

С 341.2 а

0-361

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

3416 / 2-73



P7 - 7410

Ю.Ц. Оганесян

СИНТЕЗ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

**1973**

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Ю.Ц. Оганесян

## СИНТЕЗ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Обзорный доклад, представленный на  
Международную конференцию по ядерной  
физике (Мюнхен, 27 августа - 1 сентября  
1973 года)

В течение последних 10 лет в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ были синтезированы элементы с атомными номерами 102, 103, 104 и 105. Аналогичные эксперименты проводились в Радиационной лаборатории им. Лоуренса (США), и в настоящее время известны свойства 27 изотопов трансменделеевых элементов<sup>(1)</sup>.

Большинство изотопов в области  $Z = 102-105$  испытывают  $\alpha$ -распад или спонтанное деление и периоды их полураспада не сильно отличаются друг от друга, противоположно тому, что имело место для элементов с  $Z < 102$ . Поэтому можно было надеяться, что при дальнейшем продвижении в область более тяжелых ядер эта ситуация сохранится, и будет наблюдаться повышенная стабильность для  $Z > 105$ .

Однако предпринятые в 1970-71 гг. попытки синтезировать элементы с атомными номерами 107 и 109 в ядерных реакциях с ускоренными ионами  $^{30}\text{Si}$  и  $^{31}\text{P}$  (2) не дали положительных результатов, и в настоящее время в нашей лаборатории продолжаютсся ранее начатые опыты по синтезу 106-го элемента в реакции  $^{246}\text{Cm} + ^{22}\text{Ne}$ .

Отсутствие повышенной стабильности для  $Z = 107, 109$ , возможно, объясняется тем, что в реакциях с тяжелыми ионами можно синтезировать лишь относительно легкие изотопы этих элементов (число нейтронов  $n < 160$ ). Поэтому не исключено, что для ядер с  $Z > 109$  и  $N > 170$  может существовать область повышенной стабильности, как это предсказывается теорией<sup>(3-8)</sup>.

Не касаясь теоретической стороны вопроса, а также не останавли-

ливаясь на отдельных безуспешных попытках получения этих ядер в различных реакциях (9-14), мы пытаемся рассмотреть перспективы синтеза сверхтяжелых элементов.

Нам представляется, что есть два пути решения проблемы:

1. Использовать для получения сверхтяжелых элементов традиционный метод, основанный на реакции слияния взаимодействующих ядер с образованием составного ядра.

2. Попытаться получить ядра из предсказываемой области стабильности в качестве осколков, образовавшихся при делении очень тяжелых возбужденных ядер.

После конференции в Экс-ан-Провансе (Франция) <sup>(15)</sup> основные наши усилия были направлены на синтез сверхтяжелых элементов, образовавшихся в реакции  $\text{Th} + \text{Ge}$ , т.е. на тандем-циклотроне были получены пучки ионов  $^{74}\text{Ge}$  и  $^{76}\text{Ge}$  с интенсивностью до  $10^{11}$  частиц/сек, и это позволяло проводить эксперименты с высокой чувствительностью.

Основная идея этих экспериментов, предложенная В.Святоцким <sup>(16)</sup>, заключается в следующем.

Поскольку в реакции слияния невозможно синтезировать дважды магическое и наиболее стабильное ядро с  $Z = 114$  и  $N = 184$ , то можно попытаться получить ядра с  $Z = 120-122$  и  $N \sim 184$ . Согласно расчетам, проведенным Р.Никсом <sup>(17)</sup>, времена жизни этих ядер по отношению к спонтанному делению составляет  $(\frac{T_d}{T_{s.f.}} = 10^{-20} - 10^{-15})$ . Поэтому, независимо от неопределенности в оценке величины  $T_{s.f.}$ , они будут испытывать, в основном,  $\alpha$ -распад. В процессе последовательных  $\alpha$ -распадов должны образовываться более стабильные ядра (приближение к вершине острова стабильности)

до тех пор, пока не наступит конкуренция со стороны спонтанного деления (рис.1).

