

Ф-716

3469/2-76

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА



6/ix-76

P7 - 9956

Г.Н.Флеров

СОСТОЯНИЕ РАБОТ И ПЕРСПЕКТИВЫ СИНТЕЗА
ТЯЖЕЛЫХ И СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ДУБНЕ

1976

P7 - 9956

Г.Н.Флеров

**СОСТОЯНИЕ РАБОТ И ПЕРСПЕКТИВЫ СИНТЕЗА
ТЯЖЕЛЫХ И СВЕРХТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ДУБНЕ**

Доложено на Международной конференции по избранным
вопросам структуры ядра, Дубна, 1976.

S u m m a r y

Some data on new isotopes of elements 100-105 and on new elements with atomic numbers 106 and 107 first produced at Dubna are presented. The paper also covers investigations on the search for superheavy elements in nature and their synthesis. Out of a number of natural samples of interest, Allende meteorite has been investigated most thoroughly. A weak spontaneous fission activity has been observed which can possibly be due to the decay of the nuclei of superheavy elements. The small value of $\bar{\nu} \leq 3$, which characterizes the fission event observed, does not contradict this assumption. The same conclusion should also be drawn with respect to the spontaneous fission activity observed in the U+Xe reaction previously. New possibilities for the synthesis of superheavy elements are offered by the Ca-48 ion beam produced at Dubna.

Настоящий доклад посвящен, главным образом, работам по синтезу и поискам в природе сверхтяжелых элементов. Мы лишь коротко коснемся некоторых результатов, относящихся к синтезу элементов с порядковыми номерами от 102 до 107, рассматривая эти результаты как базу для дальнейших экспериментов по синтезу сверхтяжелых элементов. Разумеется, мы отдаем себе отчет в том, что направление исследований, связанное с синтезом элементов с $Z = 102-107$, имеет самостоятельное важное значение. Это направление внесло большой вклад в развитие физики деления и в значительной степени определило прогресс, достигнутый в последние годы в этой области. Именно в экспериментах по синтезу новых элементов были впервые обнаружены спонтанно делящиеся изомеры [1], наблюдалось запаздывающее деление после электронного захвата [2], получены данные о стабильности тяжелых ядер относительно спонтанного деления.

В течение 1974-76 гг. в Дубне Оганесяном с сотрудниками проведен цикл экспериментов, приведший к синтезу изотопов новых элементов с порядковыми номерами 106 и 107 [3, 4]. Был получен также ряд новых изотопов фермия, 102-го элемента, курчатовия и нильсбория [5, 6]. Данные о периодах полураспада этих изотопов наряду с основными реакциями, в которых они были синтезированы, показаны в таблице I. Уделив главное внимание изучению спонтанного деления этих изотопов, мы смогли получить весьма существенные, на наш взгляд, результаты, касающиеся стабильности тяжелых ядер относительно спонтанного деления. Эти результаты представлены на рис. I в систематике периодов полураспада относительно спонтанного деления. Как видно из рисунка, мы имеем прямые экспериментальные доказательства, указывающие на то, что характер зависимости периодов полураспада от числа нейтронов резко изменился при переходе от $Z = 100$ и 102 к $Z = 104$. Можно рассчитывать, что при переходе к элементам с $Z > 104$ катастрофическое уменьшение времен жизни прекращается. Действительно, времена жизни изотопов $^{259}\text{106}$ и $^{261}\text{107}$, полученных в Дубне [3, 4], и изотопа $^{263}\text{106}$, наблюдаемого в Беркли [7], оказались близкими к временам жизни изотопов курчатовия,

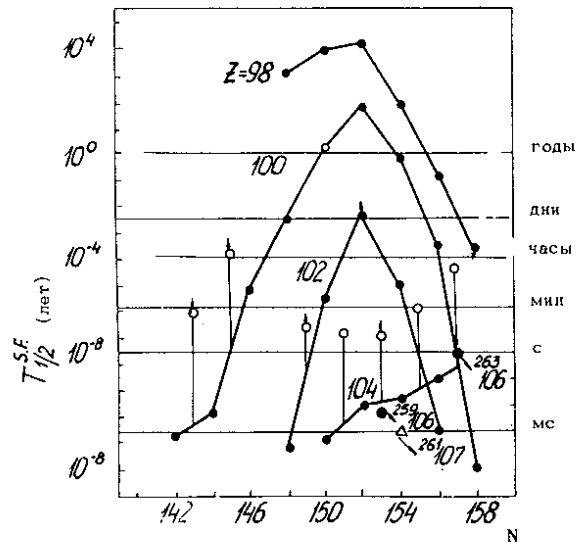


Рис. I.

