

Сверхтяжелые элементы Периодической системы

Д.И.Менделеева

Ю.Ц.Оганесян, С.Н.Дмитриев

Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н.Флерова

Объединенного института ядерных исследований

141980 Дубна Московской обл., ул. Жолио Кюри, 6, факс (496) 212–8933

Обобщены и проанализированы результаты работ по синтезу новых элементов Периодической системы Д.И.Менделеева. Особое внимание уделено синтезу и изучению химических свойств новых сверхтяжелых элементов, образующихся в реакциях полного слияния ионов ^{48}Ca с ядрами актинидов. Рассмотрены перспективы синтеза элемента 117, а также элементов 118 и далее.

Библиография — 37 ссылок.

Оглавление

I. Введение	1165
II. Синтез первых трансактинидов	1166
III. Изотопы сверхтяжелых элементов	1167
IV. Химическая идентификация и свойства сверхтяжелых элементов	1170
V. Перспективы	1173

I. Введение

Периодический закон и Периодическая система химических элементов, предложенные Д.И.Менделеевым 140 лет назад, сыграли определяющую роль в открытии новых стабильных и радиоактивных элементов. Но и сегодня остается открытым вопрос о границе Периодической таблицы.

Согласно квантовой электродинамике, концепция строения атома как системы, состоящей из ядра и находящихся на достаточно большом расстоянии от него электронных оболочек, справедлива и для элементов с атомными номерами (Z) 170 и более. Однако предел существования атомов (элементов) достигается гораздо раньше ввиду неустойчивости самого ядра.

Из приблизительно 2700 изотопов, известных на данный момент, только 287 дожили до настоящего времени с момента их ядерного синтеза. Хорошо известно, что измене-

ния в соотношении протонов и нейтронов в ядрах приводят к β -распаду. Избыток нейтронов в ядре приводит к уменьшению энергии связи нейтронов; предел существования нейтронно-избыточных ядер достигается при $E_n = 0$ (линия нейтронной стабильности). Аналогично, границу существования протонно-избыточных ядер определяет нулевая энергия связи протонов $E_p = 0$ (линия протонной стабильности).

Еще одна граница связана с максимально возможным числом нуклонов в ядре. Формально предельная масса ядра вблизи границ его стабильности — даже при наиболее благоприятном соотношении протонов и нейтронов (ядра, оказывающиеся на линии бета-стабильности) — определяется спонтанным делением (СД, SF). Впервые этот тип ядерных превращений тяжелых нуклидов наблюдался для изотопа ^{238}U (с временем жизни $T_{\text{SF}} = 10^{16}$ лет) Петржаком и Флеровым¹ в 1940 г. К тому времени Ган и Штрассман² уже открыли вынужденное деление ядер урана. Для описания этого явления Бор и Уилер³ предложили жидкокапельную модель ядерного деления.

Эта замечательная классическая теоретическая модель основана на предположении, что ядро состоит из аморфного (бесструктурного) вещества и представляет собой сферу с электрическим зарядом, равномерно распределенным по всему объему, подобно капле заряженной жидкости. Деформация заряженного ядра под действием кулоновских сил отталкивания между зарядами на концах вытянутого ядра постепенно приводит к его делению на две части с приблизительно равными массами. Деление происходит после преодоления потенциального барьера, препятствующего ядерной деформации. В случае ядра ^{238}U высота барьера, препятствующего делению, равна примерно 6 МэВ. С увеличением атомного номера высота барьера быстро умень-

Ю.Ц.Оганесян. Академик, профессор, научный руководитель ЛЯР ОИЯИ. Телефон: (496) 216–2261, e-mail: oganessian@jinr.ru
Область научных интересов: синтез и изучение свойств сверхтяжелых элементов, структура легких экзотических ядер, реакции слияния – деления, прикладные ядерно-физические исследования.
С.Н.Дмитриев. Доктор физико-математических наук, профессор, директор той же лаборатории. Телефон: (496) 216–5858, e-mail: dmitriev@jinr.ru
Область научных интересов: синтез и изучение химических свойств сверхтяжелых элементов, ультрачистые радиоизотопы, прикладные ядерно-физические и радиохимические исследования.

Дата поступления 31 июля 2009 г.

шается, и при некотором критическом значении Z ядро становится абсолютно нестабильным по отношению к спонтанному делению ($T_{SF} \approx 10^{-19}$ с). По оценкам Бора и Уилера,³ эта критическая ситуация наступает, как только заряд ядра достигает значения $Z \geq 100$.

Радиоактивные свойства трансурановых элементов, синтезированных в 1940–1950-х гг. Сиборгом с сотр. в реакциях с захватом нейтронов на высокопоточных атомных реакторах и в реакциях ядерных взрывов, качественно подтвердили жидкокапельную модель ядра: при переходе от ^{238}U ($Z = 92$) к ^{257}Fm ($Z = 100$) вероятность спонтанного деления возросла более чем на 13 порядков. Однако открытие в 1960-х годах спонтанного деления изомеров актинидов (спонтанно делящиеся изомеры) и обнаружение зависимости парциальных периодов спонтанного деления от числа нейтронов в ядре, наиболее ярко выраженных у изотопов Cf, Fm и No,⁴ показали несостоятельность жидкокапельной модели ядра в описании полной картины деления ядер, особенно в описании стабильности ядер.

Вместе с тем было обнаружено, что отклонения экспериментальных значений энергий связи нуклонов в ядрах от предсказанных классической жидкокапельной моделью носят регулярный характер: они максимальны (наибольшая энергия связи) при определенных, так называемых «магических»[†] числах протонов или нейтронов в ядре.

