $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, p_3)^{24}\text{Na}^*$. Усреднение проведено в диапазоне энергий 3,34-3,65 МэВ. /сплошная кривая/. Пунктирная кривая - расчетные значения по методу Хаузера-Фешбаха. На оси абсцисс - угол в системе центра масс. На оси ординат - $d\sigma/d\Omega$ в мкБ/стерад.

Оптические параметры для входного канала, необходимые для расчетов, получены экстраполяцией параметров, указанных в /10-11/, в область наших энергий. Для выходного канала параметры рассчитывались по формулам работы /12/. Рассчитываемые угловые распределения норми-

ровались к усредненным по энергиям экспериментальным распределениям, из которых в точке нормировки /135°/ вычитался вклад прямого процесса взаимодействия, рассчитываемый по формуле /2/ /в этом случае данные в точке нормировки представляют $(d\sigma/d\Omega)_{\text{exp}}$, соответствующие механизму составного ядра/. Усреднение угловых распределений проводилось в диапазоне энергий 3,34-3,65 МэВ. Оценка нижней границы средней ширины уровней составного ядра определялась по формуле

$$\Gamma_{x-\phi}^{\text{мин}} = \frac{D_0 \lambda^2}{8\pi(2S_a + 1)(2i + 1)} \cdot \frac{(d\sigma/d\Omega)^{x-\phi}}{\langle d\sigma/d\Omega \rangle_{\text{эксп}}}, \quad /3/$$

где $\langle \rangle$ обозначает усреднение по области энергий 3,34-3,65 МэВ, $\langle d\sigma/d\Omega \rangle_{\text{эксп}}$ - экспериментальное значение дифференциального сечения под углом 135°, из которого вычтен вклад прямого процесса, согласно формуле /2/ s_a, i - спины падающей частицы и ядра-мишени соответственно, D_0 - среднее расстояние между уровнями со спином 0, λ - длина волны Де-Бройля для падающей частицы. Данные расчета $\Gamma_{x-\phi}^{\text{мин}}$ представлены в таблице 1.

б/ Реакция $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, \alpha)^{21}\text{Ne}$

Измерены дифференциальные сечения реакции $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, \alpha)^{21}\text{Ne}$ для групп α_0, α_1 и α_2 под углами 45°, 90°, 135° в л.с. Измерения проводились в интервале энергий 3,0 - 4,1 МэВ с шагом по энергии 50 кэВ. Результаты измерений представлены на рис. 6. Средняя квадратичная ошибка измерений не превышает 15%. Как видно из рисунка, кривые возбуждения для всех групп α -частиц при некоторых энергиях имеют максимумы, положения и ширины которых не коррелируют по углам и по α -группам. Широкий максимум, наблюдающийся на кривых возбуждения реакции $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, p)^{24}\text{Na}$ при $E_{^3\text{He}} = 3,55$ МэВ /см. рис. 3/, на кривых возбуждения для α -групп отсутствует. Эта особенность кривых возбуж-

