

1244

11
587



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

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

P-1277

ОТНОШЕНИЕ СЕЧЕНИЙ
ОБРАЗОВАНИЯ ИЗОМЕРНОЙ ПАРЫ Sc^{44}
В РЕАКЦИЯХ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ
жэТФ, 1963, т45, №4, с. 904-909.

P-1277

Бредель В.В., Гвоздев Б.А., Фомичев В.А. Отношение сечений образования изомерной пары Sc^{44} в реакциях с тяжелыми ионами

Измерена энергетическая зависимость отношений сечений образования изомерной пары $Sc^{43,44m}$ в реакциях $Al^{27}(Ne^{20}, 2pn)$, $Al^{27}(Ne^{22}, an+2p3n)$ $S^{32}(O^{16}, 3pn)$.

Функции возбуждения реакций, приводящих к образованию Sc^{44m} и Sc^{44} , а также Sc^{43} и Sc^{46} , имеют вид, характерный для реакций, проходящих через составное ядро. На основании энергетической зависимости изомерного отношения делается вывод, что изотопы скандия образуются в реакциях с параметрами столкновения, соответствующими угловым моментам, меньшим $J_{crit.} = 25 \hbar$.

**Препринт Объединенного института ядерных исследований.
Дубна. 1963.**

P-1277

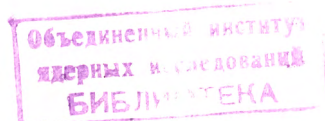
Bredel V.V., Gvozdev B.A., Fomichev V.A.

Ratio of Cross Sections for Production of an Sc^{44} Isomer Pair in Reactions Involving Heavy Ions

The energy dependence of the ratios for the production of an $Sc^{44,44m}$ isomer pair in the reactions $Al^{27}(Ne^{20}, 2pn)$, $Al^{27}(Ne^{22}, an+2p3n)$ $S^{32}(O^{16}, 3pn)$ has been measured. The excitation functions of the reactions leading to the production of Sc^{44m} and Sc^{43} , as well as Sc^{43} and Sc^{46} have the shape characteristic of the reactions occurring via the compound nucleus. According to the energy dependence of the isomer ratio a conclusion is drawn that the scandium isotopes are produced in the reactions which have the collision parameters corresponding to the angular momenta less than $J_{crit.} = 25 \hbar$.

**Preprint Joint Institute for Nuclear Research.
Dubna. 1963.**

Дубна 1963



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

P-1277

1939/2 48.

ОТНОШЕНИЕ СЕЧЕНИЙ
ОБРАЗОВАНИЯ ИЗОМЕРНОЙ ПАРЫ Sc^{44}
В РЕАКЦИЯХ С ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

Дубна 1963

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

1. Введение

Исследование энергетической зависимости отношения сечений образования изомерной пары с большой разностью спинов является перспективным методом изучения механизма ядерных реакций. Величина этого отношения должна существенно зависеть от углового момента, вносимого налетающей частицей в ядро. Угловой момент, в свою очередь, определяется энергией и массой налетающей частицы и механизмом ядерной реакции.

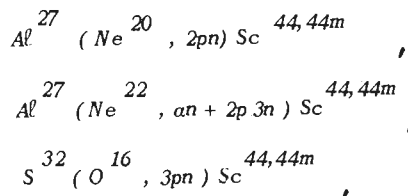
В случае реакций, идущих через образование составного ядра, вносимый угловой момент растет с увеличением энергии налетающей частицы, что должно приводить к росту изомерного отношения, т.е. отношения сечения образования изомера с большим спином к сечению образования изомера с меньшим спином. При прямых ядерных взаимодействиях в ядро вносится меньший угловой момент при той же энергии налетающих частиц. В этом случае следует ожидать меньшей величины изомерного отношения.

В реакциях с тяжелыми ионами, согласно теоретическим оценкам, в ядро может быть внесен значительный угловой момент в несколько десятков единиц \hbar . Столь большой угловой момент должен оказывать существенное влияние на механизм ядерных реакций с тяжелыми ионами.

