

С343 е  
0-361

2/м-7

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



2457/2-73

P7 - 7168

Ю.Ц.Оганесян, Ю.Э.Пенионжкевич, Нгуен Так Ань,  
Д.М.Надкарни, К.А.Гаврилов, Ким Де Ен, М.Юссонуа

ЗАКОНОМЕРНОСТИ  
ОБРАЗОВАНИЯ ЯДЕР В РЕАКЦИЯХ С ИОНАМИ  
Kr И Xe

1973

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

P7 - 7168

Ю.Ц.Оганесян, Ю.Э.Пенионжкевич, Нгуен Так Ань,  
Д.М.Надкарни, К.А.Гаврилов, Ким Де Ен, М.Юссонуа

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ**

**ОБРАЗОВАНИЯ ЯДЕР В РЕАКЦИЯХ С ИОНАМИ**

**Kr И Xe**

*Направлено в ЯФ*

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

начинают перекрываться. В связи с тем, что в реакции с ионами  $A > 40$  сечение образования составного ядра /или составной системы/ будет уменьшаться вследствие ограничений, определяемых критическим угловым моментом  $l_0$ , а вклад реакций передачи увеличивается, разделение этих двух процессов в опытах с ионами  $Kr$  и тем более  $Xe$  представляет сложную проблему.

Вместе с тем вопрос об изучении деления в реакциях с ионами с массой  $> 100$  является принципиально важным, т.к. все экстраполяции в эту далекую область ядер были сделаны в предположении, что процесс образования и деления возбужденного ядра аналогичен тому, что наблюдалось в случае реакции с более легкими бомбардирующими ионами  $/A \leq 40/$ . Для этих целей нами исследовались закономерности образования ядер в области  $69 < Z \leq 95$  при бомбардировке мишеней из  $^{197}Au$ ,  $^{181}Ta$  и  $^{238}U$  ионами  $^{40}Ar$ ,  $^{84}Kr$ ,  $^{136}Xe$  с энергией  $\approx 6,5$  Мэв/нуклон. Ниже описывается схема опытов и представлены экспериментальные результаты.

#### Постановка опыта и экспериментальные результаты

Толстые мишени из металлического тантала, золота и урана облучались на внутреннем пучке тандем-циклотронов ионами  $^{84}Kr$  и  $^{136}Xe$ . Опыты по облучению ионами  $^{40}Ar$  производились на внутреннем пучке циклотрона У-300. Условия опыта приведены в таблице.

Выбор  $Ta$ ,  $Au$  и  $U$  в качестве мишени обусловлен следующим. В процессе слияния взаимодействующих ядер образуется достаточно тяжелая составная система с параметром  $Z^2/A$ , который может быть как больше, так и меньше  $(Z^2/A)_{крит.}$  Нас интересует образование осколков при  $(Z^2/A) > (Z^2/A)_{крит.}$  Вместе с тем продукты реакции передачи будут иметь максимальное сечение вблизи масс, соответствующих массам ядер мишени и иона. Поэтому использование мишеней из тантала, золота и урана позволяет исследовать закономерности образования продуктов реакций передачи как в области

Таблица 1

Мишень	Бомбардирующие ионы	Энергия ионов лаб. система коорд. (Мэв)	Средняя интенсивн. пучка ионов (част./сек)	Исследуемые продукты реакций
$^{181}Ta$	$^{40}Ar$	380	$10^{12}$	$Z = 79$
	$^{40}Ar$	290	$5 \cdot 10^{12}$	$Z = 79$
	$^{84}Kr$	550	$5 \cdot 10^9$	$Z = 79$
	$^{136}Xe$	840	$10^{10}$	$69 \leq Z \leq 79$
$^{197}Au$	$^{136}Xe$	840	$10^{10}$	$79 < Z < 83$
$^{238}U$	$^{136}Xe$	840	$10^{10}$	$90 < Z < 95$

неделяющихся, так и в области делящихся ядер. С другой стороны, выбор этих мишеней обусловлен также тем, что образующиеся продукты после радиохимического разделения могут быть надежно идентифицированы.

