

521

ЭКЗ. ЧИТ. ЗАЛ



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

---

В.А. Фомичев, Б.А. Гвоздев, В.В. Бредель

P-1521

ОТНОШЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ОБРАЗОВАНИЯ  
ИЗОМЕРНОЙ ПАРЫ  $Sc^{44, 44m}$   
В РЕАКЦИЯХ ПРЯМОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

Дубна 1964

Фомичев В.А., Гвоздев Б.А., Бредель В.В.

Отношение сечений образования изомерной пары  $Sc^{44,44m}$  в реакциях прямого взаимодействия с тяжелыми ионами

Определено изомерное отношение  $Sc^{44}/Sc^{44m}$  в реакциях срыва нейтрона при облучении скандия ионами  $O^{16}$  и  $Ne^{22}$ . Оно составляет  $\sim 1$  и не зависит от энергии.

Показано, что изомерное отношение при многонуклонной передаче ( $3pn$ ) в реакции  $Al^{27} + Ar^{40} \rightarrow Sc^{44,44m}$  достигает величин  $\sim 6,5$ , то есть больше, чем при реакциях полного слияния ядер.

### Препринт Объединенного института ядерных исследований.

Дубна - 1964.

Fomichev V.A., Gvozdev B.A., Bredel V.V.

P-1521

Ratio of Cross Sections for Production of an Isomer Pair in Reactions of Direct Interaction with Heavy Ions.

The isomer ratio  $Sc^{44}/Sc^{44m}$  in the neutron stripping  $_{22}$  reactions when scandium is bombarded with  $O^{16}$  and  $Ne$  ions has been measured. It constitutes  $\sim 1$  and is energy independent.

It is shown that the isomer ratio in the multi-nucleon transfer ( $3pn$ ) in the reaction  $Al^{27} + Ar^{40} \rightarrow Sc^{44,44m}$  amounts to  $\approx 6,5$ , i.e., is greater than in the reactions of a complete nuclear fusion.

Preprint, Joint Institute for Nuclear Research.

Dubna. 1964.

**В.А. Фомичев**, Б.А. Гвоздев, В.В. Бредель

P-1521

ОТНОШЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ОБРАЗОВАНИЯ  
ИЗОМЕРНОЙ ПАРЫ  $Sc^{44, 44m}$   
В РЕАКЦИЯХ ПРЯМОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

Направлено в ЖЭТФ

Дубна 1964

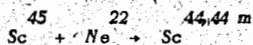
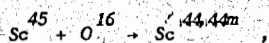
## 1. Введение

Одним из методов изучения влияния углового момента, вносимого в ядро в реакциях с тяжелыми ионами, на механизм этих реакций является исследование энергетической зависимости отношения сечений образования изомерной пары с большой разностью спинов. В предыдущей работе /1/ изучалась энергетическая зависимость сечений образования  $Sc^{44,44m}$  в реакциях с тяжелыми ионами, идущих через образование составного ядра. Опыты показали, что полное слияние ядер происходит только в том случае, когда вносимый угловой момент меньше некоторого критического углового момента  $J_{крит}$ . При касательных соударениях, когда  $J > J_{крит}$ , центробежные силы и кулоновское отталкивание препятствуют полному слиянию ядер, и в этом случае осуществляются реакции с передачей некоторого числа нуклонов между налетающим ионом и ядром-мишенью. Осуществление такого механизма ядерной реакции с тяжелыми ионами подтверждается и недавними теоретическими расчетами /2,3/.

В данной работе исследовалась энергетическая зависимость сечений образования изомерной пары  $Sc^{44,44m}$  в реакциях с тяжелыми ионами, когда не происходит полного слияния ядер.

## 2. Методика эксперимента

Изомерная пара  $Sc^{44,44m}$  получалась в реакциях передачи одного нейтрона:



а также в реакции многонуклонной передачи  $Al^{27} + Ar^{40} \rightarrow Sc^{44,44m}$

В опытах с кислородом облучалась стопка из 8 алюминиевых фольг толщиной 6-8 мк, на которые наносился слой окиси скандия ( $1,1-1,5 \text{ мг/см}^2$ ). В опытах с неоном, слой окиси скандия ( $2,0-2,8 \text{ мг/см}^2$ ) наносился на никелевые фольги толщиной 2-2,5 мк. Предварительно было выяснено, что при взаимодействии неона с никелем скандия в заметных количествах не образуется. В качестве мишеней при облучении аргоном служили стопки алюминиевых фольг толщиной 3-8 мк.