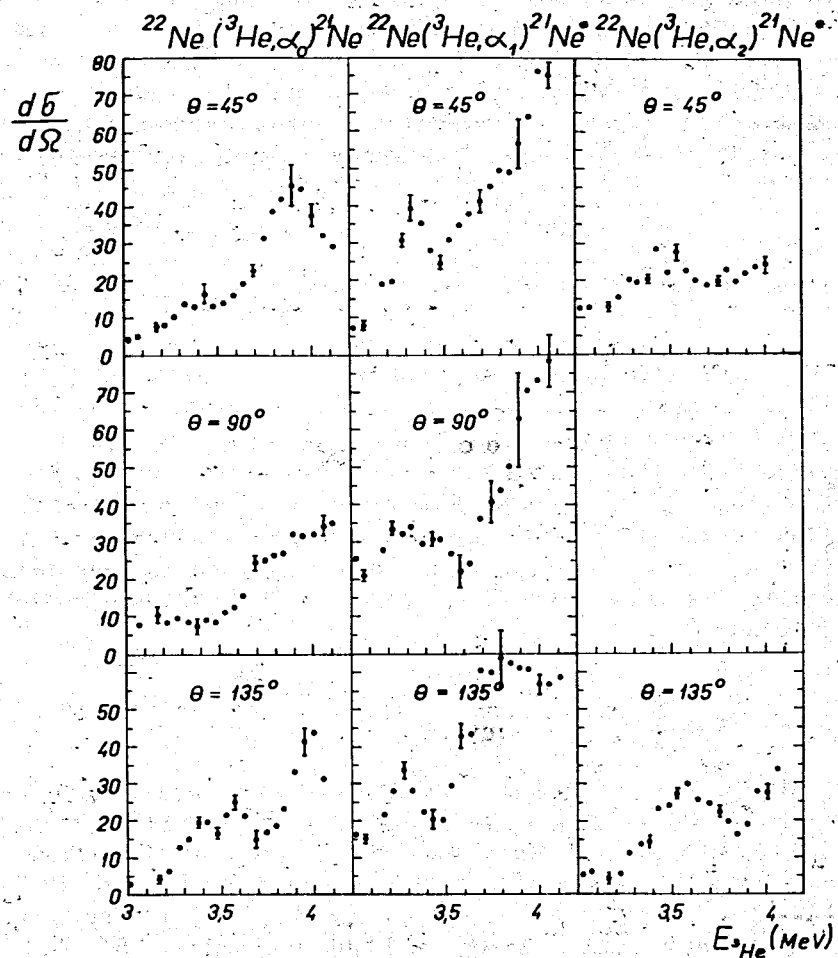


Рис. 6. Дифференциальные сечения реакции $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, \alpha)^{21}\text{Ne}$ для групп α_0 , α_1 и α_2 под углами 45° , 90° , 135° в л.с. По оси абсцисс - энергия в МэВ, по оси ординат - $d\sigma/d\Omega$ в мкБ/стерад.

денция α -групп позволила провести флюктуационный анализ для определения средней ширины $\Gamma_{\text{эрикс}}^{\text{max}}$. Метод расчета указан в предыдущем параграфе. Результаты приведены в таблице 2. Как видно из таблицы, полученные значения согласуются с результатами, полученными для реакции $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, p)^{24}\text{Na}$.

На рис. 7 приведены результаты измерений угловых распределений при трех значениях энергий для групп α_0 , α_1 и α_2 в интервале углов 15° - 165° в л.с. Средняя квадратичная ошибка измерений не превышает 17%.

Как видно из рисунка, угловые распределения для групп α_0 и α_2 имеют форму, близкую к симметричной относительно 90° . Для группы α_1 оно сильно изменяется с изменением энергии. Все это говорит о большой роли механизма составного ядра в реакции и дает основание /учитывая большую плотность уровней составного ядра ^{25}Mg / произвести описание усредненных по энергии угловых распределений по статистической теории Хаузера-Фешбаха.

Расчеты проводились с использованием для входного канала таких же параметров оптического потенциала, что и для реакции $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, p)^{24}\text{Na}$. Параметры оптического потенциала для выходного α -канала взяты из работы /4/. Результаты подгонки усредненной по энергии кривой угловых распределений /усреднены угловые распределения при энергиях 3,54; 3,64; 3,91 МэВ/ приведены на рис. 7. Как видно из рисунка, хорошее согласие получено только для группы α_0 . Минимальные значения $\bar{\Gamma}$, рассчитанные согласно формуле /3/ с использованием усредненной кривой угловых распределений для группы α_0 , α_1 , представлены в таблице 2.

Из таблицы видно, что $\bar{\Gamma}$, полученные обоими методами, согласуются между собой /напомним, что метод Хаузера-Фешбаха дает нижнюю границу этой величины/. Несколько завышенное значение $\bar{\Gamma}$, полученное из флюктуационного анализа, возможно, является результатом большого шага изменения энергии или энергетического разброса пучка на мишени. Обе эти причины приводят

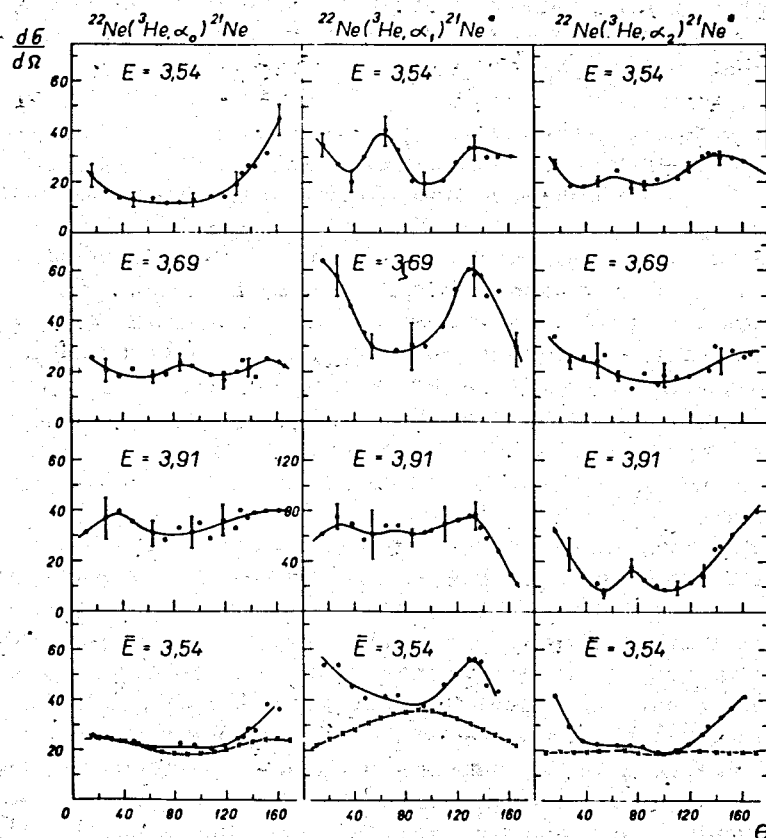


Рис. 7. Угловые распределения реакции $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, \alpha)^{21}\text{Ne}$ для групп α_0 , α_1 и α_2 для $E_{\text{He}^3} = 3,54, 3,69$ и $3,91$ МэВ. В нижней части графика приведены усредненные в диапазоне энергий $3,54-3,91$ МэВ угловые распределения реакции для этих же α -групп. По оси ординат - $d\sigma/d\Omega$ в мкБ/стерад.