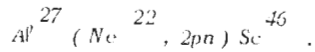
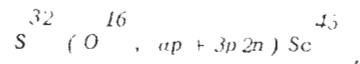
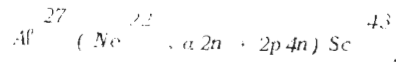
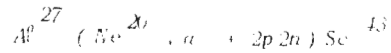
Нами изучалось изомерное отношение $\sigma(\text{Sc}^{44m})/\sigma(\text{Sc}^{44})$ в реакциях с тяжелыми ионами. Изомерная пара $\text{Sc}^{44,44m}$ является удобной для проведения эксперимента, и соответствующее изомерное отношение неоднократно исследовалось в реакциях с легкими частицами /1-4/ и низкоэнергетичными тяжелыми ионами /5-7/. В реакциях с легкими частицами во всех случаях наблюдается первоначальный рост изомерного отношения с энергией налетающих частиц, который интерпретируется как следствие образования составного ядра. При больших энергиях наблюдается спад изомерного отношения, что указывает на возрастающую роль механизма прямого выбивания нуклонов при этих энергиях. В реакциях с ионами азота с максимальной энергией 28 МэВ наблюдался рост изомерного отношения с увеличением энергии.

2. Методика эксперимента

Изотопы скандия получались в реакциях:



а также



В опытах с неоном облучались стонки из 6-12 алюминиевых фольг толщиной от 3 до 9 мк. В опытах с кислородом облучались стонки алюминиевых фольг толщиной 6 мк, на которые было нанесено 0,6-0,7 мг/см² серы.

Облучение производилось на внутреннем пучке циклотрона У-300 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Ток ионов в разных опытах составлял от 0,1 мка до 2 мка, энергия ионов - от 40 Мэв до 175 Мэв, время облучения - от 15 мин. до 2 час.

В большинстве случаев после облучения производилось химическое выделение скандия. Облученные мишени растворялись в смеси соляной и азотной кислот в присутствии носителей скандия и других элементов, образующихся в результате ядерных реакций. Едкой щелочью осаждались гидроокиси, и путем обработки осадка карбонатом аммония скандий переводился в раствор. Из раствора скандий выделялся в виде фосфата. Выход скандия определялся весовым методом.

Гамма-излучение образцов измерялось на сцинтилляционном спектрометре со стокальным амплитудным анализатором АИ-100. Информация с анализатора автоматически списывалась на ленту самописца. Площадь пиков γ -линий измерялась планиметром.

Схема распада изомерной пары $Sc^{44,44m}$ представлена на рис. 1^{/8/}. Как следует из схемы, распад изомерного и основного состояний проходит в основном через уровень 1160 Кэв ядра Ca^{44} . По изменению интенсивности этой γ -линии со временем можно определить изомерное отношение, не вводя дополнительных поправок на эффективность счетной установки к γ -лучам разной энергии.

Кривые изменения интенсивности со временем γ -линии с $E_{\gamma} = 1160$ Кэв и аннигиляционной линии с $E_{\gamma} = 510$ Кэв во всех опытах хорошо соответствовали зависимости

$$J = A_1 e^{-\lambda_1 t} + A_2 e^{-\lambda_2 t},$$

где

$$\lambda_1 = 0,01175 \text{ 1/час} - \text{вероятность распада } Sc^{44m},$$

$$\lambda_2 = 0,178 \text{ 1/час} - \text{вероятность распада } Sc^{44} \text{ и } Sc^{43},$$

$$t \dots \text{ время после конца облучения.}$$

Путем аппроксимации экспериментальных точек данной функцией по методу наименьших квадратов на электронно-счетной машине М-20 находились предэкспоненциальные множители A_1^{1160} ; A_2^{1160} , A_1^{510} , A_2^{510} .

Изомерное отношение определялось по формуле:

$$\frac{\sigma_{22}}{\sigma_{21}} = \frac{\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2} \frac{1 - e^{-\lambda_2 t_1}}{1 - e^{-\lambda_1 t_1}}}{\frac{A_2^{1160}}{A_1^{1160}} + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{1 - e^{-\lambda_2 t_1}}{1 - e^{-\lambda_1 t_1}}}$$

где t_1 - время облучения.

По значениям A_1^{510} строилась функция возбуждения реакции, приводящей к Sc^{44m} .

Соответствующие функции возбуждения для Sc^{44} и Sc^{43} строились по значениям A_1^{510} с учетом изомерных отношений - для Sc^{44} и согласно

$$\left(A_2^{510} - \frac{A_2^{1160}}{A_1^{1160}} A_1^{510} \right) \frac{1 - e^{-\lambda_1 t_1}}{1 - e^{-\lambda_2 t_1}} \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

для Sc^{43} . Функция возбуждения для Sc^{46} определялась по γ -линии 890 Кэв с учетом эффективности γ -спектрометра.