Таким образом, сверхтяжелые элементы могут быть обнаружены по спонтанному делению с минимальным значением времени жизни, которое определяется периодом  $\alpha$ -распада в области  $Z = 112-116$  и  $N = 174-178$  и составляет от 1 сек. до 1 года (17).

Вторым необходимым условием для данного метода синтеза является образование слабозвужденного составного ядра.

В ряде экспериментов, проведенных в Дубне и Орсе, было показано, что сечение компунд-ядер с массой  $A_C \leq 200$ , образующихся в реакциях с ионами  $^{66}_{21}\text{Ni}$  и  $^{84}_{36}\text{Kr}$  составляет около  $10^{-25}$  см<sup>2</sup> (18-19). Вероятность образования составных ядер с  $A > 200$  можно определять по выходу масс осколков деления.

На рис.2,3 представлены распределения осколков по массам и зарядам, полученные нами в реакциях  $^{236}_{92}\text{U} + ^{40}_{18}\text{Ar}$  и  $^{181}_{73}\text{Ta} + ^{84}_{36}\text{Kr}$ , где начальные ядра близки по  $Z$  и  $A$  и образуются с одинаковой энергией возбуждения. Поскольку массовые распределения осколков деления для этих двух реакций практически совпадают, можно предполагать, что вероятность слияния не существенно меняется с увеличением массы налетающего иона.

Вместе с тем, при переходе к более тяжелым ионам, таким как  $\text{Ge}$ ,  $\text{Kr}$  и  $\text{Xe}$  процесс слияния ядер оказывается энергетически менее выгодным по сравнению с другими каналами реакции. Это наглядно видно из рис.4, где представлены энергетические зависимости сечений образования тяжелых осколков (изотопы золота) и продуктов реакций передач, полученных при облучении  $^{232}_{81}\text{Tl}$  ионами  $^{74}_{32}\text{Ge}$  в широком диапазоне энергий.

Вследствие повышения кулоновского барьера реакции слияния

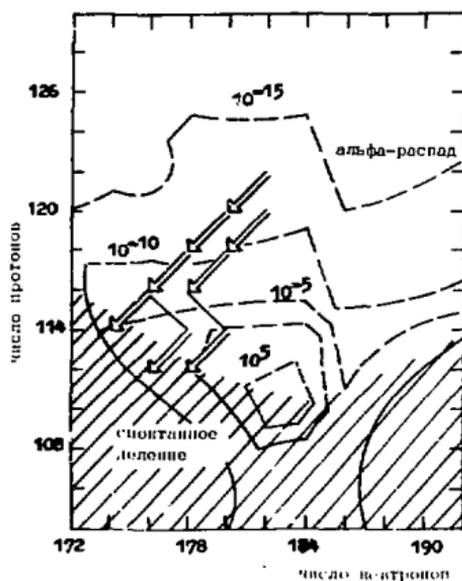


Рис.1.

Времена жизни ядер (в годах) vicino острова стабильности. Пунктирная линия -  $\alpha$ -распад, сплошная - спонтанное деление. Стрелками показан  $\alpha$ -распад изотопов, образующихся в реакции  $^{232}\text{Th} + ^{74,76}\text{Ge}$ .