Облучение производилось на внутреннем пучке циклотрона У-300 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Энергия ионов измерялась по поглощению в алюминии и в некоторых случаях с помощью полупроводниковых детекторов /4/.

После облучения производилось химическое выделение скандия. Мишени растворялись в смеси соляной и азотной кислот в присутствии носителей элементов, образующихся в результате ядерных реакций. При растворении алюминиевых мишеней, облученных ионами аргона, добавлялось также определенное количество скандия. Затем производилось осаждение гидроокисей едкой щелочью (для отделения от алюминия) или аммиаком (для отделения от никеля). Повторное осаждение гидроокисей производилось пиридином. Путем обработки осадка карбонатом аммония скандий переводился в раствор и выделялся в виде фосфата. Выход скандия определялся по весу.

Гамма-излучение образцов измерялось на спинтillationном спектрометре со стокальным анализатором АИ-100. Запись спектра производилась на ленту самописца. Площадь пиков  $\gamma$ -линий измерялась планиметром.

Наряду со  $Sc^{44}$  наблюдались и другие изотопы скандия:  $Sc^{43}$   $E_{\gamma} = 511$  кэв,  $T = 3,9$  час,  $Sc^{46}$   $E_{\gamma} = 1120$  кэв,  $T = 84,1$  дня,  $Sc^{47}$   $E_{\gamma} = 160$  кэв,  $T = 3,4$  дня. Переход  $Sc^{44m}$  в основное состояние происходит с  $E_{\gamma} = 270$  кэв,  $T = 59$  час, а  $Sc^{44}$  в основном распадается с  $E_{\gamma} = 1160$  кэв,  $T = 3,9$  час<sup>15/</sup>.

Экспериментальные данные по изменению интенсивности  $\gamma$ -линий анализировались на электронно-счетной машине по методу наименьших квадратов в соответствии с зависимостью:

$$J = A_1 e^{-\lambda_1 t} + A_2 e^{-\lambda_2 t} + A_3 e^{-\lambda_3 t} \quad \text{для } E_{\gamma} = 1160 \text{ кэв,}$$

$$J = A_1 e^{-\lambda_1 t} + A_2 e^{-\lambda_2 t} \quad \text{для } E_{\gamma} = 511 \text{ кэв,}$$

где:  $\lambda_1 = 0,01175$  1/час - вероятность распада  $Sc^{44m}$ ,  $\lambda_2 = 0,178$  1/час - вероятность распада  $Sc^{44}$  и  $Sc^{43}$ ,  $\lambda_3 = 0,000343$  2/час - вероятность распада  $Sc^{46}$  ( $\gamma$ -линии 1160 кэв и 1120 кэв на спектрометре не разрешались),  $t$  - время после конца облучения.

Изомерное отношение, а также относительное сечение образования изотопов  $Sc^{43}$ ,  $Sc^{44}$  и  $Sc^{44m}$  определялось, как в работе<sup>11/</sup>, а  $Sc^{46}$  и  $Sc^{47}$  - по соответствующим  $\gamma$ -пикам с учетом эффективности  $\gamma$ -спектрометра.

Опыт по снятию углового распределения скандия - 44 и - 44 м в реакции  $Al^{27} + Ar^{40} + Sc^{44,44m}$  производился на специальной приставке к пробнику. Расстояние от мишени ( $Al$  0,8 мг/см<sup>2</sup>) до сборника составило 80 мм.

### 3. Результаты и обсуждения

а) реакции передачи одного нейтрона

Зависимость изомерного отношения  $Sc^{44,44m}$  от энергии налетающих ионов в реакциях  $Sc^{45} + O^{16}$  и  $Sc^{45} + Ne^{22}$  представлена на рис. 1 и 2, а зависимость относи-

тельного сечения образования изотопов скандия с массовыми числами 43, 44, 44m, 46 и 47, получаемых в реакции  $Sc^{45} + Ne^{22}$ , — на рис. 3. Обращает на себя внимание, что изомерное отношение при вырывании одного нейтрона из  $Sc^{45}$  не зависит от энергии налетающих ионов и равно  $\sim 1$ , причем для ионов  $Ne^{22}$  оно несколько больше, чем для ионов  $O^{16}$ .