Функции возбуждения исправлялись на пробег ядер отдачи. Были проведены специальные опыты по определению зависимости пробега ядер отдачи в реакции

$S(O^{16}, 3pn) Sc^{44m}$ от энергии. В этих опытах мишень представляла собою 4 слоя серы толщиной 0,6-0,7 мг/см², между которыми в качестве поглотителей располагалось по 5 алюминиевых фольг толщиной 0,6-0,9 мг/см². По распределению активности Sc^{44m} в поглотителях были определены средние пробеги ядер отдачи Sc^{44m} в алюминии до $E_{я.о.} = 30$ Мэв /рис. 2/. Зависимость пробег-энергия оказалась линейной в этой области энергий. Пробег ядер скандия в алюминии при энергиях до 70 Мэв определялся линейной экстраполяцией.

Необходимо отметить, что измеренные пробеги в ~ 6 раз меньше рассчитанных по формуле Бора^{/9/} и в 3 раза меньше пробегов, вытекающих из^{/3/}. Причина расхождения с^{/3/} не ясна.

3. Результаты и обсуждение

Функции возбуждения для реакций $Al^{27} + Ne^{20}$, $Al^{27} + Ne^{22}$ и $S^{32} + O^{16}$ представлены на рис. 4-5. Все они имеют вид, характерный для реакций, идущих через составное ядро. В тех случаях, когда, кроме испарения свободных нуклонов, возможны реакции $\alpha + xp$ /, / $\alpha + xpr$ /, функция возбуждения имеет два максимума. Обращает на себя внимание тот факт, что Sc^{43} получается в реакциях $Al^{27} + Ne^{22}$ и $S^{32} + O^{16}$ в основном за счет испарения α -частицы и двух нейтронов или протона.

Абсолютные значения сечений реакций не определялись. Однако, по грубым оценкам, они составляют несколько десятков миллибарн в максимуме кривых возбуждения Sc^{44m} .

Зависимости изомерных отношений для $Sc^{44, 44m}$ от энергии возбуждения для разных реакций представлены на рис. 6. Прекращение роста изомерного отношения с увеличением энергии при $E^* \approx 55$ Мэв трудно объяснить процессами прямого выбивания нуклонов

как в реакциях с легкими частицами. Вид функций возбуждения указывает на то, что и при энергиях возбуждения, больших 55 Мэв, образование изомерной пары скандия идет через составное ядро.

Зависимость изомерного отношения от энергии можно объяснить, предполагая, что образование изомерной пары скандия проходит через составное ядро с угловым моментом, не превышающим $J_{\text{крит}}$. Прекращение роста изомерного отношения при энергии ≈ 55 Мэв указывает на то, что значение $J_{\text{крит}}$ составляет $\approx 25 \hbar$. Наличие критического углового момента должно привести к уменьшению сечения образования изотопов скандия. Это согласуется с малым значением абсолютного сечения, вытекающим из наших оценок. Гипотеза существования критического значения углового момента также согласуется с результатами опытов Андерсона и др.^{/10/}. Авторы показали, что в реакции $Al^{27} + O^{16}$ при энергии 160 Мэв большая часть полного сечения /0,5 - 1 барн/ приходится на реакции, приводящие к образованию тяжелых фрагментов / F , O , N , C/.

Была сделана попытка рассчитать энергетический ход изомерного отношения, используя каскадную статистику, предложенную в работе^{/11/}, модифицированную применительно к нашим реакциям. Хотя получено хорошее согласие с экспериментальными данными /см. сплошные кривые рис. 6/, не следует переоценивать это совпадение, т.к. пришлось сделать некоторые нестрого обоснованные предложения /в частности, о мультипольности и о числе испускаемых γ -квантов/.

Расчеты для реакции $Al^{27} + Ne^{20}$ в основном сводились к следующим пунктам:

1. По каскадной статистике на электронно-счетной машине М-20 были рассчитаны каскады γ -переходов. Переходы предполагались дипольными, параметр σ был выбран равным 4. В отличие от^{/11/} учитывался запрет переходов между состояниями со спином 0.

2. Распределение весов спинов составного ядра в сечении его образования бралось пропорциональным спину до J_{max} , где J_{max} определялось по полуклассической формуле.

3. Число γ -переходов в каскаде было взято равным $J + 3$.

4. Строилась зависимость изомерного отношения от максимального спина, вносимого в составное ядро /рис. 7/.

5. Значение $J_{\text{крит}}$ выбиралось равным $25 \hbar$.

6. Вычислялся средний угловой момент ℓ , уносимый тремя испаряющимися нуклонами при данной энергии возбуждения.

