

с 343e1

5/III 73

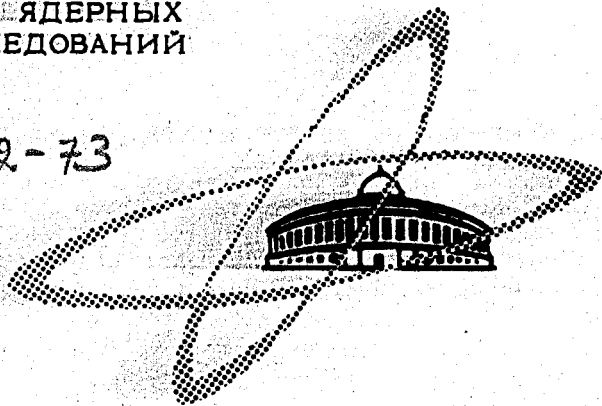
A-267

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна.

865/2-73

P7 6815



А.П.Артюх, Я.Вильчински, В.В.Волков,
Г.Ф.Гриднев, В.Л.Михеев

ПРЯМЫЕ РЕАКЦИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

№ 22 C Th 232

1972

P7 - 6815

А.Г.Артюх, Я.Вильчински, В.В.Волков,
Г.Ф.Гриднев, В.Л.Михеев

ПРЯМЫЕ РЕАКЦИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

Ne²² С Th²³²

Направлено в ЯФ

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Артюх А.Г., Вильчински Я., Волков В.В., Гриднев Г.Ф., Р7 - 6815
Михеев В.Л.

Прямые реакции при взаимодействии ^{22}Ne с ^{232}Th

^{232}Th облучался ионами ^{22}Ne с энергией 174 Мэв. С помощью методики $\Delta E, E$ получены угловые распределения, энергетические спектры и сечения образования продуктов прямых реакций с $3 \leq Z \leq 12$.

Препринт Объединенного института ядерных исследований.
Дубна, 1972

Artukh A.G., Wilczynski J., Volkov V.V.,
Gridnev G.F., Mikheev V.L.

P7 - 6815

Direct Reactions in $^{22}\text{Ne}-^{232}\text{Th}$ Interaction

^{232}Th was bombarded with ^{22}Ne ions of 174 MeV energy. Angular distributions, energy spectra and cross sections of direct reaction products with $3 \leq Z \leq 12$ were obtained using the $\Delta E, E$ method.

Preprint. Joint Institute for Nuclear Research.
Dubna, 1972

1. Введение

Сечение прямых реакций составляет значительную часть полного сечения ядерного взаимодействия ускоренных тяжелых ионов с тяжелыми ядрами ^{1/}. Как показано в наших работах ^{2,3/}, реакции передачи нуклонов при взаимодействии тяжелых ионов с тяжелыми ядрами являются эффективным способом получения нейтронизбыточных изотопов легких ядер. Знание характеристик прямых реакций существенно и при синтезе новых трансурановых элементов.

Значительная часть исследований прямых реакций на тяжелых ядрах выполнена путем радиохимического выделения отдельных продуктов ^{4-7/}. Однако этот метод не позволяет получить полные сечения прямых реакций, при его использовании затруднительно измерение энергетических спектров. Предложенная нами ^{8/} комбинация методов магнитного анализа и $\Delta E, E$ позволяет однозначно идентифицировать атомный номер Z и массовое число A продуктов реакций вплоть до аргона. Однако ее применение для снятия угловых распределений требует затраты значительного времени работы ускорителя. Менее трудоемкими являются измерения с методикой $\Delta E, E$ ^{9/}. Но в этом случае возникает сложность с разделением изотопов, в особенности при $Z \geq 8$.

Получение некоторых общих характеристик прямых реакций не требует разделения продуктов по массовому числу при надежном разделении по Z . Сюда относится измерение полных сечений прямых реакций и сечений образования отдельных элементов, а также изучение кулоновских эффектов, которые в основном определяются зарядами взаимодействующих ядер и сравнительно слабо варьируются при изменении массовых чисел. Некоторые из характеристик, как например, угловые распределения, различаются для соседних изотопов незначительно ^{4,5/}. Основной же вклад в сечение, как показали наши эксперименты ^{10/} по изучению прямых реакций в системе ${}^{232}\text{Th} + {}^{22}\text{Ne}$ с разделением изотопов под углом 40° , дают именно 2-3 соседних изотопа.