Как правило, в практических расчетах оболочечные эффекты описываются в терминах оболочечной поправки к плавным изменениям массы ядер с ростом числа нуклонов в ядре. Феноменологическое описание масс ядер с учетом эффекта ядерных оболочек было впервые осуществлено Святецким и Майерсом.⁵ Немного позже (в 1967 г.) Струтинским⁶ был разработан оригинальный метод расчета оболочечных поправок к жидкокапельной модели ядра. Они легли в основу макро-микроскопической модели, согласно которой полная энергия ядра представляется как сумма энергий

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{ld}} + \Delta E_{\text{shell}},$$

где E_{ld} — энергия ядра в жидкокапельной модели, ΔE_{shell} — поправка, учитывающая оболочечную структуру ядра и парные корреляции нуклонов. Расчеты, проведенные в рамках макро-микроскопической модели, указывают на существование значительного стабилизирующего эффекта ядерной оболочки не только в сферических, но и в деформированных ядрах. Это дало возможность существенно увеличить точность определения масс и форм ядер в основном состоянии. В противоположность широко распространенному мнению о том, что оболочечные эффекты исчезают при увеличении ядерной деформации, оказалось, что в сильнодеформированных ядрах оболочечные эффекты не исчезают, а только изменяются (происходит перераспределение нуклонов). Они по-прежнему вносят существенный вклад в определение полной потенциальной энергии ядра. Одним из фундаментальных следствий макро-микроскопической теории явилось предсказание^{7–9} существования так называемого «острова стабильности» в области гипотетических сверхтяжелых элементов (СТЭ), расположенных вблизи предполагаемых новых замкнутых оболочек $Z = 114$, $N = 184$ («магические» числа протонов и нейтронов). Эти предсказания стимулиро-

вали развитие работ по синтезу СТЭ, прогнозированию и изучению их химических свойств, поиску СТЭ в природе и др.

II. Синтез первых трансаактинидов

Многие искусственные химические элементы тяжелее урана были открыты в реакциях последовательного захвата нейтронов ядрами изотопа ^{235}U ((n, γ) -реакции) при длительных экспозициях на высокопоточных ядерных реакторах. И сегодня этот метод остается основным для получения изотопов элементов с $Z = 93–100$. Однако его использование для дальнейшего продвижения в область более тяжелых ядер оказалось невозможным из-за исключительно короткого периода полураспада изотопов элементов с $Z > 100$.

Все известные на сегодня изотопы элементов с $Z > 100$ были синтезированы в реакциях с ускоренными тяжелыми ионами. В этом методе в процессе слияния ядра-мишени с тяжелым ионом в ядро-мишень вносится вся масса бомбардирующего ядра. Энергию возбуждения составного ядра (компаунд-ядра), образующегося при слиянии ядер мишени и ускоренного тяжелого иона (частицы), можно представить следующей формулой:

$$E_x = E_p - [M_{\text{CN}} - (M_T + M_P)] = E_p - Q,$$

где E_p — энергия частицы, M_{CN} , M_T и M_P — массы компаунд-ядра, ядер мишени и налетающей частицы соответственно, Q — энергия, выделяющаяся в процессе деления.

Минимальная энергия возбуждения реализуется при пороговой энергии реакции слияния, соответствующей в первом приближении кулоновскому барьеру реакции (B_c):

$$E_x^{\text{min}} = B_c - Q.$$

В случае тяжелых ядер мишени $B_c \approx 5$ МэВ·нуклон⁻¹.

В отличие от (n, γ) -реакций, где энергия возбуждения ядра составляет около 6–8 МэВ, в реакциях слияния даже с такими легкими ионами, как ^4He , $E_x^{\text{min}} \approx 20$ МэВ. С увеличением массы налетающей частицы энергия возбуждения компаунд-ядра будет расти вследствие увеличения кулоновского барьера. Охлаждение горячего ядра, т.е. его переход в основное состояние ($E_x = 0$), будет осуществляться в основном через эмиссию нейтронов и γ -лучей.

Сечение образования продуктов после испарения нейтронов может быть записано в виде

$$\sigma_{\text{xn}}(E_x) = \sigma_{\text{CN}}(E_x) P_{\text{xn}} \prod_{i=1}^x \left[\frac{\Gamma_n}{\Gamma_{\text{tot}}}(E_x) \right]_i,$$

где $\sigma_{\text{CN}}(E_x)$ — сечение образования компаунд-ядра с энергией E_x , P_{xn} — вероятность его охлаждения посредством нейтронной эмиссии, $\Gamma_n/\Gamma_{\text{tot}}$ — отношение ширин (вероятностей) испускания нейтронов к полной ширине распада на каждой ступени последовательной эмиссии нейтронов.

Отношение $\Gamma_n/\Gamma_{\text{tot}}$ может быть рассчитано в рамках статистической теории при определенных предположениях о термодинамических свойствах нагретого ядра. Величина $\sigma_{\text{xn}}(E_x)$, характеризующая вероятность выживания продуктов испарения, резко уменьшается с ростом E_x (это равносильно увеличению числа каскадов испарения нейтронов). Ситуация усугубляется тем, что оболочечная поправка, препятствующая делению ядра в основном состоянии, быстро уменьшается с увеличением энергии возбуждения ядра. Оба эти фактора сводят к минимуму вероятность выживания тяжелых компаунд-ядер. По отношению к реакциям нейтронного захвата, ведущим к образованию актинидов с сече-

[†] Используя терминологию атомной физики, «магические» числа соответствуют замкнутым протонным и нейтронным оболочкам ядра.

нием образования в десятки и сотни барн, сечение образования трансактинидов в реакциях с тяжелыми ионами составляет всего 10^{-6} – 10^{-4} барн и экспоненциально убывает при продвижении в область СТЭ. Однако, несмотря на столь низкие значения сечения образования, реакции с тяжелыми ионами являются, по существу, единственным способом синтеза элементов с $Z > 100$.