7. По разности $J_{\text{max}} - \ell$ находилось соответствующее изомерное отношение по кривой рис. 7.

Спад кривой изомерного отношения обусловлен тем, что при больших энергиях возбуждения испаряющиеся нуклоны уносят из составного ядра больший угловой момент. Согласие с экспериментальными данными в области энергий возбуждения 30-40 Мэв может быть улучшено при введении поправки на проникновение сквозь кулоновский барьер.

Аналогичные вычисления производились и для реакции $Al^{27} + Ne^{22}$ с $J_{\text{крит}} = 26 \hbar$.

При малых энергиях возбуждения учитывалось испарение α -частицы и нейтрона, при больших - испарение двух протонов и трех нейтронов. В области энергий 70-80 Мэв расчетные значения нужно усреднить с учетом весов перекрывающихся функций возбуждения реакций $/ \alpha n /$ и $/ 2p3n /$.

Для изомерных отношений в реакции $S^{32} + O^{16}$ вычислений не производилось. Небольшой подъем изомерного отношения при больших энергиях возбуждения, видимо, связан с реакцией $/ \alpha pn /$ на 4% примеси изотопа S .

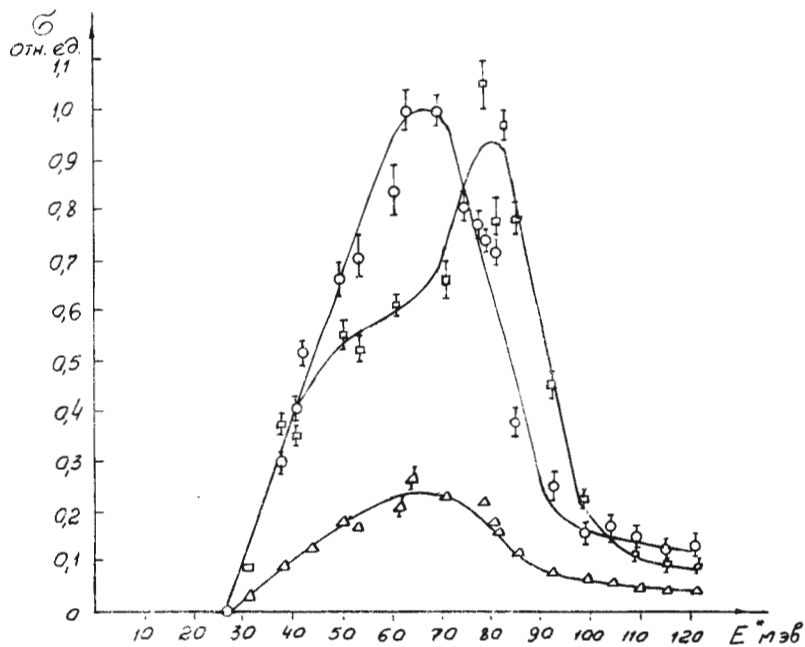
Из наших опытных данных трудно сделать какие-либо заключения относительно причины возникновения критического значения углового момента при образовании составного ядра. Можно предположить, что осуществляется механизм касательных соударений, предложенный Кауфманом и Вольфгангом, когда центробежные силы при больших параметрах соударения препятствуют полному слиянию ядер^{/12/}.

Авторы выражают глубокую благодарность Г.Н. Флерову и В.В. Волкову за многократное обсуждение работы, А.Н. Филипсону и членам руководимой им группы за обеспечение надежной работы циклотрона во время облучений, Н.Ю. Шириковой и И.И. Шелонцеву за расчеты на электронной счетной машине, А.Г. Шавве за помощь при химических выделениях и З.Д. Покровской за помощь в обработке спектров.