Систематика периодов полураспада относительно спонтанного деления, учитывающая данные, приведенные в табл. I.

в то время как по модели жидкой капли вероятность спонтанного деления этих изотопов должна была возрасти на 10 порядков. По-видимому, здесь мы наблюдаем стабилизирующее влияние ядерных оболочек, которое, как ожидается, является единственным источником стабильности ядер в области $Z = 110-114$ и $N = 184$. В дальнейшем более количественно этот вывод был обоснован в ряде теоретических работ, посвященных вопросу стабильности сверхтяжелых элементов, из которых отметим последнюю работу Рандрупа и других [8], в которой этот вопрос рассмотрен

Таблица I.

Изотоп	Тип распада	$T_{I/2}$	Реакция
$^{242}_{\text{Fm}}$	S.F.	0,8 мс	$^{204}_{\text{Pb}}(^{40}_{\text{Ar}}, 2n)^{242}_{\text{Fm}}$
$^{250}_{\text{I02}}$	S.F.	0,25 мс	$^{233}_{\text{U}}(^{22}_{\text{He}}, 5n)^{250}_{\text{I02}}$
$^{256}_{\text{Ku}}$	S.F.	5 мс	$^{208}_{\text{Pb}}(^{50}_{\text{Tl}}, 2n)^{256}_{\text{Ku}}$
$^{255}_{\text{Ku}}$	~50% S.F. ~50% α	2 с	$^{207}_{\text{Pb}}(^{50}_{\text{Tl}}, 2n)^{255}_{\text{Ku}}$
$^{254}_{\text{Ku}}$	S.F.	0,5 мс	$^{206}_{\text{Pb}}(^{50}_{\text{Tl}}, 2n)^{254}_{\text{Ku}}$
$^{253}_{\text{Ku}}$	~50% S.F. ~50% α	1,8 с	$^{206}_{\text{Pb}}(^{50}_{\text{Tl}}, 3n)^{253}_{\text{Ku}}$
$^{257}_{\text{Ns}}$	~20% S.F. ~80% α	5,5 с	$^{208}_{\text{Pb}}(^{51}_{\text{V}}, 2n)^{257}_{\text{Ns}}$ $^{209}_{\text{Bi}}(^{50}_{\text{Tl}}, 2n)^{257}_{\text{Ns}}$
$^{255}_{\text{Ns}}$	~20% S.F. ~80% α	1,5 с	$^{207}_{\text{Bi}}(^{51}_{\text{V}}, 3n)^{255}_{\text{Ns}}$ $^{206}_{\text{Bi}}(^{51}_{\text{V}}, 2n)^{255}_{\text{Ns}}$
$^{259}_{\text{I06}}$	~70% S.F. ~30% α	7,5 мс	$^{208}_{\text{Pb}}(^{54}_{\text{Cr}}, 3n)^{259}_{\text{I06}}$ $^{207}_{\text{Pb}}(^{54}_{\text{Cr}}, 2n)^{259}_{\text{I06}}$
$^{261}_{\text{I07}}$	~20% S.F. ~80% α	1-2 мс	$^{209}_{\text{Bi}}(^{54}_{\text{Cr}}, 2n)^{261}_{\text{I07}}$ $^{208}_{\text{Pb}}(^{55}_{\text{Mn}}, 2n)^{261}_{\text{I07}}$ $^{205}_{\text{Tl}}(^{58}_{\text{Fe}}, 2n)^{261}_{\text{I07}}$

применительно к атомным ядрам в переходной области $Z = 104-108$.