Радиохимическая методика была направлена на выделение редкоземельных элементов, группы тяжелых металлов /Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi/, а также актинидных элементов от Th до Am. Химическая процедура занимала от 2 до 5 часов и обеспечивала очистку от соседних элементов не хуже  $10^{-4}$ . Методика радиохимического выделения элементов описана в приложении. Идентификация продуктов реакции производилась по спектрам гамма-излучений, измеренным с помощью Ge(Li) гамма-спектрометра в интервале энергий  $E_\gamma = 60 - 2500$  кэв, с энергетическим разрешением 2 кэв и эффективностью для  $E_\gamma = 250$  кэв, равной 6,5%. По интенсивностям гамма-переходов, соответствующим распаду того или иного ядра, с учетом необходимых поправок, были определены сечения образования различных изотопов, представленные в табл. 2 и на рис. 1, 2 и 4. Следует отметить, что большинство наблюдаемых изотопов является экранированными ядрами. При расчете сечения образования кумулятивных ядер вводилась соответствующая поправка. В случае, когда эта процедура могла привести к заметному ухудшению точности /например, в случае определения сечения легких изотопов золота/, приводились экспериментальные значения сечений образования данного продукта. Относительная точность измерения сечения образования изотопов определялась статистической погрешностью и была не хуже 30%. Для нахождения абсолютного значения сечений необходимы данные о кулоновских барьерах деления, расчетные значения которых согласно данным работы /10/ могут меняться при переходе от Ar к Kr и Xe. Данные по сечениям, приведенные в табл. 1 и на рис. 1, 2 и 4, получены в предположении о значении радиуса взаимодействия ядер  $r_0 = 1,45$  для реакций с ионами  $^{40}\text{Ar}$  и  $r_0 = 1,35$  для реакций с ионами Kr и Xe. Для определения эффективной толщины мишени использовались расчетные данные тормозных способностей, взятые из работы /11/.

## Обсуждение экспериментальных результатов

Одним из основных процессов, происходящих при взаимодействии ионов ксенона с различными ядрами, являются реакции неполного слияния. Из данных, представленных в табл. 2, следует, что суммарное сечение подобных реакций в случае  $^{197}\text{Au} + ^{136}\text{Xe}$  составляет около 1 барна, что близко к полному сечению взаимодействия. Это подтверждает сделанный ранее вывод о том, что с ростом массы бомбардирующего иона имеет место значительное увеличение сечений реакций неполного слияния сложных ядер /6-8, 12/. Рассматривая полученные данные с точки зрения реакций многонуклонных передач, можно показать, что эти процессы, как и в случае с более легкими ионами, носят статистический характер. Изотопное распределение конечных продуктов для заданного числа передаваемых протонов имеет вид симметричной кривой с максимумом, соответствующим наиболее вероятной массе продукта /рис. 1, 2/. Вместе с тем с увеличением числа передаваемых протонов сечение реакций многонуклонных передач быстро падает. Это видно из рис. 3, где представлены экспериментальные данные по зависимости сечения от числа передаваемых протонов для реакций  $^{197}\text{Au} + ^{40}\text{Ar}$ ,  $^{197}\text{Au} + ^{136}\text{Xe}$  и  $^{238}\text{U} + ^{136}\text{Xe}$  /значения сечений для данного числа протонов взяты для ядер, находящихся в максимуме соответствующих изотопных распределений/. Для реакции  $^{238}\text{U} + ^{136}\text{Xe}$  падение сечения значительно сильнее, чем в случае реакции  $^{197}\text{Au} + ^{136}\text{Xe}$ , что объясняется делимостью тяжелых ядер, которые в результате многонуклонного обмена обладают широким спектром энергий возбуждения /13/.\*

Рассмотрим теперь вопрос о том, каким образом можно разделить процессы реакций многонуклонной передачи и деление составных ядер или систем, т.е. каким обра-

\* Наблюдаемое различие в крутизне кривых при облучении золота ионами  $^{40}\text{Ar}$  и  $^{136}\text{Xe}$  обусловлено различными скоростями ионов над кулоновским барьером.

Таблица 2  
Сечения образования изотопов, образующихся при бомбардировке  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{238}\text{U}$  ионами  $^{136}\text{Xe}$ .