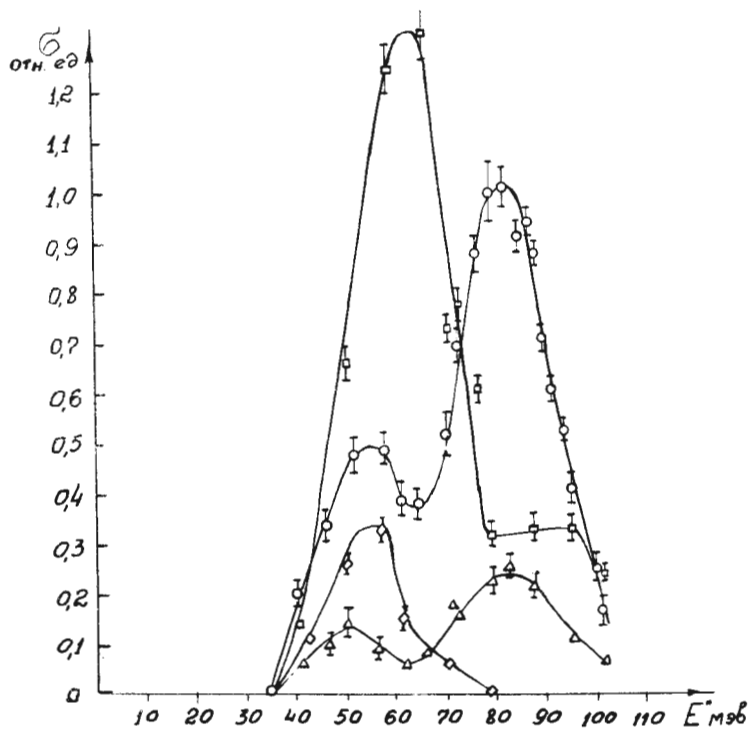
Л и т е р а т у р а

1. J.W.Meadows, R.M.Diamond and R.A.Sharp. Phys. Rev. 102, 190 (1956).
2. R.J.Prestwood and B.P.Bayhurst. Phys. Rev. 121, 1438 (1961).
3. T.Matsuo and T.T.Sugihara. Can Journ. Chem 39, 697 (1961).
4. S.Bailey. Phys. Rev. 123, 579 (1961).
5. D.E.Fisher, A.Zucker and A.Gropp. Phys. Rev. 113, 542 (1959).
6. M.E.Wetzen, K.S.Toth. Journ. Inorg. Nucl. Chem. /в печати/.
7. E.Newman and K.S.Toth. Phys. Rev. 129, 802 (1963).
8. Б.С. Джелепов и Л.К. Пекер. Схемы распада радиоактивных ядер. Стр. 91. Изд. АН СССР, М.Л., 1958.
9. Н. Бор. Прохождение атомных частиц через вещество. Стр. 98. Изд. "Иностранлитер." Москва, 1950.
10. С.Е.Anderson, W.J.Knox, A.R.Quinton, G.R.Bach. Phys. Rev. Lett. 3, 557 (1959).
11. J.R.Huizenga and R.Vandenbosch. Phys. Rev. 120, 1305 (1960).
R.Vandenbosch and J.R.Huizenga. Phys. Rev. 120, 1313 (1960).
12. R.Kaufmann, R.Wolfgang. Reactions between Complex Nuclei. Proceedings of the Second Conference on Reactions between Complex Nuclei, May 1960, Gatlinburg. p. 30.

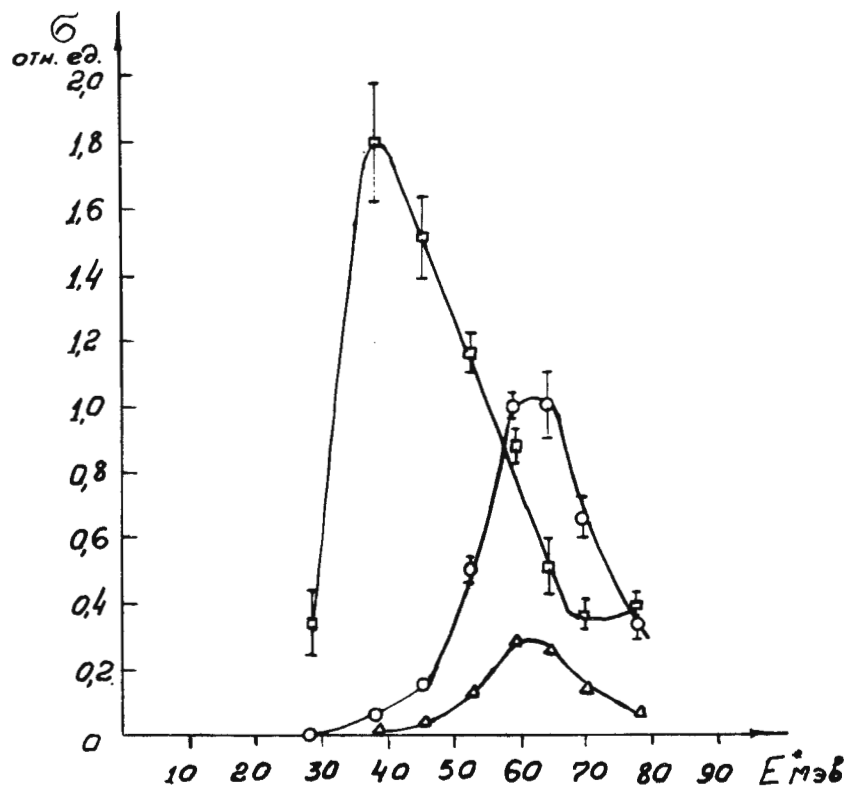
Рукопись поступила в издательский отдел
18 апреля 1963 г.