Мы еще не раз будем возвращаться к области атомных ядер с $Z = 102-107$, чтобы более подробно изучить их физические и химические свойства. Однако я не думаю, что мы будем проводить систематические эксперименты с целью получения все новых подтверждений синтеза изотопа $^{260}_{\text{Ku}}$ в дискуссии с группой из Беркли. Недавно Друин и сотрудники в Дубне повторно синтезировали этот изотоп в ядерных реакциях $^{246}_{\text{Cm}}(^{18}_{\text{O}}, 4n)^{260}_{\text{Ku}}$ [9] и $^{249}_{\text{Bk}}(^{15}_{\text{N}}, 4n)^{260}_{\text{Ku}}$. В этих опытах была применена специальная

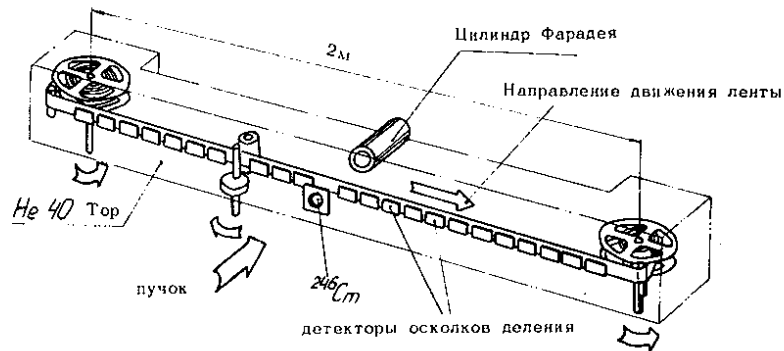


Рис.2. Схема устройства с никелевой лентой-сборником (длина ленты до 800м), для синтеза тяжелых изотопов курчатовия.

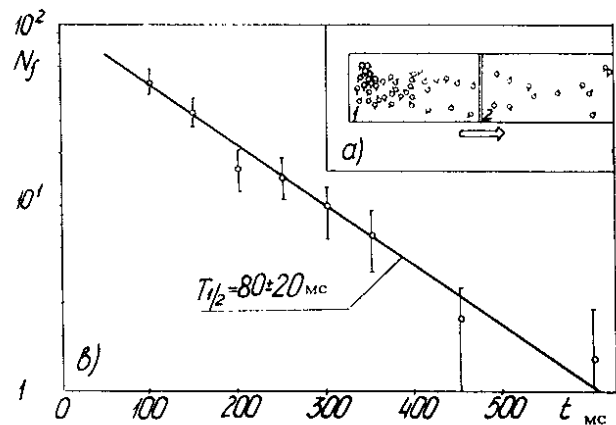


Рис.3. Временное распределение треков осколков деления, полученное при облучении кюрия ионами кислорода:
 а) геометрическое распределение на двух первых детекторах (стрела указывает направление движения сборника);
 б) кривая распада продуктов реакции $^{246}\text{Cm} + ^{18}\text{O}$.

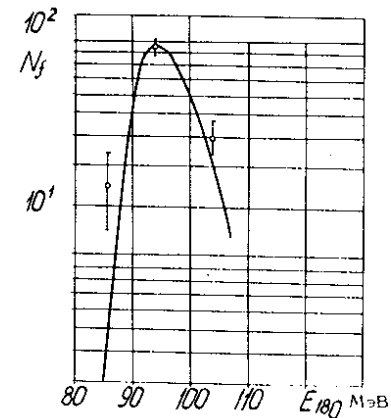


Рис.4. Зависимость от энергии ^{18}O поперечного сечения образования ^{260}Ku . Точки - эксперимент, сплошная кривая - расчет.

аппаратура (рис. 2), позволившая практически полностью исключить фон спонтанного деления продуктов реакции передачи, которые получают в больших количествах при бомбардировках таких мишеней, как ^{246}Cm и ^{249}Bk . На рис.3 показана кривая распада активности ^{260}Ku ($T_{1/2} = 80 \pm 20$ мс), и на рис. 4 - данные о функции возбуждения реакции $^{246}\text{Cm}(^{18}\text{O}, 4n)^{260}\text{Ku}$, полученные в работе [9].