Это послужило основанием для исследования в настоящей работе прямых ядерных реакций в системе $^{232}\text{Th} + ^{22}\text{Ne}$ с помощью методики $\Delta E, E$ без разделения изотопов.

2. Методика эксперимента

Опыты проводились на 310-сантиметровом циклотроне тяжелых ионов ОИЯИ. Мишень из металлического ^{232}Th толщиной $2,5\text{ мг/см}^2$ облучалась ионами ^{22}Ne с энергией 174 Мэв. Продукты ядерных реакций регистрировались телескопом из тонкого /толщиной 27 мкм/ ΔE и толстого E / $\sim 0,5$ мм/ кремниевых поверхностно-барьерных детекторов. Телескоп находился в реакционной камере на расстоянии 25 см от мишени и охватывал телесный угол $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ стерадиана. Перемещение телескопа по углам в горизонтальной плоскости осуществлялось дистанционно. Точность установки угла составляла $\pm 0,1^\circ$. Размер пучка на мишени составлял 6×6 мм², его угловая расходимость не превышала $\pm 0,5^\circ$. Входное отверстие телескопа имело диаметр 5 мм. В этих условиях угловое разрешение было не хуже $\pm 1,5^\circ$.

Импульсы с детекторов ΔE и E после усиления попадали в амплитудный анализатор, работавший в двумерном режиме $128(\Delta E) \times 32(E)$ канала. Продукты с определенным Z выделялись по соответствующим гиперболам в двумерных спектрах. Мониторинг пучка осуществлялся по упруго рассеянным ионам кремниевым детектором, расположенным под углом 30° к пучку.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Угловые распределения

На рис. 1 представлены угловые распределения продуктов с $3 \leq Z \leq 12$ в системе центра масс. Энергия продукта при пересчете из лабораторной системы в систему центра масс принималась равной энергии в максимуме энергетического спектра. Считалось, что в конечном канале реакции имеются две частицы, массовое число легкого продукта принималось равным массовому числу изотопа, дававшего максимальный выход в опытах с разделением изотопов под углом $40^\circ / 10^\circ$. Отметим, что за счет значительной разницы в массах легкого и тяжелого продуктов максимальное различие

в углах для лабораторной системы и системы центра масс не превышает 7° . Абсолютные величины сечений определялись путем нормировки по упруго рассеянным ионам. Наши измерения под углами $20, 25, 30, 35^\circ$ показали, что здесь $d\sigma_{\text{упр}}/d\sigma_{\text{рез}} = \text{const}(1 \pm 0,03)$. В соответствии с данными ^{11/} сечение упругого рассеяния под этими углами было принято равным резерфордскому ($\text{const} = 1$) и использовано для нормировки.

Выделение канала передач нейтронов и неупругого рассеяния неона мы проводили путем вычитания из энергетического спектра неона пика упругого рассеяния, отнормированного по форме на аппаратные пики при углах $10-15^\circ$, где упругое кулоновское рассеяние резко превосходит другие каналы реакций. При этом надежно удавалось выделить лишь часть спектра, отстоящую более чем на 7 Мэв от положения максимума пика упругого рассеяния. Именно эта часть спектра использовалась для вычисления сечений продуктов с $Z=10$, представленных на рис. 1. Надо отметить, что при такой обработке исключались эффекты кулоновского возбуждения, поскольку в соответствии с теорией ^{12/} кулоновским путем ионами ^{22}Ne с энергией 174 Мэв в ^{232}Th можно возбудить лишь уровни с $E^* \lesssim 6$ Мэв.

Некоторое представление о доле продуктов с $Z=10$, учитываемой при принятом нами способе обработки результатов, можно получить из данных с разделением изотопов при $\theta = 40^\circ/10'$. Полное сечение передач нейтронов здесь составляет 80 мбн/стерад, из них продукты с энергией меньше величины $E_{\text{упр}} = 7$ Мэв/ составляют 65%.

Особенностью угловых распределений, приведенных на рис. 1, является систематическое изменение их формы с увеличением числа переданных протонов ΔZ . Отметим, что общее число переданных нуклонов для изотопов, дающих наибольший вклад в сечение, как показали наши измерения при $\theta = 40^\circ/10'$ близко к удвоенному числу переданных протонов.