Мишень	Продукт реакции	Сечение мбарн.	Мишень	Продукт реакции	Сечение мбарн.
$^{181}\text{Ta}$	$^{165}\text{Tm}$	0,30	$^{197}\text{Au}$	$^{206}\text{Pb}$	0,25
	$^{166}\text{Tm}$	0,65		$^{203}\text{Pb}$	0,70
	$^{167}\text{Tm}$	1,50		$^{205}\text{Bi}$	0,35
	$^{172}\text{Tm}$	0,20		$^{206}\text{Bi}$	0,50
	$^{186}\text{Yb}$	0,20		$^{191}\text{Pt}$	4,20
	$^{169}\text{Yb}$	1,20		$^{195m}\text{Pt}$	25,0
	$^{176}\text{Yb}$	0,90		$^{197}\text{Pt}$	14,0
	$^{170}\text{Lu}$	0,36		$^{188}\text{Ir}$	1,50
	$^{171}\text{Lu}$	1,10		$^{189}\text{Ir}$	4,00
	$^{172}\text{Lu}$	1,40		$^{190}\text{Ir}$	3,50
	$^{177}\text{Lu}$	8,10	$^{238}\text{U}$	$^{226}\text{Th}$	0,14
	$^{193}\text{Au}$	0,85		$^{227}\text{Th}$	0,30
	$^{194}\text{Au}$	0,60		$^{231}\text{Th}$	3,50
	$^{196}\text{Au}$	0,21		$^{234}\text{Th}$	4,30
	$^{196m}\text{Au}$	0,12		$^{228}\text{Pa}$	0,09
	$^{198}\text{Au}$	0,13		$^{230}\text{Pa}$	0,50
	$^{199}\text{Au}$	0,09		$^{232}\text{Pa}$	3,20
$^{194}\text{Au}$	2,90	$^{233}\text{Pa}$		8,80	
$^{196}\text{Au}$	21,00	$^{237}\text{Pa}$		25,0	
$^{198}\text{Au}$	50,0	$^{237}\text{U}$		38,0	
$^{199}\text{Au}$	12,6	$^{239}\text{U}$	130,0		
$^{195m}\text{Hg}$	0,76	$^{240}\text{U}$	51,0		
$^{197}\text{Hg}$	13,5	$^{238}\text{Np}$	6,30		
$^{197m}\text{Hg}$	6,50	$^{239}\text{Np}$	20,0		
$^{203}\text{Hg}$	1,27	$^{240}\text{Np}$	28,0		
$^{199}\text{Tl}$	2,00	$^{239}\text{Am}$	0,01		
$^{200}\text{Tl}$	4,00	$^{240}\text{Am}$	0,007		
$^{202}\text{Tl}$	4,80	$^{244}\text{Am}$	0,01		

зом из большого числа образующихся ядер выделить продукты деления. В работе /14/ было показано, что сечение реакций многонуклонных передач строго зависит от разности масс начальных и конечных ядер ( $Q_{gg}$ ). Можно было предполагать, что эта зависимость является критерием отбора продуктов этих реакций. Однако продукты реакций деления столь же хорошо подчиняются этой закономерности /15/.