Приходится сожалеть, что в течение 12 лет Гиорсо с сотрудниками из Беркли не могли наблюдать спонтанного деления изотопа ^{260}Ku . Теперь они наблюдают спонтанное деление, однако, ввиду того, что ни аппаратура, ни ядерная реакция ($^{249}\text{Bk} + ^{15}\text{N}$), избранные группой в Беркли, не являются оптимальными, авторам этой работы никак не удастся разобраться в наблюдаемых кривых распада и выделить активность с $T_{1/2} \approx 100$ мс.

Переходя теперь к проблеме существования сверхтяжелых элементов, отметим, что продолжительные и упорные поиски этих элементов в природе, начатые с 1968 года несколькими группами, не дав пока окончательного ответа, приводят нас, однако, к убеж-

дению, что эту работу нужно продолжить с новым энтузиазмом. Такой вывод основан на данных, полученных в Дубне Тер-Акопяном с сотрудниками и Зварой с сотрудниками при исследовании некоторых метеоритов и, в первую очередь, метеорита Алленце.

Экспериментальный подход, применяемый в этих исследованиях, описан в оригинальных работах (см. [10]) и в нашем докладе [II] на конференции 1974 года в Нэшвилле. Наиболее чувствительный метод поисков сверхтяжелых элементов в природных образцах из тех, которые были развиты в Дубне, состоит в обнаружении редких событий спонтанного деления путем регистрации событий множественного испускания нейтронов с помощью детекторов с ^3He - пропорциональными счетчиками. Разработав установки, которые позволяли обнаружить спонтанное деление, сопровождающееся испусканием мгновенных нейтронов с $\bar{\nu} > 1,5$, мы наблюдали такие события для метеорита Алленце. Всего в двух сериях опытов было наблюде-но 42 события, в которых было зарегистрировано два нейтрона и 3 события с тремя нейтронами.

Тщательная проверка различных возможных источников фона показала, что ни спонтанное деление урана, имеющегося в образцах метеорита, ни фон, генерируемый космическими лучами, ни собственный аппаратный фон не могут объяснить наблюдаемый эффект.

Нагревая образец метеорита Алленце весом 1,2 кг до высокой температуры, мы наблюдали в летучих продуктах спонтанное деление, регистрируемое с помощью низкофоновых пропорциональных счетчиков.

Множественность событий, зарегистрированных на нейтронном детекторе, показывает, что если мы наблюдаем спонтанное деление, то оно характеризуется числом $\bar{\nu} \leq 3$. Такая же оценка $\bar{\nu}$ получается из сравнения скорости счета на нейтронном детекторе и на счетчиках осколков деления. Как известно, прямая экстраполяция данных о $\bar{\nu}$, проведенная Никсом [12] и другими авторами, приводит к выводу о том, что величина $\bar{\nu}$ для сверхтяжелых элементов должна быть в пределах 7-10.

Однако не исключено, что низкоэнергетическое деление сверхтяжелых атомных ядер как раз характеризуется малым возбуждением осколков деления, а вследствие этого - и малым числом мгновенных нейтронов. Во всяком случае, благодаря работам по изотопам

фермия, проведенным в Лос-Аламосе и представленным на конференции на Корсике в докладе Хоффман и других [13], мы имеем экспериментальные результаты, показывающие, что эффекты оболочек, которые лежат в основе стабильности сверхтяжелых ядер, могут существенно повлиять на массовое распределение осколков деления, на их кинетическую энергию и энергию возбуждения.

Нам представляется, что продолжение исследований с метеоритом Алленце может привести в конечном счете к открытию сверхтяжелых элементов. Во всяком случае, на данной станции экспериментов мы не видим какой-либо альтернативы для объяснения полученных данных. Было бы желательно, чтобы в других лабораториях, располагающих подходящей аппаратурой, подобные работы с метеоритом Алленце, а затем и с другими образцами, были также проведены. Следует учесть, планируя такую работу, что применяемая аппаратура должна обеспечивать регистрацию редких событий спонтанного деления, характеризующихся малым числом мгновенных нейтронов ($\bar{\nu} \leq 3$).