Из рис. 1 видно, что прямые реакции с относительно небольшим числом переданных нуклонов имеют в угловом распределении максимум при угле, близком к углу резерфордского рассеяния при упругом касательном столкновении, а дифференциальные сечения многонуклонных передач монотонно растут с уменьшением угла вылета. Этот результат согласуется с данными по изучению реакций передачи на средних ядрах ^{13,14}

Теоретическому анализу угловых распределений продуктов прямых реакций посвящен ряд работ ^{/15-19/}. Применение результатов этих работ к нашим данным затруднено тем, что полученные нами угловые распределения включают в себя продукты, образовавшиеся в процессах с разными энергиями возбуждения конечных ядер. Величина же энергии возбуждения, как показано в работе ^{/14/}, существенно влияет на вид угловых распределений.

В наших экспериментах получены систематические данные для значительно более широкого круга прямых реакций, чем в ранее выполненных работах, например ^{/13/}, с результатами которой удовлетворительно согласуются все теоретические подходы.

Мы сделали попытку проанализировать наши данные в рамках модели, развитой В.Струтинским ^{/17,18/}, поскольку она наиболее удобна для анализа. Полученное В.Струтинским в работе ^{/17/} аналитическое выражение для углового распределения опирается на предположения о квазиупругости и краевом характере реакций передач. Оно имеет вид:

$$d\sigma/d\Omega = A \cdot \frac{\theta}{\sin\theta} \left\{ \begin{array}{l} G(\theta, \theta_0, \Delta\ell) \\ E(\theta, \theta_0, \Delta\ell) \end{array} \right. ,$$

где A - величина, не зависящая от θ , а G и E - аналитические функции, полученные в предположении соответственно гауссовой и экспоненциальной зависимости парциальной амплитуды реакций от орбитального момента ℓ . Параметрами в модели В.Струтинского являются $\Delta\ell$ - ширина пакета по орбитальному моменту и θ_0 - угол отклонения для касательной траектории. В последующей работе ^{/18/} В.Струтинский распространил свой подход на случай неупругих процессов. Поскольку математическая форма выражений для угловых распределений в работе ^{/18/} оказалась формально совпадающей с выражениями в работе ^{/17/}, мы проводили анализ угловых распределений с параметрами θ_0 и $\Delta\ell$. Согласно ^{/18/}, при неупругих процессах θ_0 будет соответствовать углу рассеяния для некоторого среднего значения ℓ в выходном канале. Ширина же углового распределения будет определяться не только квантово-механической угловой дисперсией, обусловленной волновой природой частиц, но и динамической угловой дисперсией, вызванной ядерным взаимодействием. В результате параметр $\Delta\ell$, формально получаемый из анализа углового распределения, может быть меньше реальной ширины выходного пакета по ℓ .

При расчете теоретические кривые нормировались к экспериментальным сечениям при $\theta = \theta_0$. Величины θ_0 и $\Delta\theta$ для расчетных кривых на рис. 1 приведены в таблице 1.

С функцией E было получено завышение эффекта на больших углах для всех кривых /см., например, на рис. 1 штрих-пунктирные кривые для магния, кислорода и бериллия/. Результаты расчета с функцией G представлены на рис. 1 пунктиром. Ряд особенностей угловых распределений удается удовлетворительно описать, но имеется большое различие с экспериментом на малых углах для кислорода-магния. В этой области для удовлетворительного описания экспериментальных данных требуется наложение по меньшей мере двух кривых, одна из которых соответствует экспоненциальной, а другая гауссовой зависимости вероятности реакции от θ . Это служит указанием на то, что продукты с $8 \leq Z \leq 12$ могут образовываться как в квазиупругом, так и неупругом процессах, с каждым из которых, как отмечено в /18/, можно связать некие эффективные значения θ_0 и $\Delta\theta$.

3.2. Энергетические спектры

На рис. 2 и 3 представлены энергетические спектры продуктов прямых реакций с $4 \leq Z \leq 12$. Спектры лития не приведены, поскольку из-за малого выхода статистика недостаточна для построения спектров, хотя и позволяет оценить сечения. Из рис. 3 и 4 видно, что форма и положение максимума энергетических спектров зависят от числа переданных нуклонов и угла регистрации. Спектры имеют значительную ширину, достигающую на половине высоты 30-40 Мэв. Из наших измерений при $\theta = 40^\circ$ с разделением изотопов /19/ следует, что уширение спектров за счет наложения эффектов от разных изотопов невелико. В ряде спектров наблюдаются низкоэнергичные части в области энергий ниже выходного кулоновского барьера, рассчитанного для сферических ядер. Контрольные опыты показали, что возможными примесями углерода и кислорода в ториевой мишени весь эффект в области низких энергий объяснить нельзя. Учитывая неясность механизма образования низкоэнергичной части спектров, мы для получения угловых распределений и сечений использовали лишь колоколообразную часть спектров, показанную пунктиром.