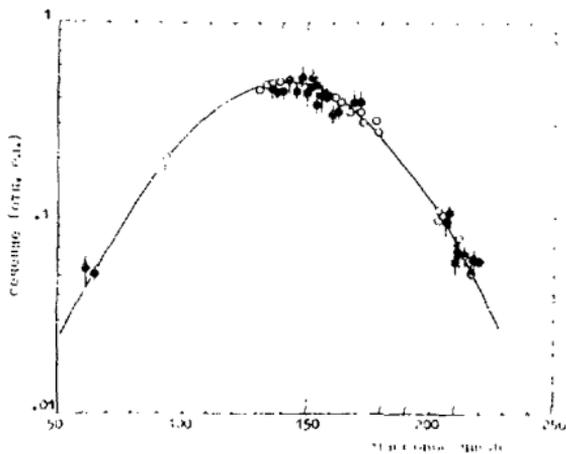


Рис.2. Массовое распределение осколков деления в реакциях:  
 2.  $U + {}^{40}\text{Ar}$  (открытые кружки)  
 и  ${}^{181}\text{La} + {}^{84}\text{Kr}$  (черные точки)

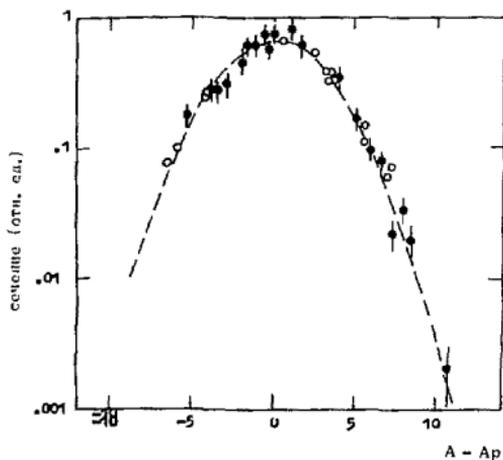


Рис.3. Изотопные распределения осколков деления (редкоземельные элементы) в реакциях  $^{238}\text{U} + ^{40}\text{Ar}$  (открытые кружки) и  $^{181}\text{Ta} + ^{84}\text{Kr}$  (черные точки).

минимальное значение энергии возбуждения составного ядра  $^{306}_{122}$  составляет около 40-50 Мэв вместо 15-20 Мэв, как это предсказывалось на основании простейших оценок по формуле масс ядер. К сожалению, это обстоятельство может существенно уменьшить вероятность образования сверхтяжелых ядер в основном состоянии, вследствие понижения барьера деления с ростом температуры ядра. Поэтому в экспериментах по синтезу сверхтяжелых элементов в реакции  $^{232}_{\text{Th}} + ^{74,76}_{\text{Ge}}$  большое внимание было обращено на повышение чувствительности методики.

На рис. 5 схематически показано экспериментальное устройство, с помощью которого можно было зарегистрировать спонтанно делящиеся ядра с периодом полураспада от  $10^{-3}$  сек. до 100 дней, если сечение их образования  $\geq 10^{-34}$  см<sup>2</sup>.

Экспериментальные результаты представлены в таблице I. Расчетные значения высот барьеров деления в исследуемой области ядер составляют от 5 до 7 Мэв (20). Поэтому отсутствие эффекта может объясняться двояким образом.

Либо при образовании составного ядра и в процессе его де возбуждения существуют сильные факторы, приводящие к уменьшению вероятности его получения в основном состоянии в  $10^9 - 10^{10}$  раз. Нам представляется это предположение вполне объяснимым, ввиду высокой энергии возбуждения составного ядра и сильной конкуренции со стороны деления в процессе испускания нейтронов. Либо ядра в исследуемой области имеют значительно меньшую стабильность, чем это предсказывается теорией.

С этой точки зрения второй метод синтеза имеет некоторые преимущества, т.к. реакция деления, строго говоря, не требует образования сферического составного ядра и, вследствие того,