Большое значение при поисках сверхтяжелых элементов мы придаем направлению, связанному с изучением массового распределения самой тяжелой компоненты галактических космических лучей. Эта работа проводится в Дубне Перельгиным с сотрудниками, совместно с Пелласом (Франция), которые исследуют треки релятивистских атомных ядер в минералах, входящих в состав метеоритов. Был получен большой статистический материал по распределению длин треков тяжелых космических ядер ($Z > 50$). В будущем предстоит дальнейшее увеличение объема такой информации и улучшение качества ее понимания в смысле определения более точной и надежной связи между длиной треков и атомными номерами ядер.

Проведение поисков сверхтяжелых элементов в природных образцах рассчитано на то, что могут существовать нуклиды из острова стабильности с временами жизни порядка 10^9 лет. В галактических космических лучах можно ожидать наблюдения ядер, имеющих существенно меньшие времена жизни - вплоть до 10^6 лет. Искусственный синтез позволяет, в принципе, получить самые короткоживущие изотопы вблизи $Z = 110-114$ и $N = 184$. Ряд попыток наблюдать искусственно синтезированные ядра сверхтяжелых элементов, в реакции полного слияния привел к отрицательным результатам. Изучая продукты реакции $^{238}\text{U} + ^{136}\text{Xe}$, мы наблюдали [II] в химической фракции сульфидов тяжелых металлов активность спонтанного деле-

нии, имеющую период полураспада 150 дней. Всего было наблюде-
около 40 событий. Среднее число мгновенных нейтронов, характе-
ное для этой активности, оказалось небольшим ($\bar{\nu} \approx 3,5$). Одна-
ко, как было сказано выше, для сверхтяжелых ядер, по-видимому,
не обязательно следует ожидать больших величин $\bar{\nu}$. Следова-
тельно, дальнейшее изучение наблюденной активности спонтанного
деления может привести к выводу об открытии сверхтяжелых элемен-
тов. К сожалению, мы вынуждены были отказаться от этих экспери-
ментов, так как интенсивность пучка ионов ксенона на дубненском
танце-циклотроне недостаточна для получения больших количеств
спонтанно делящихся ядер. Мы надеемся, что это направление син-
теза сверхтяжелых элементов будет развиваться в Дармштадте на
линейном ускорителе УНИЛАК, а также на коллективном ускорителе
тяжелых ионов в Дубне.

Завершив эксперименты по синтезу 106-го и 107-го элементов,
мы можем по-новому подойти к проблеме получения сверхтяжелых
элементов в реакциях полного слияния. Разработанный Оганесяном с
сотрудниками [14] метод синтеза был основан на применении реак-
ций полного слияния мишеней из свинца и висмута с такими ионами,
как ^{40}Ar , ^{50}Ti , ^{54}Cr , ^{55}Mn , ^{58}Fe . Благодаря этим работам, мы
теперь знаем, что сильно делящиеся составные ядра образуются в
реакциях с тяжелыми ионами от Ar до Fe. Закономерности обра-
зования и распада этих ядер, в общем, такие же, как в соответст-
вующих реакциях с умеренно тяжелыми ионами углерода, азота, кис-
лорода и неона. При слиянии ядер аргона, титана, хрома и марган-
ца с мишенями из висмута и свинца удалось получить составные ядра
с малой энергией возбуждения, при которой наиболее вероятными
являются реакции $(\text{HI}, 2n)$ и $(\text{HI}, 3n)$. Это обстоятельство существен-
но для синтеза сверхтяжелых элементов, так как большая энергия
возбуждения составного сверхтяжелого ядра может привести к ката-
строфическому падению вероятности его выживания из-за исчезнове-
ния оболочечных эффектов, обуславливающих его стабильность в
основном состоянии.

Теперь представляется возможным перейти к экспериментам по
синтезу сверхтяжелых элементов в реакциях полного слияния с
ионами ^{48}Ca . Исключительные возможности этих реакций обсуждаются
уже долгое время [15-17]. Большой нейтронный избыток ядра ^{48}Ca
позволяет свести к минимуму нейтронный дефицит синтезируемых

ядер по сравнению с реакциями на других ионах. С другой стороны,
энергия возбуждения составного ядра $^{292}\text{114}$, которое образуется
в реакции $^{244}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$, составляет 18 МэВ при энергии ионов каль-
ция, равной высоте кулоновского барьера. При этом наиболее ве-
роятная реакция ($^{48}\text{Ca}, 2n$) будет приводить к образованию изотопа
 $^{290}\text{114}$, удаленного от дважды магического ядра $^{298}\text{114}$ всего на
8 нейтронов.