Такое значение величины изомерного отношения, по-видимому, свидетельствует о том, что в реакции передачи одного нейтрона возбуждаются состояния с небольшим спином. Рассчитать среднюю величину спина этих возбуждений с применением метода каскадной статистики<sup>16)</sup> не представляется возможным, поскольку число переходов мало, а спины уровней ядер  $Sc^{44}$ , лежащих над изомерным состоянием, неизвестны.

#### б) реакции многоуклонной передачи

Реакция многоуклонной передачи с образованием  $Sc^{44,44m}$  осуществлялась путем облучения стопки алюминиевых фольг ионами  $Ar^{40}$  с энергией 270 Мэв. Подхватывая из ядер  $Al^{27}$  три протона и один нейтрон, аргон превращался в скандий. Относительный выход изотопов скандия с массовыми числами 43, 44, 44m, 46 и 47 на различной глубине стопки фольг показан на рис. 4.

Чтобы проверить, не является ли наличие скандия в первых фольгах стопки результатом того, что в пучке ионов аргона имеется низкоэнергетическая составляющая, был проделан фоновый опыт. Стопка из 11 алюминиевых фольг толщиной по 8,5 мк облучалась пучком аргона с энергией 256 Мэв. Исследовалось распределение  $\gamma$ -активности с энергией 1300 кэв по глубине стопки. Указанная активность распалась с периодами  $T = 14,9$  час, что соответствовало образованию  $Na^{24}$ , и  $T = 1,82$  час, что соответствовало образованию  $Ar^{41}$  x). Кривые распределения активности приведены на рис. 5. На том же рисунке указан пробег ионов  $Ar^{40}$  с энергией  $256 \pm 10$  Мэв. Распределение активности  $Ar^{41}$  показывает, что в пучке ионов аргона не имелось низкоэнергетической составляющей со сколько-нибудь значительной интенсивностью.

Интересно распределение ядер  $Na^{24}$ . Эти ядра образуются как за счет срыва двух протонов и одного нейтрона с ядер  $Al^{27}$  (ядра с меньшим пробегом), так и за счет срыва 7 протонов и 9 нейтронов с ионов  $Ar^{40}$  (ядра с большим пробегом).

Распределение изомерного отношения  $Sc^{44m} / Sc^{44}$  по стопке алюминиевых фольг при облучении аргоном с энергией 270 Мэв показано на рис. 6. Обращает на себя внимание большое значение изомерного отношения, достигающее величины  $\sim 8,5$ . В работе<sup>11)</sup> нами было показано, что в реакциях полного слияния ядер максимальное значение изомерного отношения  $Sc^{44m} / Sc^{44}$  равно  $\sim 5$ .

x) Кроме того, присутствовала неидентифицированная активность с периодом  $T = 11$  дней.

С помощью каскадной статистики можно показать, что в реакциях многонуклонной передачи изомерное отношение может быть больше, чем в реакциях полного слияния, хотя в первом случае ядру скандия передается меньший угловой момент. В реакциях полного слияния образуются ядра скандия со спинами от 0 до некоторого значения  $J$ , где  $J \leq J_{\text{крит}}$ . При расчете изомерного отношения по каскадной статистике необходимо произвести усреднение по каскадам  $\gamma$ -лучей, испускаемых ядрами с исходными спинами от 0 до  $J$ . При этом необходимо учитывать относительную вероятность, с которой в реакции образуются ядра с данным угловым моментом  $1/\text{см.л.}$ . За счет вклада каскадов с малым исходным спином усредненное изомерное отношение в реакциях полного слияния получается относительно небольшим.

В случае реакции многонуклонной передачи возможны только краевые соударения. Поэтому при расчете изомерного отношения необходимо учитывать только каскады с исходными спинами, соответствующие краевым соударениям. Изомерное отношение может быть в этом случае сравнительно большим даже при небольшой величине углового момента.