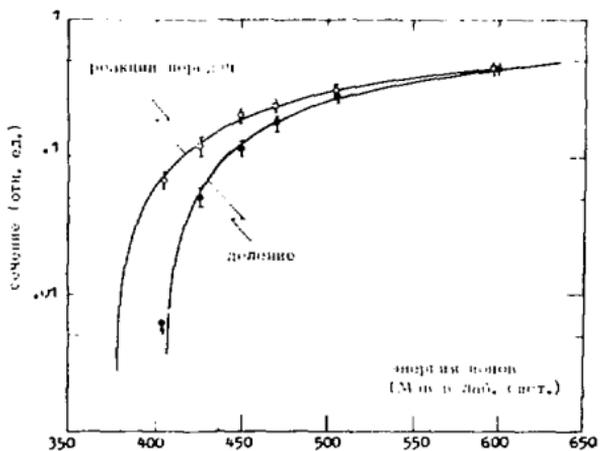


Рис. 4. Зависимость сечений деления (изотопы золота) и реакций передач (изотопы тория, протактиния и урана) от энергии бомбардирующих ионов в реакции  $^{232}\text{Tn} + ^{74}\text{Ge}$

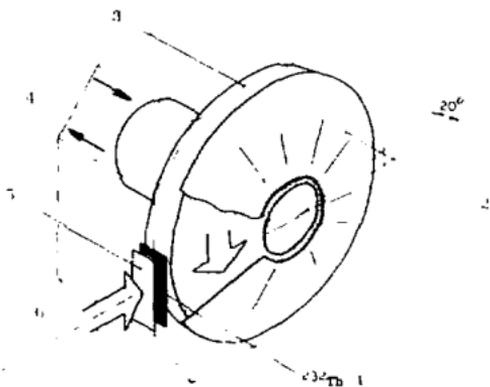


Рис.5. Схематический вид установки для регистрации короткоживущих спонтанно-делящихся ядер.

Надписи на рисунке:

- 1 - мишень  $^{232}\text{Th}$
- 2 - детекторы осколков деления
- 3 - вращающийся сборник ядер отдачи
- 4 - водяное охлаждение
- 5 - тормозящие фольги
- 6 - пучок мюнов германия

Таблица I.

Реакция	Диапазон энергий ионов (МэВ в л.с.)	Интервал времени жизни (сек)	Верхняя граница сечения (см <sup>2</sup> )
$^{232}\text{Th} + ^{74}\text{Ge}$	370 - 430	$5 \times 10^{-3} - 10^5$	$2 \times 10^{-34}$
	390 - 450	- " -	$1 \times 10^{-34}$
	420 - 480	- " -	$2 \times 10^{-34}$
	0 - 620	$10^5 - 10^7$	$5 \times 10^{-35}$
$^{232}\text{Th} + ^{76}\text{Ge}$	400 - 460	$5 \times 10^{-3} - 10^5$	$1 \times 10^{-34}$
	460 - 520	- " -	$1 \times 10^{-34}$
	510 - 570	- " -	$5 \times 10^{-35}$
	540 - 600	- " -	$2 \times 10^{-34}$
	0 - 600	$10^5 - 10^7$	$5 \times 10^{-35}$
$^{238}\text{U} + ^{76}\text{Ge}$	430 - 490	$5 \times 10^{-3} - 10^5$	$1 \times 10^{-33}$
	510 - 570	- " -	$1 \times 10^{-34}$

что осколки обладают избытком нейтронов, можно, в принципе, получать ядра с  $Z = 110-114$  и с числом нейтронов, близким к  $N = 184$  (21,22). Вместе с тем, из-за большой дисперсии осколков деления по массе и заряду этот метод имеет меньшую чувствительность и требует ускорения более тяжелых ионов, таких как Хе и U.

В основе этого метода синтеза лежит предположение о том, что процесс деления очень тяжелых ядер, образовавшихся при слиянии ионов Хе с ядром мишени, аналогичен тому, что имело место при делении более легких ядер. Поэтому, после того, как на тандем-циклотроне были получены пучки ионов  $^{129,132,136}\text{Xe}$  с интенсивностью  $\sim 3 \cdot 10^{10}$  част./сек., эксперименты по изучению массовых и зарядовых распределений осколков деления были перенесены в область более тяжелых ядер.