Несмотря на столь очевидные достоинства, ионы ^{48}Ca до сих
пор нигде не ускорялись. Причина этого состоит в том, что содер-
жание ^{48}Ca в естественной смеси изотопов кальция очень мало
(0,18%), а выделение его - задача весьма сложная и дорогостоя-
щая. В связи с этим мы сочли возможным перейти к экспериментам
с пучком ^{48}Ca только после того, как был накоплен опыт изучения
образования изотопов Fm, Ku, 106-го и 107-го элементов в
реакциях с ионами Ar, Ti, Cr.

Для ускорения ионов ^{48}Ca был применен несколько усовершен-
ствованный ионный источник, на котором ранее получались высоко-
зарядные ионы от Sc до Ge. В результате на циклотроне У-300
ОИЯИ был получен внутренний пучок ионов $^{48}\text{Ca}^{+7}$ с энергией 255
МэВ и интенсивностью $1,7 \cdot 10^{12}$ частиц в секунду при расходе изо-
топа 10 мг/час ($4 \cdot 10^{16}$ атомов/с).

Первые опыты с пучком ^{48}Ca имели целью проверить их исключи-
тельные преимущества для целей синтеза, о которых говорилось
выше. В качестве модельной была выбрана реакция ($^{48}\text{Ca}, xn$)
 $^{252}\text{102}$. Изотоп $^{252}\text{102}$ ($T_{1/2} = 2,3$ с) регистрировался путем
наблюдения его спонтанного деления. Минимальные энергии возбуж-
дения составных ядер составляют 17-18 МэВ, и можно было ожидать,
что реакции с испарением малого числа нейтронов будут иметь
сравнительно большие сечения. Результаты опытов и сравнение
экспериментальных и расчетных поперечных сечений приведены
в табл.2.

Таблица 2.

Реакция	E_T МэВ	$N_{F.F.}$	σ (см ²)	
			эксперимент	расчет
$^{208}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 4n)^{252}\text{I}02$	235	30	$1,5 \cdot 10^{-32}$	$3 \cdot 10^{-32}$
$^{207}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 3n)^{252}\text{I}02$	235	59	10^{-31}	$3 \cdot 10^{-31}$
$^{206}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 2n)^{252}\text{I}02$	235	438	$5 \cdot 10^{-31}$	$2,5 \cdot 10^{-31}$
$^{204}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, \gamma)^{252}\text{I}02$	235	3	$< 5 \cdot 10^{-34}$	-

Как видно из табл.2, поперечные сечения реакций, приводящих к изотопу $^{252}\text{I}02$, велики, причем наибольшую величину имеет сечение реакции с вылетом двух нейтронов ($5 \cdot 10^{-31} \text{ см}^2$). Эта величина примерно в 40 раз превосходит сечения реакций с ионами ^{18}O и ^{22}Ne , приводящих к тому же продукту. В табл.2 приведено также предельное значение поперечного сечения реакции радиационного захвата ^{48}Ca , полученное при облучении мишени из ^{204}Pb с обогащением 99,9%.

Приведенные результаты подтверждают вывод о том, что пучок ионов ^{48}Ca действительно дает уникальные возможности для синтеза сверхтяжелых элементов. Переход от изотопов свинца к мишеням из урана, плутония или кюри приведет к некоторому увеличению минимальных энергий возбуждения составных ядер, однако они не будут превышать 20-25 МэВ. При таких энергиях возбуждения не исключено, что в определенной доле случаев составные ядра будут переходить в основное состояние с испусканием малого числа нейтронов. С другой стороны, при интенсивности пучка ионов 10^{12} I/c можно зарегистрировать образование сверхтяжелых элементов, если сечение реакций синтеза составит 10^{-34} и даже 10^{-35} см^2 .