Нам представляется более информативной с этой точки зрения зависимость выхода различных изотопов от их массового числа /изотопные распределения/. Известно, что при делении образуются, как правило, нейтроноизбыточные ядра, в то время как соотношение нейтронов и протонов в продуктах реакций многонуклонных передач может существенно отличаться от того, что имеет место в осколках деления. Поэтому, нам кажется, что путем сравнения сечений образования различных продуктов ядерных реакций, особенно в области нейтроноизбыточных ядер, можно оценить вклад процессов реакций многонуклонных передач и деления. С этой точки зрения определенный интерес представляют данные, приведенные на рис. 4. При облучении тантала ионами  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{84}\text{Kr}$  и  $^{136}\text{Xe}$  наблюдается резкое увеличение выхода тяжелых изотопов золота по мере увеличения массы бомбардирующего иона. Так, например, сечение образования  $^{194}\text{Au}$  при переходе от бомбардирующей частицы  $^{40}\text{Ar}$  к  $^{136}\text{Xe}$  увеличивается примерно в  $10^4$  раз; изотопа  $^{197}\text{Au}$  - более, чем в  $10^5$  раз, а  $^{199}\text{Au}$ , по-видимому, более чем в  $10^8$  раз. Столь большое различие трудно объяснить в рамках одного механизма реакций многонуклонных передач. Нам кажется, что здесь имеют место два механизма реакций. В области легких изотопов золота с  $A \leq 193$  нельзя исключить, что их образование обусловлено частично реакциями многонуклонного обмена, в то время как изотопы с массой  $A > 194$  являются осколками деления. Следует отметить, что изотопное распределение золота в реакции  $^{181}\text{Ta} + ^{136}\text{Xe}$  хорошо согласуется с расчетным распределением, полученным в предположении, что наблюдаемые продукты являются осколками деления составного ядра  $^{317}\text{127}$ , образующегося с сечением 150 мбарн.

Таким образом, на основании приведенных выше данных можно предположить, что образование изотопов, отстоящих от ядра мишени на 6 протонов и более чем 8 нейтронов, обусловлено реакцией асимметричного деления на два осколка.

И наконец, необходимо отметить большие возможности реакций деления под действием ионов  $^{136}\text{Xe}$  для синтеза новых нейтроноизбыточных ядер. Если проэкстраполировать данные, представленные на рис. 4, в область тяжелых изотопов золота, то можно увидеть, что уже в реакции  $^{181}\text{Ta} + ^{136}\text{Xe}$  с заметными сечениями получают новые нейтроноизбыточные ядра с  $Z = 79$  и  $A = 203$ . Между тем для этих целей, как следует из работы /16/, более эффективной является реакция деления урана ионами  $^{136}\text{Xe}$ .

В заключение авторы выражают благодарность академику Г.Н.Флерову за постановку задачи и полезные советы в процессе проведения опытов и обсуждения результатов. Авторы благодарны также Ю.С.Короткину и Г.В.Букланову за помощь в радиохимическом выделении продуктов реакции, группе эксплуатации тандем-циклотронов за получение достаточно интенсивных пучков ионов  $\text{Kr}$  и  $\text{Xe}$ , В.В.Волкову и В.Л.Михееву - за полезную дискуссию, Д.М.Надкарни и М.Юссону признательны дирекции ОИЯИ и Лаборатории ядерных реакций за гостеприимство и предоставленную возможность проведения данных экспериментов.

## Приложение

### Методика химического выделения элементов

Урановая мишень растворялась смесью концентрированных азотной и соляной кислот. После выпаривания раствора осадок вновь растворялся в  $5\text{N HNO}_3 + 2\text{NHF}$ .

Нептуний экстрагировался трибутилфосфатом. После двукратного промывания органической фазы смесью  $5\text{N HNO}_3 + 2\text{NHF}$  что обеспечивало очистку от протактиния, тория и актиния/нептуний был рекстрагирован в водную

фазу  $2\text{N HNO}_3$  с добавкой  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Для улучшения очистки была произведена еще одна экстракция.

Уран экстрагировался трибутилфосфатом вместе с нептунием, но не рекстрагировался в  $2\text{N HNO}_3$  в присутствии  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Поэтому радиометрическое измерение урана производилось непосредственно в органической фазе.

Протактиний экстрагировался метилизобутилкетонном из  $8\text{N HCl}$  и рекстрагировался в  $8\text{N HCl} + \text{INHf}$ . Последняя очистка протактиния была проведена экстракцией теноилтрифторацетоном из  $5\text{N HCl}$  с последующей рекстракцией в  $5\text{N HCl} + \text{INHf}$ .

Торий выделялся осаждением фторида лантана из  $4\text{N}$  раствора азотной кислоты. Отделение тория от редкоземельных элементов производилось на анионите Дауэкс - 1x8 в  $7\text{N HNO}_3$ . При этом торий прочно удерживался на колонке, в то время как лантаниды и трехвалентные актиниды свободно элюировались. После промывания колонки  $10\text{M}$  соляной кислотой торий десорбировался раствором  $1\text{M HCl}$ .