На рис. 4 показана разность кинетических энергий конечных продуктов реакций в максимумах энергетических распределений и их кулоновских барьеров в системе центра масс в зависимости от

угла вылета легкого продукта. Кинетические энергии конечных продуктов были получены суммированием исходной кинетической энергии ^{22}Ne в системе центра масс с поправкой на поглощение в половине толщины мишени и величины энергетического баланса реакций Q , рассчитанного по кинематике двухтельного процесса из данных по энергиям легких конечных продуктов. Кулоновские барьеры рассчитывались для сферических ядер с $r_0 = 1,46$ ф. Из рис. 4 видно, что максимальные кинетические энергии продуктов /и, соответственно, минимальные возбуждения в системе ядер/ наблюдаются для углов вблизи резерфордовского при касательном столкновении. На углах, отличных от резерфордовского, даже малонуклонные передачи протекают как глубоко неупругие процессы с сильным возбуждением взаимодействующих ядер. Для всех исследованных продуктов реакций при больших и малых углах регистрации характерно приближение кинетических энергий к величине, равной соответствующему кулоновскому барьеру.

3.3. Полные сечения прямых реакций

Сечения реакций, полученные интегрированием экспериментальных угловых распределений в диапазоне углов $10-80^\circ$ / для неона $30-80^\circ$ /, представлены в таблице 1. Там же даны значения сечений в диапазоне $0-80^\circ$, полученные путем экстраполяции угловых распределений в область малых углов. Сумма сечений образования продуктов прямых реакций с $3 \leq Z \leq 12$ в диапазоне углов $0 \leq \theta \leq 80^\circ$ составляет 800 мбн. С учетом уменьшения сечения прямых реакций с уменьшением энергии 20 величина 800 мбн находится в удовлетворительном согласии со значением 983 ± 120 мбн, полученным для сечения прямых реакций в системе $^{238}\text{U} + ^{20}\text{Ne}$ при энергии ионов 208 Мэв из угловых корреляций осколков деления 21 . В опытах по угловым корреляциям осколков деления случаи, когда с ядром-мишенью сливается более половины иона, трудно отличить от случаев с полным слиянием. Поэтому совпадение суммы сечений прямых реакций, полученной нами без учета прямых α -частиц, протонов и нейтронов, с данными из угловых корреляций осколков деления представляется естественным. Учет вклада продуктов с $Z < 3$ в сечение прямых реакций требует специальных исследований, поскольку каждый из этих продуктов может образовываться в нескольких разных процессах.

Примечание

В настоящей работе кинематические расчеты проведены для двух частиц в выходном канале. Как видно из таблицы 2, сечения продуктов падают от Ne , к Li , поэтому трехтельные процессы с развалом неона, например, на $N + Li$, $C + Be$ не могут дать определяющего вклада в измеряемые продукты. Существенный вклад могут дать лишь процессы с образованием α -частиц, протонов и нейтронов. Испускание их из тяжелого ядра влияет лишь на оценку его энергии возбуждения и практически не сказывается на кинематике легкого продукта. Испускание из легкого ядра ведет к некоторому размытию энергетических спектров и угловых распределений. Полученных нами данных недостаточно для анализа этого эффекта. Но расчеты по кинематике двух частиц и в этом случае позволяют более четко выявить некоторые особенности прямых реакций, в частности, изменение кинетической энергии регистрируемого продукта на разных углах /рис. 4/.

В заключение авторы выражают глубокую признательность академику Г.Н.Флерову за стимулирующий интерес к работе и профессору В.М.Струтинскому за ценные обсуждения.