Наряду с перспективой синтеза сверхтяжелых ядер пучок ионов ^{48}Ca обещает новые возможности в постановке некоторых интересных ядерно-физических экспериментов. Так, исследование прямых ядерных реакций на ^{48}Ca позволит получить сведения о протонном и нейтронном факторах этого дважды магического ядра, имеющего в то же самое время 8 нейтронов сверх оболочки $N = 20$. Возможно, удастся получить сведения о степени стабильности тетра-

нейтрона в поле дважды магического ядра ($Z = 20, N = 20$). Пучок ^{48}Ca представляет также интерес с точки зрения получения ряда новых нейтронно-избыточных изотопов в реакциях передачи и деления. Например, измеренные массовые распределения продуктов

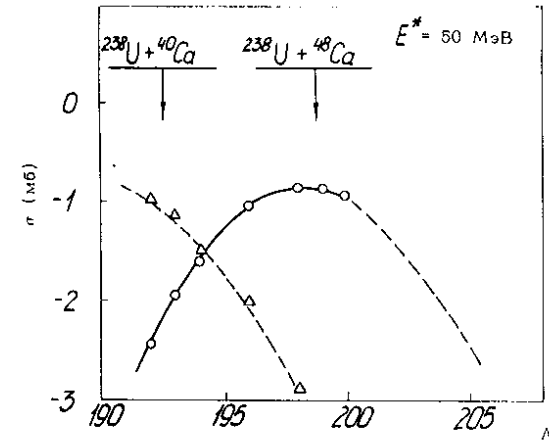


Рис. 5. Массовые распределения изотопов золота, образующихся в реакциях $^{238}\text{U} + ^{40}\text{Ca}$ и $^{238}\text{U} + ^{48}\text{Ca}$.

реакции $^{238}\text{U} + ^{48}\text{Ca}$ (см.рис.5) позволяют рассчитывать на получение таких тяжелых изотопов золота, как ^{203}Au , ^{204}Au , ^{205}Au . Пучок ионов ^{48}Ca открывает новые возможности для изучения запаздывающего деления ядер, так как благодаря выгодному энергетическому балансу соответствующие изотопы из области актиноидов могут быть получены с большим поперечным сечением.

ЛИТЕРАТУРА:

1. С.М.Поликанов, В.А.Друин, В.А.Карнаухов, В.Л.Михеев, А.А.Писев, и др. ЖЭТФ 42, (1962), 1464.
2. В.И.Кузнецов, Н.К.Скобелев, Г.Н.Флеров. ЯЭ, 4, (1966), 271.
3. Ю.Ц.Оганесян и др. Письма в ЖЭТФ 20 (1974) 580.
4. Ю.Ц.Оганесян и др. Письма в ЖЭТФ 23 (1976) 306.
5. Ю.Ц.Оганесян и др. Nucl.Phys. A239(1975)157.

6. Г.М.Тер-Акопян и др. Nucl.Phys. 4255(1975)509.
7. A.Ghiorso et al. Phys.Rev.Lett. 33(1974)1490.
8. T.Randrup et al. Phys.Rev. C13(1976)229.
9. В.А.Друин и др. Препринт ОИЯИ Е7-9546, Дубна, 1976.
10. Г.М.Тер-Акопян, А.Г.Попеко, Н.К.Скобелев, Г.Н.Гончаров.
Phys.Lett. 523(1974)417.
11. G.N.Flerov. Proc. of the Intern.Conf. on Reactions between
Complex Nuclei, Nashville, USA, v.2 p.459, 1974.
12. J.R.Nix. Phys.Lett. 30B(1969)1.
13. D.C.Hoffman et al. Papers submitted to the 3rd Intern.Conf.
on Nuclei Far from Stability, Cargese, Corsica (France) 1976.
14. В.И.Оганесян и др. Nucl.Phys. A239(1975)353.
15. Г.Н.Флеров, in Future of Nuclear Structure Studies, Vienna,
IAEA (1969) p.11.
16. W.J.Swiatecki, S.F.Psang. Annual Report LBL-666(1971) p.138.
17. J.R.Nix. Proc. Intern. Conf. on Nuclear Physics, Munich 1973,
v.2 p.361.

Рукопись поступила в издательский отдел
9 июля 1976 года