Поскольку величина сечения образования тем больше, чем меньше значение $E_x^{\min}$, долгое время считалось, что предпочтительными являются наиболее асимметричные реакции, т.е. реакции с максимально возможной тяжелой мишенью и легким бомбардирующим ядром. В этом случае значения $E_x^{\min}$ составляют ≥ 50 МэВ. Такие реакции получили название реакций «горячего слияния». Основные усилия при подготовке к такому эксперименту затрачиваются на получение в высокопоточных реакторах весомых количеств наиболее тяжелых изотопов трансурановых элементов от Pu до Fm, которые используются в качестве мишени. Работы, проведенные в этом направлении в 1960-х – начале 1970-х годов в Берклиевской национальной лаборатории им. Лоуренса (США) и Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ (Дубна), привели к открытию изотопов трех последних элементов из серии актинидов ($_{101}\text{Md}$, $_{102}\text{No}$, $_{103}\text{Lr}$) и изотопов первых трех трансактинидных элементов ($_{104}\text{Rf}$, $_{105}\text{Db}$, $_{106}\text{Sg}$). Первые результаты по синтезу изотопов элементов 104–106 были получены группами Флерова (Дубна) и Сиборга (Беркли) в реакциях $^{242}\text{Pu}(^{22}\text{Ne}, \text{xn})^{259, 260}\text{Rf}$, $^{249}\text{Cf}(^{12}\text{C}, 4\text{n})^{257}\text{Rf}$, $^{249}\text{Cf}(^{13}\text{C}, 3\text{n})^{259}\text{Rf}$, $^{243}\text{Am}(^{22}\text{Ne}, \text{xn})^{260, 261}\text{Db}$, $^{249}\text{Cf}(^{15}\text{N}, 4\text{n})^{260}\text{Db}$ и $^{249}\text{Cf}(^{18}\text{O}, 4\text{n})^{263}\text{Sg}$.

В начале 70-х годов прошлого столетия в Дубне было показано, что реакции слияния магических ядер имеют определенные преимущества по сравнению с асимметричными реакциями «горячего слияния». При использовании в качестве мишени дважды магического изотопа ^{208}Pb , а в качестве налетающих частиц — ионов с массой $A \geq 50$ значение $E_x^{\min}$ уменьшается до 10–20 МэВ, что существенно увеличивает вероятность выживания компаунд-ядер. Такие реакции получили название реакций «холодного слияния». С их использованием в 1980-х – 1990-х годах в Дармштадте (Германия) и Дубне были синтезированы легкие нейтронно-дефицитные изотопы элементов 107–112.

К концу века (1999 г.), спустя почти 60 лет после открытия первых искусственных трансурановых элементов — нептуния и плутония — удалось продвинуться до 112-го элемента. К этому времени были получены 10 изотопов 104-го элемента ($^{253-262}\text{Rf}$), 8 изотопов 105-го ($^{255-258}\text{Db}$ и $^{260-263}\text{Db}$), 6 изотопов 106-го ($^{259-261}\text{Sg}$ и $^{263, 265, 266}\text{Sg}$), 6 изотопов 107-го ($^{260, 261, 262, 264, 266, 267}\text{Bh}$), 4 изотопа 108-го ($^{262-265}\text{Hs}$), 2 изотопа 109-го ($^{266, 268}\text{Mt}$), 3 изотопа 110-го ($^{267, 269, 271}\text{Ds}$), 1 изотоп 111-го (^{272}Rg) и 1 изотоп 112-го ($^{277}\text{112}$) элементов. Для большинства из указанных изотопов достаточно надежно определены типы распада и времена жизни, а для отдельных изотопов также рассчитаны дефекты масс и квантовые характеристики низколежащих уровней.

Особый интерес представляли относительно долгоживущие изотопы, синтез которых позволил не только определить их ядерно-физические характеристики, но и исследовать химическое поведение, в частности сравнить его с поведением более легких гомологов. В табл. 1 приведены времена жизни, способы получения и основные моды распада изотопов элементов 104–108.

Для исследования свойств трансактинидов использовались методы термохроматографии (элементы 104–108) и различные варианты ионообменной и экстракционной хро-

Таблица 1. Изотопы трансактинидов для химических исследований.

Изотоп	$T_{1/2}$, с	Ядерная реакция	Основные моды распада
$^{261\text{m}}\text{Rf}$	81	$^{248}\text{Cm}(^{18}\text{O}, 5\text{n})$ $^{244}\text{Pu}(^{22}\text{Ne}, 5\text{n})$	α α
^{262}Db	35	$^{249}\text{Bk}(^{18}\text{O}, 5\text{n})$ $^{248}\text{Cm}(^{19}\text{F}, 5\text{n})$	α , SF α , SF
^{263}Db	29	$^{249}\text{Bk}(^{18}\text{O}, 4\text{n})$	α
^{265}Sg	7.4	$^{248}\text{Cm}(^{22}\text{Ne}, 5\text{n})$	α , SF
^{266}Sg	21	$^{248}\text{Cm}(^{22}\text{Ne}, 4\text{n})$	SF, α
^{267}Bh	22	$^{249}\text{Bk}(^{22}\text{Ne}, 5\text{n})$	α
^{269}Hs	27	$^{248}\text{Cm}(^{26}\text{Mg}, 5\text{n})$	α , SF

матографии (элементы 104–106). Особенности химических экспериментов, проводимых со столь короткоживущими изотопами, подробно описаны в работах Шеделя,¹¹ Гусевой¹² и Звары.¹³ Здесь мы отметим лишь, что в этих опытах не было обнаружено сколько-нибудь значимых различий в химических свойствах элементов 104–108 в сравнении с их более легкими гомологами.