Литература

1. T.Sikkeland. *Arkiv for Fysik*, 36, No. 62, 1967.
2. A.G.Artukh, G.F.Gridnev, V.L.Mikheev, V.V.Volkov. *Nuc.Phys.*, A137, 348, 1969.
3. A.G.Artukh, V.V.Avdeichikov, G.F.Gridnev, V.L.Mikheev, V.V.Volkov, J.Wilczynski. *Nucl.Phys.*, A176, 284, 1971.
4. Г.Кумпф, Е.Д.Донец. *ЖЭТФ*, 44, 798, 1963.
5. V.V.Volkov. *JINR*, E7-3155, Dubna, 1967.
6. E.Lozyński. *Nucl.Phys.*, 64, 321, 1965.
7. Ю.Ц.Оганесян, Ю.Э.Пенионжкевич, А.О.Шамсутдинов. *ЯФ*, 14, 54, 1971.
8. A.G.Artukh, V.V.Avdeichikov, J.Ero, G.F.Gridnev, V.L.Mikheev, V.V.Volkov, *Nucl. Instr. and Meth.*, 83, 72, 1970.
9. M.W.Sachs, C.Chasman, D.A.Bromley. *Nucl. Instr. and Meth.*, 41, 213, 1966.
10. A.G.Artukh, G.F.Gridnev, V.L.Mikheev, V.V.Volkov, J.Wilczynski. *JINR*, E7-6764, Dubna, 1972.
11. С.А.Карамян, Ю.Ц.Оганесян, Ю.Э.Пенионжкевич, Б.И.Пустыльник. *ОИЯИ*, P7-5884, Дубна, 1971.
12. K.Alder, A.Bohr, T.Huus, B.Mottelson, A.Winter. *Rev.Mod.Phys.*, 28, 432, 1956.
13. R.Kaufman, R.Wolfgang. *Phys.Rev.*, 121, 192, 1961.

14. J.Galin, D.Guerreau, M.Lefort, J.Peter, X.Tarrago. *Nucl.Phys.*, A159, 461, 1970.
15. T.Kammuri. *Prog. Theor. Phys.*, 28, 934, 1962.
16. B.N.Kalinkin, J.Grabowski. *Proc. Third Conf. on Reactions between Complex Nuclei, Asilomar, 1963, Univ. Calif. Press, 1963, p.129.*
17. В.М.Спрутинский. *ЖЭТФ*, 46, 2078, 1964.
18. V.M.Strutinsky. *Nucl.Phys.*, to be published.
19. R. da Silveira. *Communications European Conf. on Nucl. Physics, Aix-en-Provence, (France), 1972.*
20. С.А.Карамян, Ю.Ц.Оганесян, Ю.Э.Пенционжкевич, Б.И.Пустыльник. *ЯФ*, 9, 715, 1969.
21. T.Sikkeland, V.E.Viola. *Proc. Third Conf. on Reactions between Complex Nuclei, Asilomar, 1963, Univ. Calif. Press, 1963, p. 232.*

Рукопись поступила в издательский отдел
28 ноября 1972 года.