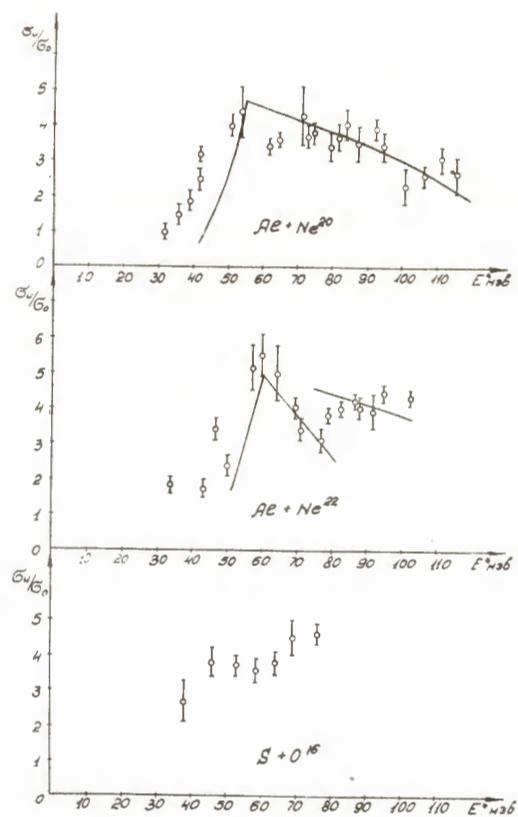
Р и с. 3. Функции возбуждения реакций $Al^{27} + Ne^{20}$, приводящих к изотопам скандия Sc^{44m} , Sc^{44} , Sc^{43} .
 $\circ - Sc^{44m}$, $\triangle - Sc^{44}$, $\square - Sc^{43}$



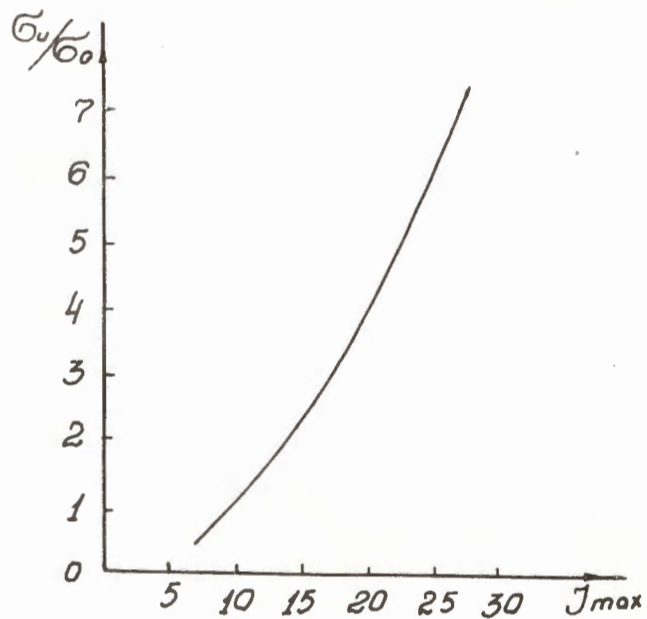
Р и с. 4. Функции возбуждения реакций $Al^{27} + Ne^{22}$, приводящих к изотопам скандия Sc^{44m} , Sc^{44} , Sc^{43} , Sc^{46} .
 $\circ - Sc^{44m}$, $\triangle - Sc^{44}$, $\square - Sc^{43}$, $\diamond - Sc^{46}$.



Р и с. 5. Функции возбуждения реакций $Sc^{32} + O^{16}$, приводящих к Sc^{44m} , Sc^{44} , Sc^{43} .
 \circ - Sc^{44m} , \blacktriangle - Sc^{44} , \square - Sc^{43} .



Р и с. 6. Энергетические зависимости изомерного отношения в реакциях с тяжелыми ионами. Сплошными линиями проведены рассчитанные кривые.



Р и с. 7. Зависимость изомерного отношения от максимального спина составного ядра, рассчитанная по каскадной статистике.