III. Изотопы сверхтяжелых элементов

Выше отмечалось, что до 2000 г. самые тяжелые элементы (вплоть до 112-го) были синтезированы в реакциях «холодного слияния». К сожалению, эти реакции не могут быть использованы для синтеза ядер, находящихся в пределах предсказанного теорией «острова стабильности» СТЭ. Образующееся при слиянии ядер ^{208}Pb и ^{76}Ge компаунд-ядро $^{284}114$ ($N = 170$) содержит на 14 нейтронов меньше, чем требуется для замкнутой нейтронной оболочки ($N = 184$). При столь значительном дефиците нейтронов в компаунд-ядре продукты испарения нейтронов будут располагаться далеко от границы предсказанного «острова стабильности». Отметим, что никакие варианты слияния стабильных и даже долгоживущих изотопов не могут привести к ядрам на «вершине» острова стабильности. Поэтому желательно подойти как можно ближе к границам этой неизвестной области, с тем чтобы войти в зону действия замкнутой сферической оболочки с $N = 184$. Нуклиды, содержащие большое число нейтронов, могут в принципе быть получены при использовании в качестве мишени изотопов тяжелых актинидов с $Z = 94$ – 98 , а в качестве налетающей частицы — редкого изотопа ^{48}Ca .

Теря возможность использования в реакциях холодного слияния магических ядер ^{208}Pb при переходе к нейтронно-избыточным изотопам актинидов, мы вновь приобретаем магические числа протонов и нейтронов в налетающей частице ^{48}Ca .

При слиянии изотопов тяжелых актинидов с магическим ядром ^{48}Ca энергия возбуждения компаунд-ядра составляет ~ 30 МэВ. Можно ожидать, что при этой энергии возбуждения оболочечные эффекты все еще заметны в нагретом ядре и вероятность выживания продуктов испарения больше, чем в обычных реакциях горячего слияния, для которых $E_x \geq 50$ МэВ. Кроме того, асимметрия масс и зарядов ядер во входном канале должна привести к уменьшению кулоновского отталкивания ядер ($Z_1 \times Z_2 \leq 2000$) и, следовательно, к увеличению сечения образования компаунд-ядра $^{284}114$ по сравнению с сечением образования этого ядра в реакции холодного слияния $^{208}\text{Pb} + ^{76}\text{Ge}$ ($Z_1 \times Z_2 = 2624$).



Рис. 1. Ускорительный комплекс ЛЯР им. Г.Н.Флерова, ОИЯИ.

Несмотря на очевидные преимущества, все попытки синтезировать новые СТЭ в реакциях с ионами ^{48}Ca , предпринятые в 1977–1985 гг. в различных лабораториях мира (см. работы ^{14,15}), завершились лишь получением верхних пределов сечений их образования. В то же время прогресс в экспериментальной технике, достигнутый за последние годы, и возможность получения интенсивных пучков ионов ^{48}Ca на ускорителях тяжелых ионов нового поколения позволили нам сделать существенный шаг вперед — поднять чувствительность экспериментов на два или даже три порядка.

Эксперименты проводились на ускорительном комплексе Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова (ЛЯР) ОИЯИ (рис. 1). Исследовались реакции ионов ^{48}Ca с уникальными нейтронно-обогащенными изотопами трансактинидов (Act): $^{242,244}\text{Pu}$, ^{243}Am , $^{245,248}\text{Cm}$ и ^{249}Cf . Мишени в виде вращающегося ($2000 \text{ об} \cdot \text{мин}^{-1}$) диска из тонкой (1.5 мкм) титановой фольги общей площадью 32 см^2 с нанесенным на нее слоем трансактинида (в виде оксида) толщиной $0.35\text{--}0.40 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2}$ облучались ионами ^{48}Ca заданной энергии. Средняя интенсивность пучка ионов, падающих на мишень, составляла $6 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$.

Ядра отдачи, выбитые из мишени, отделялись от первичного пучка, рассеянных частиц пучка и мишени, а также от побочных продуктов реакций передач с помощью газонаполненного сепаратора и имплантировались в фокальный полупроводниковый детектор ($4 \times 12 \text{ см}^2$) с 12 вертикальными позиционно-чувствительными стрипами, расположенный в фокальной плоскости сепаратора на расстоянии 4 м от мишени. Фокальный детектор был дополнительно окружен восемью боковыми детекторами ($4 \times 4 \text{ см}^2$) для регистрации α -частиц и осколков спонтанного деления от распада имплантированных ядер. Это повышало эффективность регистрации α -частиц, которая составляла 87% от 4п. Перед фокальным детектором располагался время-пролетный (TOF) детектор для счета частиц. Время пролета сверхтяжелых ядер от мишени до фокального детектора составляло $\sim 1 \text{ мкс}$. За фокальным детектором находился «вето»-детектор, предназначенный для исключения сигналов от слабоионизирующих частиц.

Эффективность регистрации одного осколка от спонтанного деления ядер составляла 100%, двух осколков — около 40%. Схема экспериментов приведена на рис. 2. Условия экспериментов (реакция, характеристика мишени, энергия и

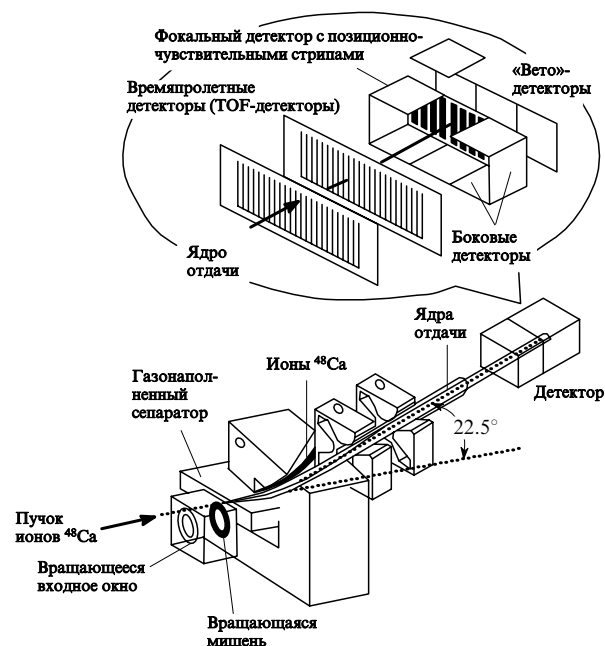


Рис. 2. Схема экспериментов по синтезу сверхтяжелых элементов на газонаполненном сепараторе.