Редкоземельные и трехвалентные элементы /америций/ разделялись поэлементно на катионите Aminex 5-A при постепенном увеличении концентрации  $\alpha$ -оксиизобутирата аммония.

Танталовая мишень растворялась в смеси концентрированных  $\text{HF}$  и  $\text{HNO}_3$  в присутствии носителей  $\text{Au}$ ,  $\text{Pt}$ ,  $\text{Ir}$ ,  $\text{Os}$ ,  $\text{Zr}$ . Затем после осаждения танталовой кислоты оставшийся раствор доводился до концентрации  $6\text{M HNO}_3$  и пропускался через колонку, наполненную порошкообразным тефлоном с сорбированным на нем ТБФ. В этих условиях золото отделяется от основного количества радиоактивных примесей. Десорбция золота с колонки проводилась  $14\text{M}$  азотной кислотой с последующей очисткой от иода осаждением  $\text{AgI}$ . Окончательная очистка золота от элементов платиновой группы производилась двукратным его восстановлением нитритом натрия.

Литература

1. С.А.Карамян, Ф.Нормуратов, Ю.Ц.Оганесян, Ю.Э.Пенионжкевич, Б.И.Пустыльник, Г.Н.Флеров. ЯФ, 4, 690 /1968/.
2. С.А.Карамян, Ю.Ц.Оганесян, Ю.Э.Пенионжкевич, Б.И.Пустыльник. ЯФ, 4, 715 /1969/.
3. И.В.Кузнецов, Н.С.Мальцева, Ю.Ц.Оганесян, А.М.Сухов, В.А.Щеголев. ЯФ, 8, 448 /1968/.
4. G.N.Flerov, V.A.Karnaikhov. Comptes Rendus de Congres Intern. de Physique Nucleaire, 2-8 juli, 1964, v. I, p. 373.
5. С.А.Карамян, Ю.Ц.Оганесян. Сообщение ОИЯИ, Р7-4339, Дубна, 1969.
6. A.G.Artukh, G.F.Gridnev, V.L.Mikheev, V.V.Volkov, J.Wilczynski. JINR Preprint E7-6970, Dubna, 1973.
7. R.Bimbot, H.Gauvin, Y.Le Beyec, M.Lefort, N.T.Porile, B.Tamai. Nucl. Phys., A189, 539 (1972).
8. Ю.Ц.Оганесян, Ю.Э.Пенионжкевич, А.О.Шамсутдинов. ЯФ, 1, 54 /1971/.
9. J.V.Natowitz. Phys.Rev., 6, 2157 (1970).
10. P.Colombani, J.C.Jacmart, N.Poffe, M.Riou, C.Stephan, J.Tys. Phys. Lett., 2, 197 (1972).
11. L.Nortcliffe, R.Schilling. Data Tables, 7, 233 (1970).
12. Г.Н.Флеров, С.А.Карамян, Ю.Э.Пенионжкевич, С.П.Третьякова, И.А.Шелаев. Сообщения ОИЯИ, Р7-6262, Дубна, 1972.
13. A.G.Artukh, G.F.Gridnev, V.L.Mikheev, V.V.Volkov, J.Wilczynski. JINR Preprint E7-6764, Dubna, 1972.
14. A.G.Artukh, V.V.Avdeichikov, J.Erö, G.F.Gridnev, V.L.Mikheev, V.V.Volkov, J.Wilczynski. Nucl. Phys., A160, 511 (1970).
15. A.E.S.Green. Phys.Rev., 95, 1006 (1954).
16. Ю.Ц.Оганесян, О.А.Орлова, Ю.Э.Пенионжкевич, К.А.Гаврилов, Ким Де Ен. ЯФ, 2, 249 /1972/.

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 мая 1973 года.