Результаты этих опытов свидетельствуют о том, что распределение осколков по массе и заряду имеет статистический характер (рис.6) и близки к тому, что можно было ожидать при делении возбужденного составного ядра, образовавшегося в реакции полного слияния взаимодействующих ядер (21).

Весьма важные выводы были сделаны из анализа выходов тяжелых осколков.

Изотопные распределения ядер Au, образовавшихся при облучении  $^{181}\text{Ta}$ , ионами  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{84}\text{Kr}$  и  $^{136}\text{Xe}$  свидетельствуют о том, что с увеличением массы иона резко возрастает выход нейтронно-обогащенных ядер (23). Поэтому нам представляется, что реакция деления под действием тяжелых ионов может быть использована для синтеза нейтронно-избыточных изотопов вплоть до  $Z = 82-84$ . Вместе с тем выходы осколков с  $A_p > 220$  в основном состоянии оказываются су-

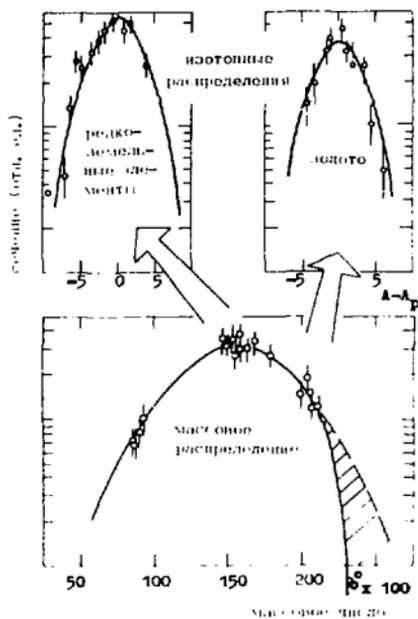


Рис. 6. Изотопные и массовые распределения ядер, образовавшихся в реакции  $^{181}\text{Ta} + ^{136}\text{Xe}$

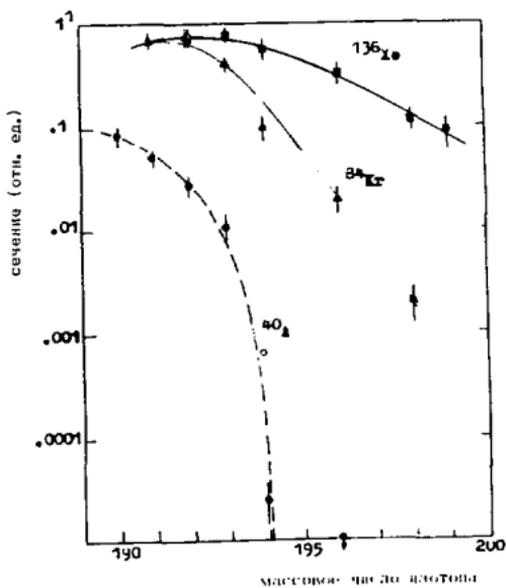


Рис.7. Изотопные распределения ядер золота, полученные при облучении мишени  $^{181}\text{Ta}$  ионами  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{84}\text{Kr}$  и  $^{136}\text{Xe}$ .

цественно меньшими того, что ожидается из массовых и зарядовых распределений. Это можно объяснить нестабильность тяжелых осколков относительно деления.

Вместе с тем, при облучении  $^{238}\text{U}$  ионами  $^{136}\text{Xe}$  наблюдалось образование нейтронно-избыточного ядра  $^{254}\text{Cf}$  с сечением  $\sim 2 \cdot 10^{-34} \text{ см}^2$ . Тяжелый изотоп -  $^{254}\text{Cf}$  был получен лишь в продуктах подземного взрыва <sup>(24)</sup>. Тот факт, что эти ядра образуются в основном состоянии в заметной доле случаев в реакции  $^{238}\text{U} + ^{136}\text{Xe}$ , может объясняться следующим образом.