Для оценки величины изомерного отношения в случае реакции  $Al^{27} + Ar^{40} \rightarrow Sc^{44,44m}$  при энергии ионов аргона 270 Мэв рассмотрим покоящееся ядро  $Ar^{40}$ , в край которого ударяются три протона и один нейтрон с энергией  $E_{\text{лаб.}} = 27$  Мэв. В составное ядро  $Sc^{44}$  при этом будет внесен угловой момент 10. По  $\gamma$ -каскаду с исходным спином  $J = 10 \hbar$  при среднем числе  $\gamma$ -переходов  $N_{\gamma} = J + 3 = 13$  получаем для изомерной пары скандия  $\sigma_u/\sigma_o = 7,3$  (параметр обрезания по спинам  $\sigma$  взят равным 4). В расчетах учитывались новые значения спинов (2 для основного состояния и 6 - для изомерного), полученные в работе <sup>17/</sup>.

Согласно приведенной трактовке, максимуму кривой изомерного отношения при  $d = 9,5 \text{ мг/см}^2 Al$  на рис. 8 должны соответствовать реакции передачи трех протонов и одного нейтрона, происходящие в первой фольге стопки. Когда реакции указанного типа происходят на большей глубине стопки алюминиевых фольг, сумма пробега аргона до реакции и скандия после реакции больше  $9,5 \text{ мг/см}^2 Al$ . Изомерное отношение при этом меньше чем в максимуме из-за уменьшения энергии ионов аргона. Это качественно может объяснить спад кривой изомерного отношения на большей глубине стопки фольг.

Спад кривой изомерного отношения в сторону меньших толщин стопки фольг можно попытаться объяснить тем, что осуществляются реакции и между  $Ar^{40}$  и  $Al^{27}$  с меньшим параметром соударения, чем в рассмотренном ранее случае. При этом аргон может захватить у алюминия более трех протонов и одного нейтрона и затем испарить излишек нуклонов. Ионы аргона теряют тогда больше энергии, чем в случае отрыва четырех нуклонов, и их пробег в  $Al$  окажется меньшим. Кроме того, разброс

пробегов образовавшихся таким образом ядер скандия будет увеличен за счет испарения нуклонов. Все это приводит к тому, что значительное количество ядер скандия остается в первых фольгах стопки.

Приведенное качественное объяснение согласуется также с угловым распределением изомерного отношения, показанным на рис. 7. Ионы  $Ar^{40}$ , подхватывающие три протона и один нейтрон, взаимодействуют сравнительно слабо с ядрами  $Al^{27}$  и летят преимущественно вперед. Этому типу реакций соответствуют большие значения изомерного отношения. Поэтому изомерное отношение под малым углом велико. При более тесном взаимодействии отклонение ядер скандия от направления движения ионов аргона может быть большим, а изомерное отношение - меньшим.

Авторы выражают глубокую благодарность Г.Н. Флерову, С.М. Поликанову и Е.Д. Донцу за обсуждение работы, А.Н. Филипсону и членам руководимой им группы за обеспечение надежной работы циклотрона во время облучений.

#### Л и т е р а т у р а

1. В.В. Бредель, Б.А. Гвоздев, В.А. Фомичев. ЖЭТФ, 45, 904 (1963).
2. Б.Н. Калинин, И.Ж. Петков. Препринт ОИЯИ Р-1347, Дубна, 1963.
3. S.Cohen, F.Plasil, W.J.Swiatecki. Preprint UCSL-10775, Berkeley, 1963.
4. Х.Кекк, В.Л. Михеев, А.А. Плева, Б.В. Фефилов. ПТЭ, № 4, 27, 1963.
5. Б.С. Джелепов, Л.К. Пеккер. Схемы распада радиоактивных ядер, стр. 91. Изд. АН СССР, М.-Л., 1958.
6. J.R.Huizenga, R.Vandenbosh. Phys. Rev., 120, 1305 (1960).  
R.Wandenbosh, J.R.Huizenga. Phys. Rev., 120, 1313 (1960).
7. D.L.Harris, J.D.Cullen. Phys. Rev., 120, 1313 (1960).