интегральная доза ^{48}Ca -ионов) и количество зарегистрированных в различных каналах реакций цепочек распада ($2n-5n$) новых нуклидов приведены в табл. 2.

В реакциях, приведенных в табл. 2, было зарегистрировано 86 цепочек распада (суммарное число событий). Почти все цепочки распада характеризуются последовательными α -распадами материнского, а затем и дочерних нуклидов (от одного до шести) и обрываются спонтанным делением. В нескольких случаях спонтанное деление наблюдалось непосредственно для материнских нуклидов. Цепочки с одинаковыми характеристиками (модой распада, энергией и временем распада) были отнесены к распаду одних и тех же нуклидов, независимо от того, как они были получены — в прямой реакции или в реакциях с участием дочерних продуктов распада более тяжелых нуклидов.

Идентификация атомных номеров новых нуклидов проводилась различными независимыми методами, основанными на

- механизме реакций слияния (функции возбуждения);
- характеристиках распада ядер (на периоде полураспада ($T_{1/2}$) и энергии α -распада (Q_{α}) для четно-четных и многих четно-нечетных изотопов) [‡];
- химической идентификации атомных номеров изотопов ^{268}Db и $^{283}\text{112}$ в коррелированных цепочках распада $115 \rightarrow 113 \rightarrow \text{Rg} \rightarrow \text{Mt} \rightarrow \text{Bh} \rightarrow (\text{Db})$ и $116 \rightarrow 114 \rightarrow (112) \rightarrow \text{Ds} \rightarrow \text{Hs} \rightarrow \text{Sg} \rightarrow \text{Rf}$.

Итогом проведенных экспериментов явилось открытие 13 изотопов новых сверхтяжелых элементов с атомными номерами 113–116 и 118, а так же 21 нового изотопа ранее известных трансактинидов с $Z = 104\text{--}112$. Характеристики распада новых нуклидов приведены в табл. 3.

[‡] Четно-четные, четно-нечетные и нечетно-нечетные изотопы — изотопы, содержащие соответствующее число протонов и нейтронов.

Таблица 2. Условия экспериментов и число зарегистрированных событий распада продуктов реакций Act + ^{48}Ca .

Реакция	Толщина мишени, $\text{мг} \cdot \text{см}^{-2}$	Изотопное обогащение, %	E_{LAB} , МэВ	E_x , МэВ	Доза ионов ^{48}Ca на мишени	Число событий				Ссылки
						2n	3n	4n	5n	
$^{233}\text{U} + ^{48}\text{Ca}$	0.44	99.97	240	32.7–37.1	$0.70 \cdot 10^{19}$	—	—	—	—	16
$^{238}\text{U} + ^{48}\text{Ca}$	0.35	99.3	230	29.3–33.5	$0.58 \cdot 10^{19}$	—	1	—	—	16
			234	32.9–37.2	$0.71 \cdot 10^{19}$	—	6	—	—	16
			240	37.7–41.9	$0.52 \cdot 10^{19}$	—	—	1	—	16
$^{237}\text{Np} + ^{48}\text{Ca}$	0.35	99.3	244	36.9–41.2	$1.10 \cdot 10^{19}$	—	2	—	—	17
$^{242}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$	0.40	99.98	235	30.4–34.7	$0.50 \cdot 10^{19}$	1	5	—	—	16
			238	33.1–37.4	$0.49 \cdot 10^{19}$	—	5	—	—	16
			244	38.0–42.4	$0.47 \cdot 10^{19}$	—	5	7	—	16
			250	43.0–47.2	$0.32 \cdot 10^{19}$	—	—	2	—	16
$^{244}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$	0.38	98.6	231	29.8–32.9	$0.46 \cdot 10^{19}$	—	—	—	—	18
			236	32.9–37.4	$1.50 \cdot 10^{19}$	—	2	—	—	18
			243	38.9–43.0	$0.40 \cdot 10^{19}$	—	2	7	—	19
			250	44.9–49.0	$0.31 \cdot 10^{19}$	—	1	4	—	19
			257	50.4–54.7	$0.29 \cdot 10^{19}$	—	—	1	1	19
$^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$	0.36	99.9	248	38.0–42.3	$0.43 \cdot 10^{19}$	—	3	—	—	20, 21
			253	42.4–46.5	$0.43 \cdot 10^{19}$	—	—	1	—	20, 21
$^{245}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$	0.35	98.7	243	30.9–35.0	$1.20 \cdot 10^{19}$	2	3	—	—	19
			249	35.9–39.9	$0.54 \cdot 10^{19}$	1	5	—	—	22
			255	40.7–44.8	$0.83 \cdot 10^{19}$	—	4	—	—	22
$^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$	0.32	96.3	240	30.4–35.8	$0.66 \cdot 10^{19}$	—	3	—	—	23
	0.35	97.4	247	36.8–41.1	$0.70 \cdot 10^{19}$	—	2	6	—	16
$^{249}\text{Cf} + ^{48}\text{Ca}$	0.23	97.3	245	26.6–31.7	$2.50 \cdot 10^{19}$	—	1	—	—	24
	0.34	> 98	251	32.1–36.6	$1.60 \cdot 10^{19}$	—	2	—	—	22

Таблица 3. Характеристики распада сверхтяжелых элементов.