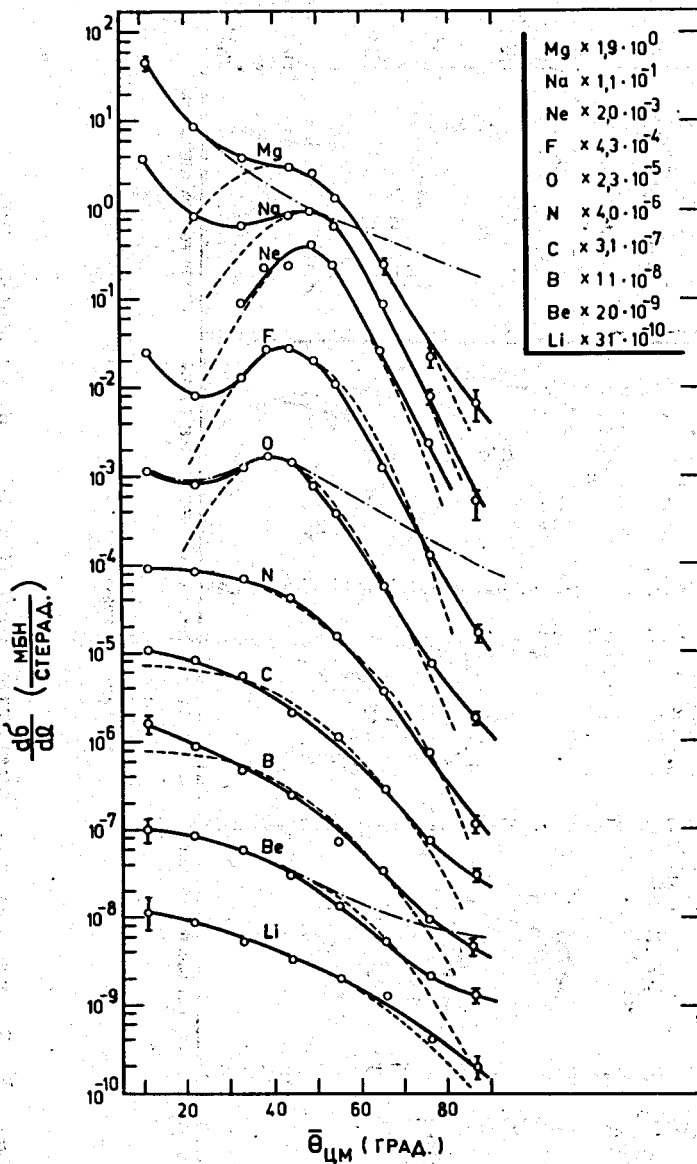


Рис. 1. Угловые распределения продуктов прямых реакций при облучении ^{232}Th ионами ^{22}Ne с энергией 174 Мэв. Сплошные кривые проведены по экспериментальным точкам. Штрих-пунктир и пунктир - результаты расчета по теории В.Струтинского ^[17,18] в предположении соответственно экспоненциальной и гауссовой зависимости парциальной амплитуды реакции от орбитального момента. Параметры расчетных кривых приведены в таблице 1.