к сглаживанию кривой возбуждения и, соответственно, к росту Γ .

Таблица 2

Средние ширины Γ (кэВ):	α_0	α_1	α_2
Γ макс Эрикссон	86	84	58
Γ мин х-ф	78	44	-

3. ПОЛНЫЕ СЕЧЕНИЯ

В таблице 3 приведены значения полных сечений реакции $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, p)^{24}\text{Na}$ для групп $p_{1,2}, p_3$ и реакции $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, \alpha)^{21}\text{Ne}$ для групп α_0, α_1 и α_2 . Они получены интегрированием угловых распределений в интервале углов $15-165^\circ$. Средняя квадратичная ошибка измерений не превышает 18%. Как видно из таблицы, полное сечение реакции с выходом протонов превосходит 3-5 раз величины сечений α -групп для тех же энергий. Этого следовало ожидать из правил отбора по изоспину. В сечении реакции $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, \alpha)^{21}\text{Ne}$ могут вносить вклад состояния составного ядра с изотопическим спином $T = 1/2$ и $T = 3/2$, в то время как в реакции $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, \alpha)^{21}\text{Ne}$ лишь состояния с $T = 1/2$. Отметим, что коэффициенты проницаемости для групп протонов и α -частиц в выходном канале в пределах 10% равны между собой $\approx 0,98$ для $\ell = 0$, где ℓ - орбитальный момент, что исключает объяснение существующего различия в сечениях за счет влияния этого коэффициента.

Таблица 3

Вы- лета- ющ. частицы	3,04	3,2	3,35	3,5	3,68
$p_{1,2}$	357±32	479±11	747±26	917,6	1025±42
p_3	489±9	844±14	1297±68	1600±65	1412±65
α_0	-	-	-	238	254
α_1	-	-	-	451	511
α_2	-	-	-	279	257

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные результаты показывают, что реакция $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, \alpha)^{21}\text{Ne}$ в энергетическом интервале $E = 2,9 - 4,1$ МэВ протекает в основном через механизм образования составного ядра. В реакции $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, p)^{24}\text{Na}$ существует вклад прямого процесса. Величина этого вклада не превышает 35 - 40% на задних углах измерения. Из флюктуационного анализа и расчетов по методу Хаузера-Фешбаха найдено, что значение средней ширины уровней (Γ) составного ядра ^{25}Mg для интервала энергий возбуждения 23-24 МэВ находится в пределах от 50 до 90 кэВ. Полные сечения реакции, полученные интегрированием угловых распределений в интервале углов 15 - 165° для реакции $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, p)^{24}\text{Na}$, в 3-5 раз больше сечений реакции $^{22}\text{Ne}(^3\text{He}, \alpha)^{21}\text{Ne}$.

Авторы приносят глубокую благодарность С.Л.Голубеву и М.В.Савенковой за помощь в работе.

Литература

1. R.R.Betts, H.T.Fortune, J.D.Garrett, R.Middleton, D.J.Pullen and O.Hansen. *Phys.Rev.Lett.*, 26, No. 18, 1121, 1971.
2. K.H.Bray and J.Nurzynski. *Nature*, 215, 501-2, 1967.
3. D.C.Hensley. *Phys.Lett.*, 27B, No. 10, 644, 1968.
4. J.M.Joyce, R.W.Zurmuhle, and C.M.Fou. *Nucl.Phys.*, A132, 629, 1969.
5. М.Абузейд, Г.М.Осепинский, Я.Тыкэ и Б.Фрыщин. Сообщение ОИЯИ, P15-7121, Дубна, 1973.
6. T.Ericson. *Annals of Physics*, 23, 390, 1963.
7. K.A.Sberhard, P.V.Brentano, H.Bohning and R.O.Stephen. *Nucl. Phys.*, A125, 673, 1969.
8. A.G.W.Cameron. *Can.J.Phys.*, 36, 1040, 1950.
A.Silbert, A.G.W.Cameron. *Can.J.Phys.*, 43, 1446, 1965.
9. W.R.Smith. *Computer Physics Communications*, 1, 106, 1969.
10. G.M.Matous, G.H.Herling and E.A.Wolicki. *Phys.Rev.*, 152, 908, 1966.
11. K.H.Bray, J.Nurzynski and W.P.Bourke. *Nucl.Phys.*, A114, 309, 1968.
12. H.F.Lutz, J.J.Wesolowski, L.F.Hansen and S.F.Eccles. *Nucl.Phys.*, A95, 591-607, 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 августа 1973 года.