Z	A	Число наблюдений	Вид распада (%)	$T_{1/2}$ (см. ^a)	Расчетное значение $T_{1/2}$	E_α , МэВ	Q_α , МэВ
118	294	3	α	$0.89^{+1.07}_{-0.31}$ мс	0.4 мс	11.65 ± 0.06	11.81 ± 0.06
116	293	4	α	61^{+57}_{-20} мс	80 мс	10.54 ± 0.06	10.69 ± 0.06
	292	5	α	18^{+16}_{-6} мс	40 мс	10.66 ± 0.07	10.80 ± 0.07
	291	3	α	18^{+22}_{-6} мс	20 мс	10.74 ± 0.07	10.89 ± 0.07
	290	10	α	$7.1^{+3.2}_{-1.7}$ мс	10 мс	10.84 ± 0.08	11.00 ± 0.08
	288	3	α	87^{+105}_{-30} мс	60 мс	10.46 ± 0.06	10.61 ± 0.06
115	287	1	α	32^{+155}_{-14} мс	30 мс	10.59 ± 0.09	10.74 ± 0.09
	289	10	α	$2.6^{+1.2}_{-0.7}$ с	2 с	9.82 ± 0.05	9.96 ± 0.05
	288	18	α	$0.80^{+0.27}_{-0.16}$ с	0.9 с	9.94 ± 0.06	10.08 ± 0.06
	287	16	α	$0.48^{+0.16}_{-0.09}$ с	0.5 с	10.02 ± 0.06	10.16 ± 0.06
114	286	24	α (50)/SF (50)	$0.13^{+0.04}_{-0.02}$ с	0.2 с	10.19 ± 0.06	10.33 ± 0.06
	284	3	α	$0.48^{+0.58}_{-0.17}$ с	0.3 с	10.00 ± 0.06	10.15 ± 0.06
	283	1	α	100^{+490}_{-45} мс	140 мс	10.12 ± 0.09	10.26 ± 0.09
	282	2	α	73^{+134}_{-29} мс	6 мс	10.63 ± 0.08	10.78 ± 0.08
112	285	10	α	29^{+13}_{-7} с	50 с	9.15 ± 0.05	9.28 ± 0.05
	284	19	SF	97^{+31}_{-19} мс			9.80
	283	22	α (≤ 100)/SF (≤ 10)	$3.8^{+1.2}_{-0.7}$ с	3 с	9.54 ± 0.06	9.67 ± 0.06
	282	12	SF	$0.82^{+0.30}_{-0.18}$ мс			10.69

Таблица 3 (окончание).

Z	A	Число наблюдений	Вид распада (%)	$T_{1/2}$ (см. ^a)	Расчетное значение $T_{1/2}$	E_α , МэВ	Q_α , МэВ
111	280	3	α	$3.6^{+4.3}_{-1.3}$ с	0.4 с	9.75 ± 0.06	9.87 ± 0.06
	279	1	α	170^{+810}_{-80} мс	7 мс	10.37 ± 0.16	10.52 ± 0.16
	278	2	α	$4.2^{+7.5}_{-1.7}$ мс	1 мс	10.69 ± 0.08	10.85 ± 0.08
110	281	10	SF	$11.1^{+5.0}_{-2.7}$ с			9.00
	279	26	α (10)/SF (90)	$0.20^{+0.05}_{-0.04}$ с	0.2 с	9.70 ± 0.06	9.84 ± 0.06
109	276	3	α	$0.72^{+0.87}_{-0.25}$ с	0.1 с	9.71 ± 0.06	9.85 ± 0.06
	275	1	α	$9.7^{+46.0}_{-4.4}$ мс	2 мс	10.33 ± 0.09	10.48 ± 0.09
	274	2	α	445^{+810}_{-176} мс	20 мс	9.76 ± 0.10	9.90 ± 0.10
108	275	3	α	$0.19^{+0.22}_{-0.07}$ с	0.8 с	9.30 ± 0.06	9.44 ± 0.06
107	272	3	α	$9.8^{+11.7}_{-3.5}$ с	3 с	9.02 ± 0.06	9.15 ± 0.06
	270	1	α	61^{+292}_{-28} с	5 с	8.93 ± 0.08	9.06 ± 0.08
106	271	3	α (70)/SF (30)	$1.9^{+2.4}_{-0.6}$ мин	0.8 мин	8.54 ± 0.08	8.67 ± 0.08
105	268	18	SF/EC ^b	29^{+9}_{-6} ч			7.83
	267	1	SF	$1.2^{+5.8}_{-0.6}$ ч			8.15
	266	1	SF/EC ^b	22^{+105}_{-10} мин			8.24
104	267	2	SF	$1.3^{+2.3}_{-0.5}$ ч			8.21

^a Здесь и далее в верхнем и нижнем индексах справа приведены погрешности измерения; ^b ЕС — захват электрона.