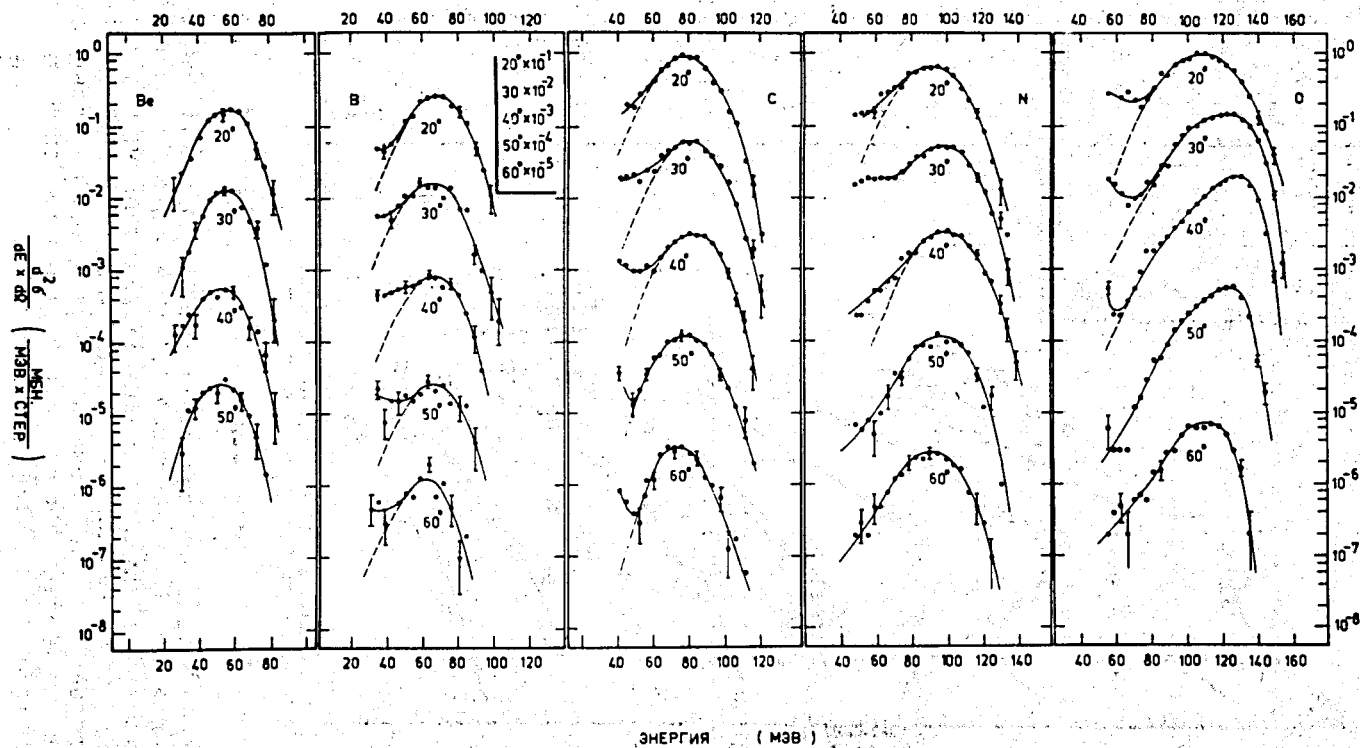


Рис. 2. Энергетические спектры Be, B, C, N, O, полученные при облучении ^{232}Th ионами ^{22}Ne с энергией 174 МэВ.

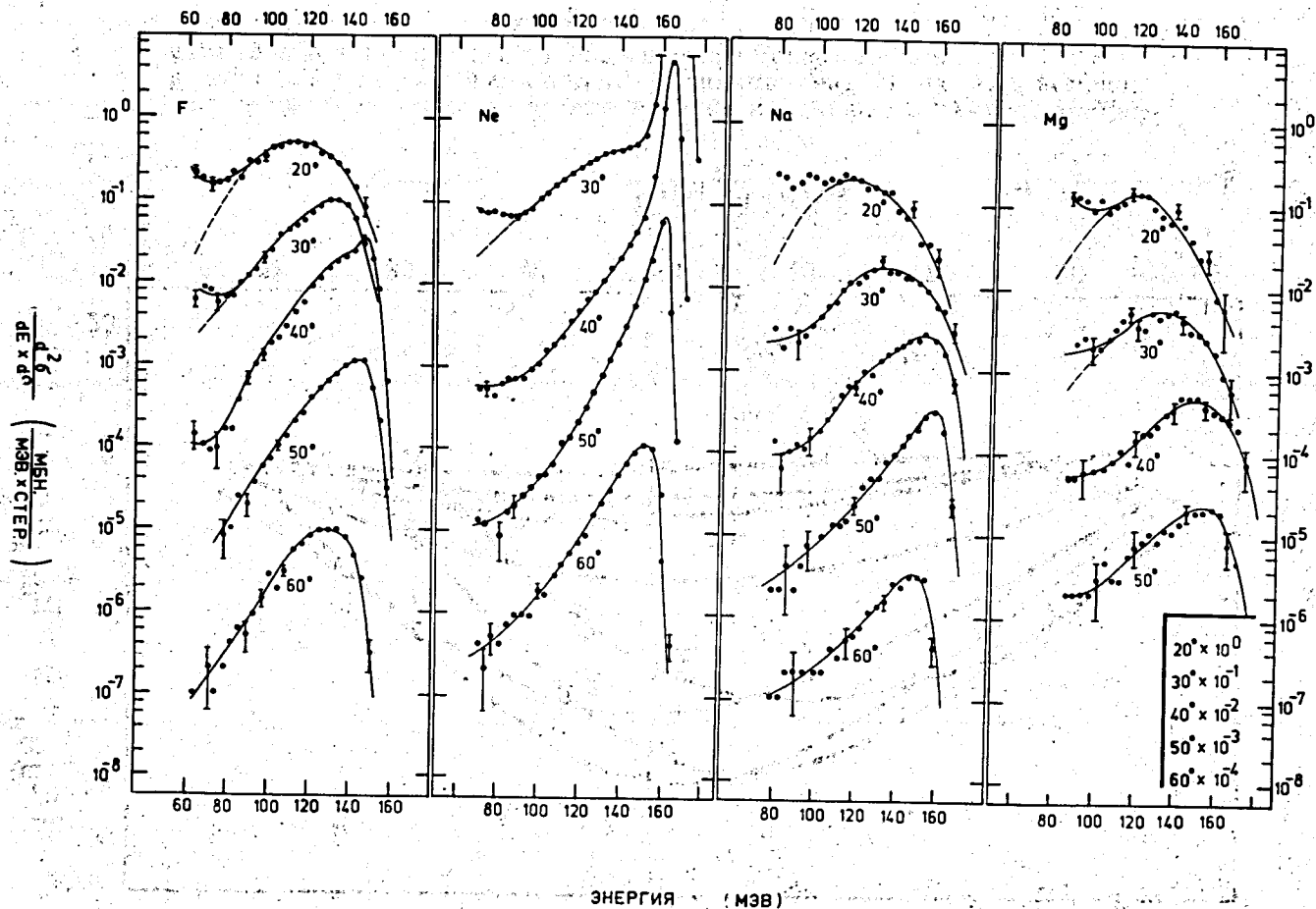


Рис. 3. Энергетические спектры F, Ne, Na, Mg , полученные при облучении ^{232}Th ионами ^{22}Ne с энергией 174 МэВ.