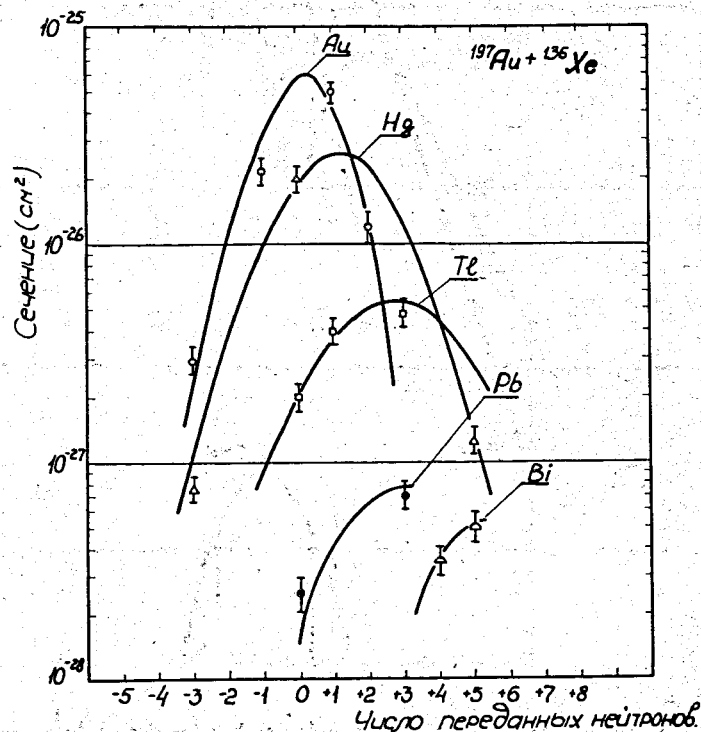
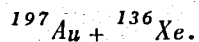