Рукопись поступила в издательский отдел  
13 января 1964 г.



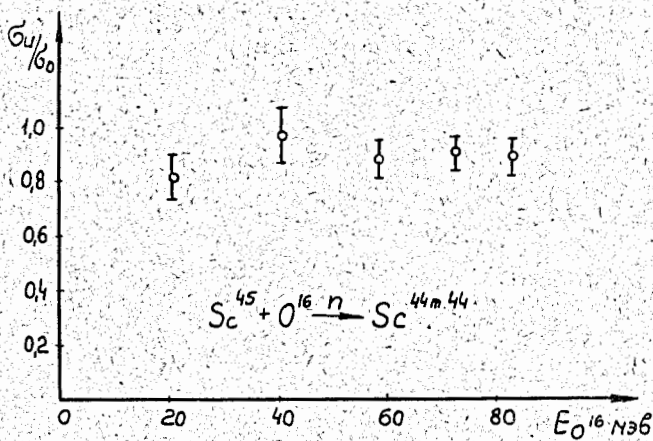


Рис. 1. Энергетическая зависимость изомерного отношения  $Sc^{44m}/Sc^{44}$  в реакции с ионами  $O^{16}$ .

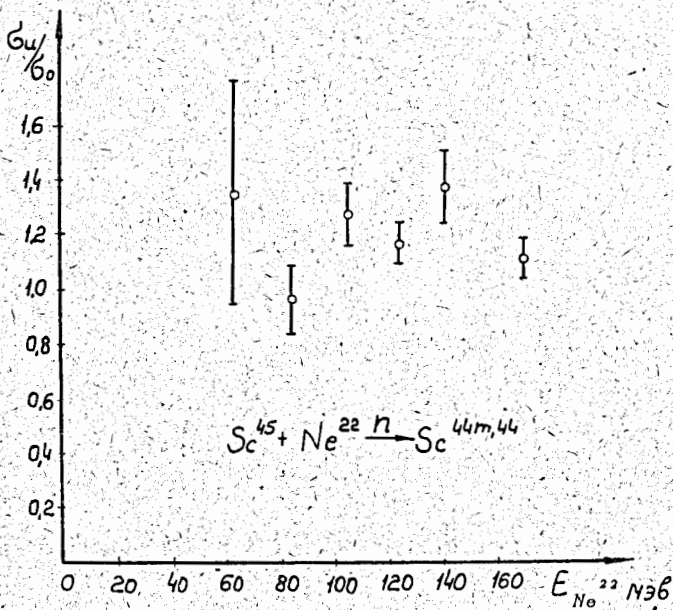


Рис. 2. Энергетическая зависимость изомерного отношения  $Sc^{44m}/Sc^{44}$  в реакции с ионами  $Ne^{22}$ .