Вследствие широких массовых и зарядовых распределений осколки деления будут иметь также широкий спектр по энергии возбуждения. Тогда определенная часть ядер может иметь достаточно низкую энергию возбуждения и будет переходить в основное состояние с большой вероятностью.

Аналогичная ситуация будет и в случае образования сверхтяжелых ядер. Если высота барьера деления ядра  $^{298}\text{114}$  составляет 10-15 Мэв и эта величина уменьшается с ростом энергии возбуждения, вследствие исчезновения эффекта оболочек, то это приведет к тому, что сечение образования этих ядер в основном состоянии будет определяться низкоэнергичной частью спектра энергий возбуждения осколков ( $E^* < 20 \text{ Мэв}$ ).

Следует отметить, что малой энергии возбуждения должна также соответствовать малая деформация осколка, что является важным обстоятельством, т.к. вершины барьеров деления соответствуют относительно малым деформациям.

Таким образом, можно прийти к заключению, что вероятность образования сверхтяжелых ядер в основном состоянии определяется в значительной степени структурой их барьеров деления. Если при-

нать во внимание, что с ростом барьера увеличивается стабильность ядра относительно спонтанного деления, то можно предполагать, что наибольшее сечение образования можно ожидать для наиболее долгоживущих ядер (рис.8).

Основываясь на этих соображениях, эксперименты по получению сверхтяжелых элементов в реакции  $U + He$  были нацелены на синтез относительно долгоживущих ядер с  $T_{1/2} \geq 1$  день.

В результате длительных облучений толстой мишени  $^{238}U$  ионами  $^{136}Xe$  наблюдались редкие события спонтанного деления. Распределение этих событий по времени соответствует периоду полураспада  $T_{1/2} \sim 150$  дней, который не может быть объяснен ни одним из известных спонтанно делящихся ядер.

Дальнейшая программа экспериментов предусматривает:

1. Измерение среднего числа нейтронов деления -  $\bar{\nu}$ .
2. Определение кинетической энергии осколков.
3. Идентификация атомного номера излучателя с помощью специально разработанной химической методики (25).
4. Использование масс-сепаратора с высокой эффективностью для определения массы спонтанно делящегося ядра.

Ряд экспериментов был проведен в течение последнего года и, в частности, оказалось, что  $\bar{\nu} < 4$ , в то время как, согласно теоретическим предсказаниям, величина  $\bar{\nu}$  должна быть примерно около 8-10 (26,27).

Выполнение намеченной программы экспериментов связано с увеличением эффекта, и это определяется в основном интенсивностью пучка ионов  $^{136}Xe$ . В дальнейшем возникнет вопрос о выборе наилучшей комбинации мишень + тяжелый ион для увеличения сечения образования наблюдаемых спонтанно делящихся ядер. Вместе с тем,

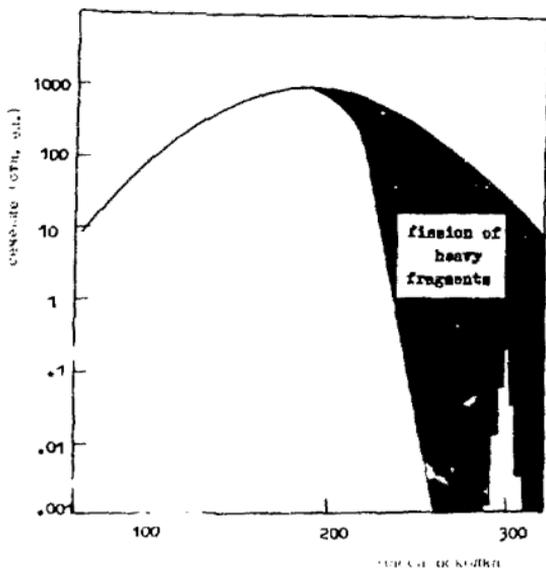


Рис. 8. Иллюстрация возможностей синтеза сверхтяжелых ядер в реакции  $^{238}\text{U} + ^{136}\text{Xe}$ .