Экспериментальные значения периодов полураспада и энергий α -распадов для Z -четных нуклидов с $Z \geq 100$ представлены на рис. 3. На этом рисунке приведены также теоретические значения T_α и Q_α , рассчитанные с использованием формулы Вайолы–Сиборга

$$\lg T_\alpha = (aZ + b)Q_\alpha^{-1/2} + cZ + d.$$

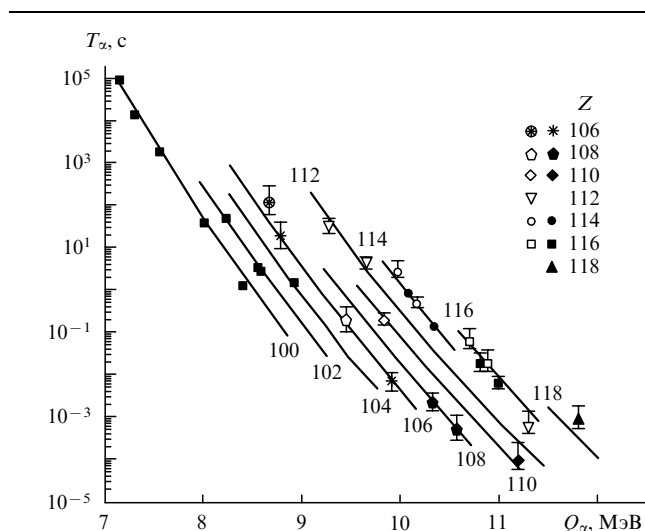


Рис. 3. Экспериментальные значения периодов полураспада (T_α) и энергий α -распадов (Q_α) для Z -четных нуклидов с $Z \geq 100$. Темные точки — ядра с четным числом нейтронов, светлые — с нечетным, линии — расчет по формуле Вайолы–Сиборга.

Можно видеть, что полученные экспериментальные данные подтверждают основные теоретические предсказания, касающиеся значительного увеличения стабильности ядер вблизи деформированной оболочки $Z = 108$, $N = 162$. Еще более сильный рост стабильности ядер наблюдается для сверхтяжелых нуклидов в области $Z = 112–118$ и $N \geq 170$, этот эффект обусловлен влиянием сферической оболочки $N = 184$. При этом экспериментальные значения Q_α для изотопов с $Z = 110–118$ оказались на 0.1–0.5 МэВ ниже расчетных, а следовательно, время жизни этих изотопов в 2–10 раз больше теоретически предсказанного.

К сожалению, синтез нейтронно-обогащенных изотопов с Z , близким к 114, пока невозможен из-за ограничений, вызванных использованием в качестве бомбардирующих ионов стабильных изотопов с заданным соотношением протонов и нейтронов. Однако характеристики распада 34 новых ядер свидетельствуют об огромном эффекте их ядерных оболочек, приводящих к возникновению «островов стабильности» в области ранее неизвестных сверхтяжелых элементов.

IV. Химическая идентификация и свойства сверхтяжелых элементов

Выше отмечалось, что одним из независимых методов идентификации атомных номеров новых нуклидов является химическая идентификация изотопов ^{268}Db и $^{283}\text{112}$ в коррелированных цепочках распада $115 \rightarrow 113 \rightarrow \text{Rg} \rightarrow \text{Mt} \rightarrow \text{Bh} \rightarrow (\text{Db})$ и $116 \rightarrow 114 \rightarrow (112) \rightarrow \text{Ds} \rightarrow \text{Hs} \rightarrow \text{Sg} \rightarrow \text{Rf}$. Впервые такой эксперимент был проведен²⁵ для элемента 115.

Открытие изотопа элемента 115 с массовым числом 288 было осуществлено в реакции $^{243}\text{Am} (^{48}\text{Ca}, 3n)^{288}\text{115}$ (экспери-

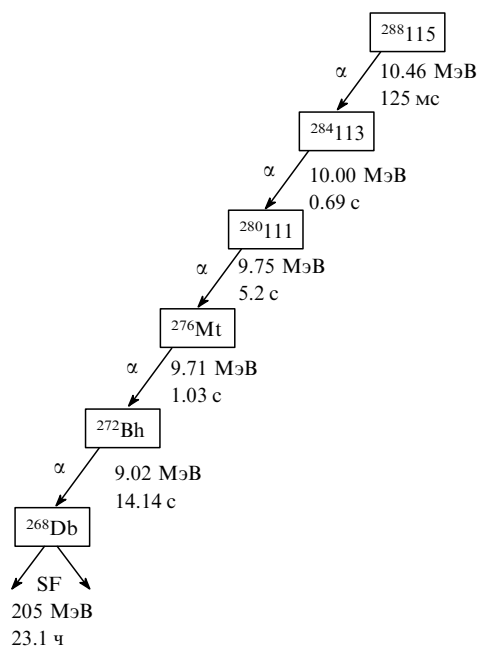


Рис. 4. Распад изотопа $^{288}\text{115}$, синтезированного в газонаполненном сепараторе по реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$.²⁰

мент проводился на газонаполненном сепараторе ЛЯР ОИЯИ).²⁰ Было установлено, что элемент $^{288}\text{115}$ испытывает пять последовательных α -распадов, которые оканчиваются спонтанным делением изотопа ^{268}Db (рис. 4). Суммарное время пяти α -переходов составляло около 20 с. Период полураспада конечного ядра ^{268}Db , определенный по трем наблюдаемым событиям, составил 16^{+19}_{-6} ч. Не исключалось, что наблюдаемое в экспериментах спонтанное деление нечетно-нечетного ядра ^{268}Db ($Z = 105$, $N = 163$) могло быть обусловлено захватом электрона с последующим быстрым делением четно-четного ядра ^{268}Rf ($Z = 104$, $N = 164$, $T_{\text{SF}} \approx 1.5$ с). Это не меняло заключения о том, что зарегистрированный в эксперименте большой период спонтанного деления определялся распадом ^{268}Db . Из-за малого числа событий не исключалось также, что изотоп ^{268}Db мог в ряде случаев испытывать α -распад с последующим спонтанным делением изотопа ^{264}Lr .