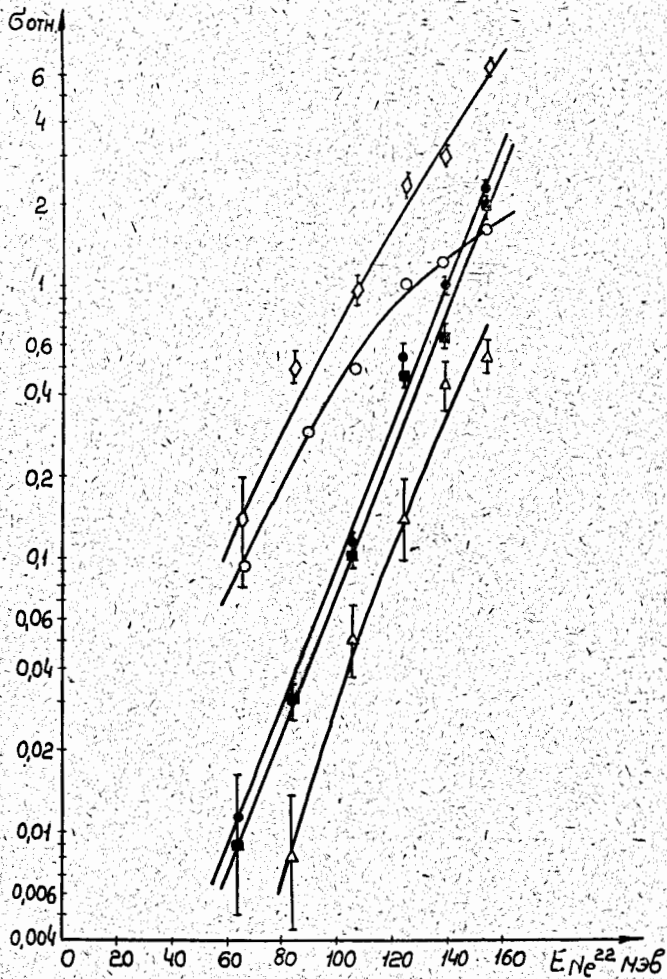


Рис. 3. Зависимость от энергии относительного сечения образования изотопов скандия в реакциях передачи нейтронов при облучении  $Sc^{45}$  ионами  $Ne^{22}$ .

$\bullet$  -  $Sc^{44m}$  (-n),       $\blacksquare$  -  $Sc^{44}$  (-n),  
 $\triangle$  -  $Sc^{43}$  (-2n),       $\diamond$  -  $Sc^{46}$  (+n),       $\circ$  -  $Sc^{47}$  (+2n).

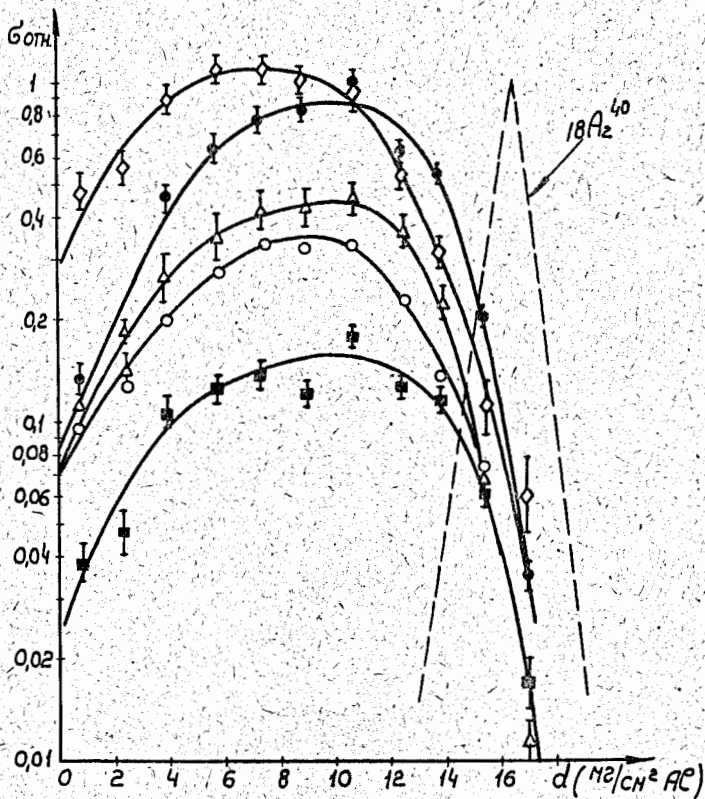


Рис. 4. Относительный выход изотопов скандия в реакции  $Al^{27} + Ar^{40}$  на различной глубине ступки алюминиевых фольг:

- - Sc<sup>44m</sup> (+3p),                      ■ - Sc<sup>44</sup> (+3p),
- △ - Sc<sup>43</sup> (+3p),                      ◇ - Sc<sup>46</sup> (+3p,3n),      ○ - Sc<sup>47</sup> (+3p,4n).