Рис. 1. Изотопные распределения продуктов реакции



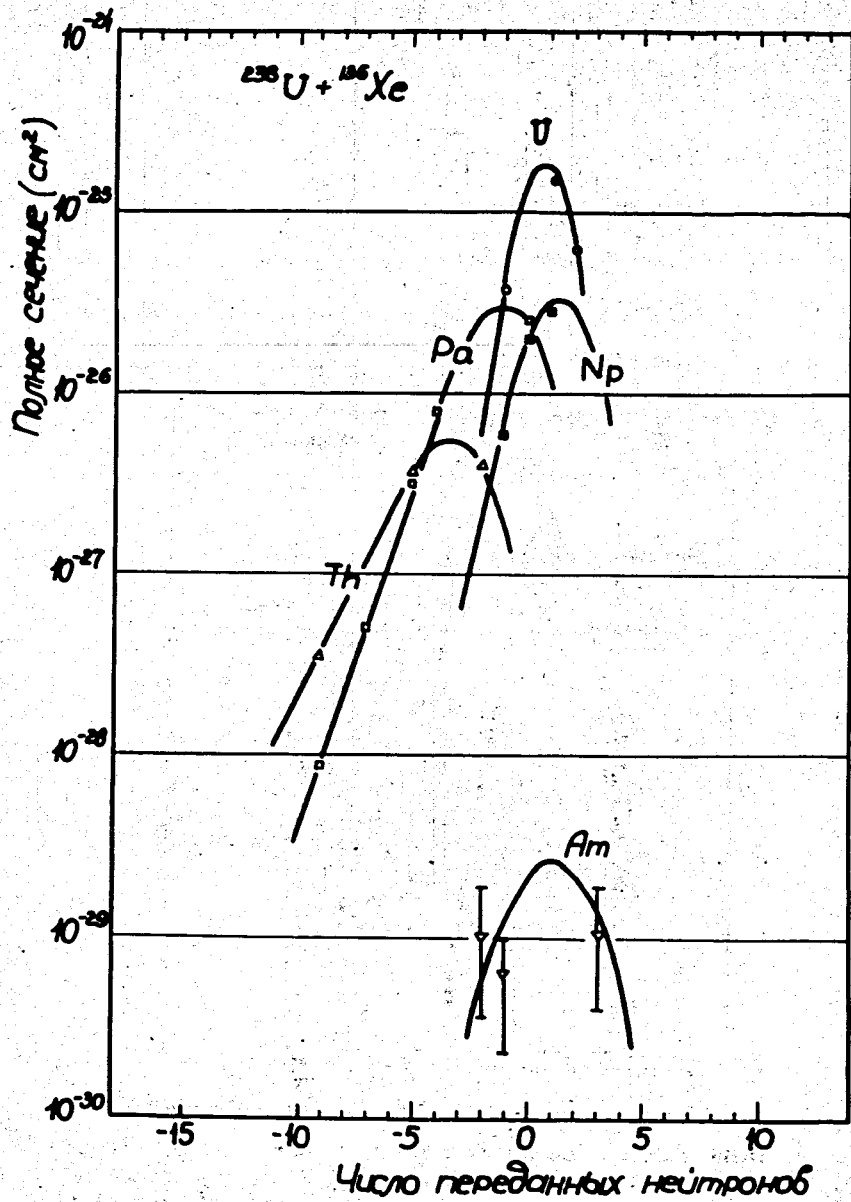


Рис. 2. Изотопные распределения продуктов реакции  $^{238}\text{U} + ^{136}\text{Xe}$ .

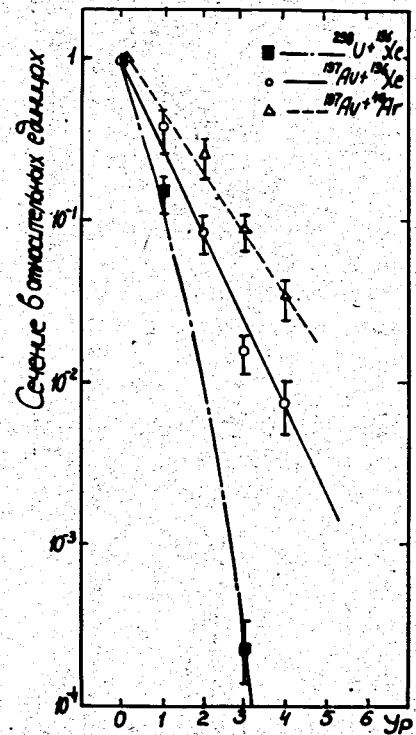


Рис. 3. Зависимость сечения образования изотопа в максимуме изотопного распределения от числа передаваемых протонов ( $Y$ ) при облучении  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{238}\text{U}$  ионами  $^{136}\text{Xe}$ . Все зависимости отнормированы к одинаковому сечению для реакции передачи одного протона.



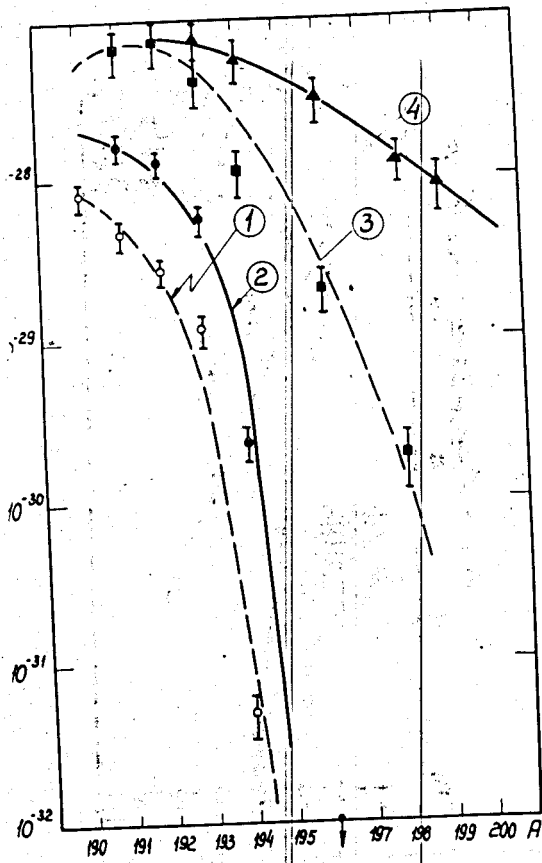


Рис. 4. Изотопные распределения золота, образованные при облучении танталовой мишени ионами  $^{40}\text{Ar}$  с энергией 290 Мэв /1/ и 380 Мэв /2/, ионами  $^{84}\text{Kr}$  /3/ и ионами  $^{136}\text{Xe}$  /4/.