возможности тандем-циклотрона ограничены и последующие эксперименты будут по-прежнему проводиться на внутреннем пучке ионов  $^{136}\text{Xe}$  с использованием мишени из  $^{238}\text{U}$ . Однако мы надеемся, что в будущем, с вступлением в строй линейного ускорителя тяжелых ионов UNILAC, на котором могут быть получены выведенные пучки тяжелых ионов вплоть до  $^{238}\text{U}$ , откроются новые возможности для проведения широкого круга экспериментов по синтезу сверхтяжелых элементов.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А :

1. Г.Н.Флеров, И.Звара. Препринт ОИЯИ Д7-6013 (1971)  
M.J.Burton. Nucl.Chemistry Annu. 2 Report, LBL, Berkeley (1971)
2. Г.Н.Флеров и др. Международная конференция по физике тяжелых ионов, Дубна (1971), стр.148.
3. W.D.Myers and M.J.Swiatowski. Nucl.Phys. 81,1(1966)
4. В.М.Стругинский, Ю.А.Музычка. Междунар.конф. по физике тяжелых ионов, Дубна (1966) стр.51.  
Ю.А.Музычка, В.В.Пашкевич, В.М.Стругинский.  
ЯФ 8, 716 (1968)
5. Yu.A.Muzychka. Phys.Lett. 32B,53(1969)  
ЯФ 11, 105 (1970)
6. S.G.Nilsson et al. Nucl.Phys. A115,545(1968)
7. M.Zolsterli, A.O.Finet, J.R.Nix and H.L.Nelson.  
Preprint LA-DC 12817, Oct.1 (1971)
8. Г.Д.Адеев, И.А.Гаврилов, И.А.Чердыншев.  
ЯФ 13, 1180 (1971)
9. S.G.Nilsson, S.G.Thompson and C.P.Tsang. Phys.Lett. 28B,458(1969)

10. M.Lefort, M.Ricu and C.Jaspart. Ann.de Phys. 395(1970)
11. А.Г.Лемин и др. Международная конф.по физике тяжелых ионов, Дубна (1971), стр.169
12. L.Westgaard et al. "Search for super-heavy elements produced by secondary reactions in uranium", CERN, Geneva, May 1972
13. С.М.Поликанов и др. Сообщение ОИЯИ Р1-6551, 1972.
14. A.Marinov et al. Nature 229,464(1971)
15. European Conference on Nuclear Physics, 1972, Aix-en-Provence (Journal de Physique, v.33, 1972)
16. W.J.Swiatecki. Intern. Conf. on Nuclear Reactions Induced by Heavy Ions, North Holland, 1971, p.729
17. E.O.Fiset, J.R.Nix. Nucl.Phys. A193, 647(1972)
18. Г.Н.Флеров и др. Препринт ОИЯИ Р7-6262 (1972)
19. H.Gauvain, Y.le Beues, M.Lefort, C.Derprun. Phys.Rev.Lett. 28, 697(1972)
20. J.R.Nix. Preprint LA-DC-72-335(1972)
21. Г.Н.Флеров, В.Ц.Оганесян. Препринт ОИЯИ Р7-6523 (1972)
22. Г.Н.Флеров, В.Ц.Оганесян. Препринт ОИЯИ Е7-6838 (1972)
23. В.Ц.Оганесян и др. Препринт ОИЯИ Р7-7168 (1983)
24. P.R.Fields et al. Phys.Rev. 102, 180(1956)  
C.O.Orth. Nucl.Sci. Eng. 43,54(1971)
25. B.Eichler. JINR Communications P12-6661 and P12-6662(1972)
26. J.R.Nix. Phys.Lett. 30B,1(1969)
27. B.Cheifetz et al. Annual Report LNL p.160 (1970)

Рукопись поступила в издательский отдел  
20 августа 1973 года.