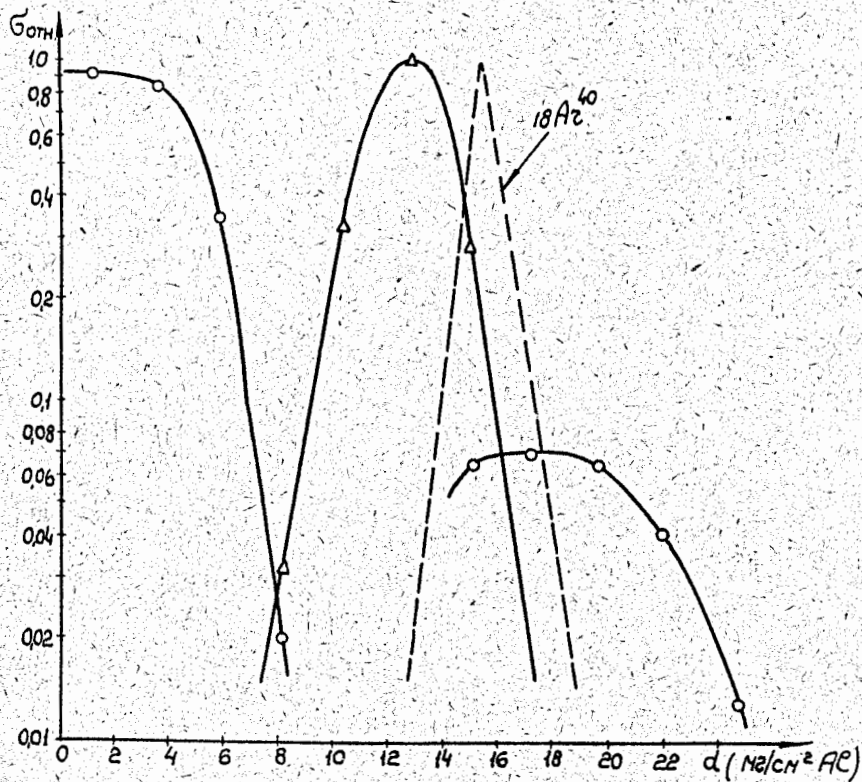


Рис. 5. Относительный выход  $^{24}\text{Na}$  (○) и  $^{41}\text{Ar}$  (△) в реакции  $\text{Al}^{27} + \text{Ar}^{40}$  на различной глубине стонки алюминиевых фольг.

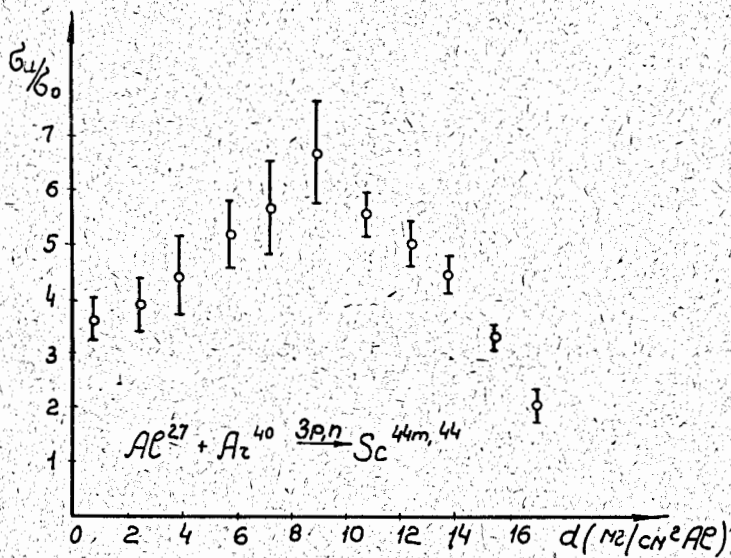


Рис. 6. Распределение изомерного отношения  $Sc^{44m}/Sc^{44}$  в реакции  $Al^{27} + Ar^{40}$  по стопке алюминиевых фольг.

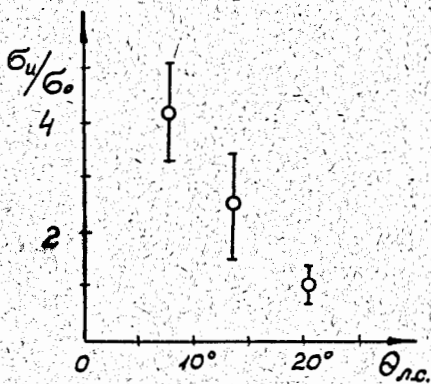


Рис. 7. Угловая зависимость изомерного отношения  $Sc^{44m}/Sc^{44}$  в реакции  $Al^{27} + Ar^{40}$ ,  $E_{Ar} = 270$  Мэв.