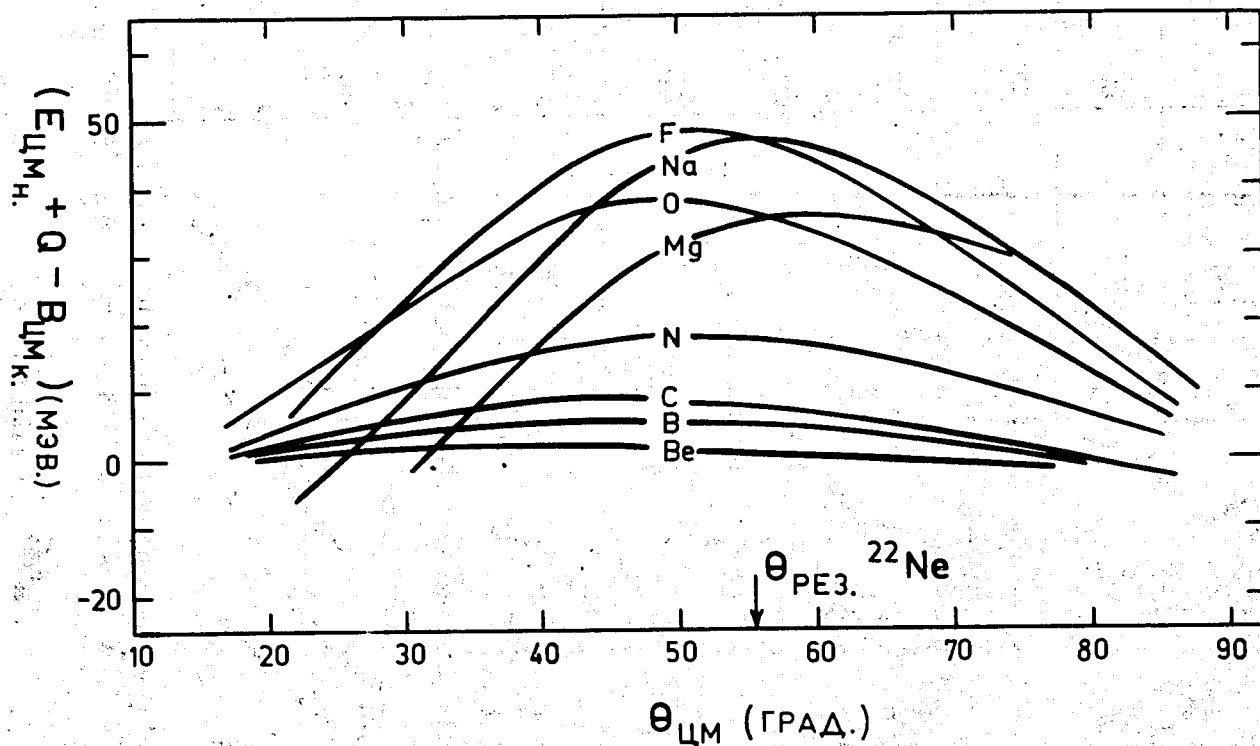


Рис. 4. Разность кинетических энергий конечных продуктов реакций в максимумах энергетических распределений и их кулоновских барьеров в зависимости от угла вылета легкого продукта.

Таблица I

Элемент	Mg	Na	Ne	F	O	N	C	B	Be	Li			
Вариант	E	G	G	G	E	G	G	G	E	G	G		
θ , град.	10	43	46	47	45	42	42	31	31	31	31		
$\Delta l, h$	5,7	5,3	6,2	7,3	6,4	4,1	6,1	3,7	3,7	3,7	2,8	3,3	2,8

15

Таблица II

Элемент	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	Na	Mg	Сумма
σ измер. мбн	4,6	6,9	11	42	40	130	120	260	26	9	~650
σ измер. ⁺ Экстрап. мбн	5,2	7,6	14	48	45	147	145	320	44	21	~800