Следует отметить, что изотоп ^{268}Db не может непосредственно образоваться в реакции передачи ядру-мишени ^{243}Am 25 нуклонов (10 протонов и 15 нейтронов) из ядра ^{48}Ca при энергии вблизи кулоновского барьера.²⁶

Новый изотоп элемента 105 с периодом полураспада ~ 1 сут является прекрасным объектом не только для идентификации, но и для исследований его химических свойств.

Согласно электронной конфигурации, дубний в основном состоянии ($[\text{Rn}]5d^{14}6p^{3/2}$) относится к элементам 5-й группы Периодической системы, т.е. является более тяжелым гомологом Nb и Ta. Очевидно, что для химической идентификации дубния необходимо проводить его выделение по групповым признакам. Поэтому в опытах использовалась методика сорбционного выделения элементов 5-й группы в виде анионных фторидных комплексов. Учитывая, что интересующий нас изотоп ^{268}Db испытывает спонтанное деление, особое внимание уделялось отделению элементов 5-й группы от актиноидов и, прежде всего, от долгоживущих спонтанно делящихся изотопов калифорния ^{252}Cf ($T_{1/2} = 2.65$ г,

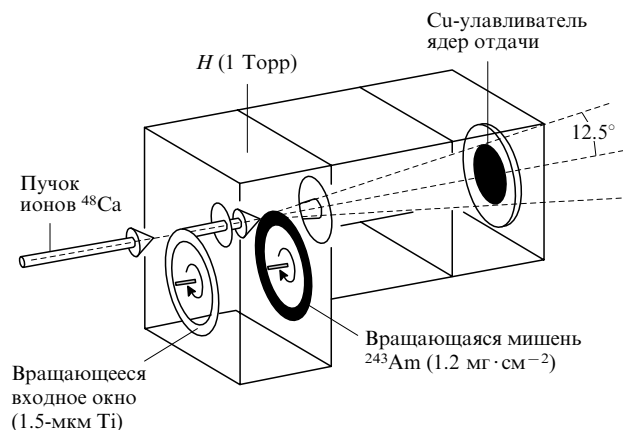
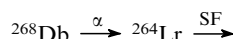


Рис. 5. Схема эксперимента по химической идентификации ^{268}Db (см.²¹).

SF 3.1%) и ^{254}Cf ($T_{1/2} = 60.5$ сут, SF 99.7%). Отделение от актиноидов давало также ответ на вопрос о принадлежности наблюдаемого спонтанного деления к трансактинидам, что исключало другую моду распада:



Эксперимент был выполнен на ускорителе тяжелых ионов У-400 (ЛЯР ОИЯИ) в июне 2004 г. Принципиальная схема облучения показана на рис. 5.

Мишень в виде вращающегося диска из тонкой (1.5 мкм) титановой фольги общей площадью 32 см² с нанесенным на нее слоем ^{243}Am (99.9%) в виде оксида толщиной 1.2 мг·см⁻² (по ^{243}Am) облучалась ионами ^{48}Ca с энергией 247 МэВ (значение энергии на середине слоя мишени). Ядра отдачи — продукты реакции — вылетали из мишени в угловом диапазоне $\theta = 0 - 12.5^\circ$ и останавливались в медном сборнике диаметром 50 мм, установленном на расстоянии 100 мм от мишени. Продукты реакции слияния ядер ^{243}Am и ^{48}Ca (в данной геометрии опыта угол захвата составлял $\pm 12.5^\circ$) попадали на сборник с эффективностью, близкой к 100%. Пробег ядер отдачи в материале сборника не превышал 3–4 мкм. Всего было проведено 8 идентичных опытов. Время облучения в каждом опыте составляло от 20 до 45 ч.

В каждом опыте после окончания облучения сборник ядер отдачи переносили в радиохимическую лабораторию. Элементы 5-й группы отделяли от других продуктов реакции (включая актиноиды) путем их совместной сорбеции из азотно-кислого раствора на катионообменной смоле Dowex 50 × 8 с последующей селективной десорбцией элементов 5-й группы в виде фторанионных комплексов. Эффективность выделения элементов 5-й группы была близка к 90% с коэффициентом разделения от лантанидов $\sim 10^5$. Вся процедура (от конца облучения до начала измерения на детекторах) занимала 2–3 ч. Ее подробное описание дано в работах ^{25,27}.

После радиохимического разделения и приготовления образцов для спектрометрических исследований проводились длительные измерения спектров α -частиц и парных осколков спонтанного деления с одновременным измерением нейтронов деления.

В восьми опытах облучения мишени ^{243}Am ионами ^{48}Ca (суммарный поток ионов $3.4 \cdot 10^{18}$) было зарегистрировано 15 событий спонтанного деления. Измерения проводились 957 ч. Все 15 событий спонтанного деления были зарегистри-

рованы в течение первых 174 ч после начала измерений. В последующие 783 ч не было зарегистрировано ни одного события спонтанного деления. При факторе разделения элементов 5-й группы и актинидов, равном 10^5 , за 174 ч измерений изотопы актинидов, в том числе и ^{264}Lr , могли бы дать не более 0.002 событий спонтанного деления.

Полная кинетическая энергия (ТКЕ) осколков, определенная как сумма амплитуд совпадающих по времени сигналов с обоих детекторов (с учетом поглощения в слоях источника и подложки), составила около 230 МэВ. Этот результат согласуется с данными физического опыта (ТКЕ $\approx$ 225 МэВ). Среднее число нейтронов на акт деления ($\bar{\nu}$) составило ~ 4.2 . Оба параметра — высокое значение ТКЕ и большое число нейтронов — свидетельствуют о делении тяжелого ядра (например, для спонтанного деления изотопа ^{248}Cm эти параметры составляют 181 МэВ и 3.14 соответственно, а для изотопа ^{252}Cf — 185 МэВ и 3.75).

Следует отметить, что в описанном опыте выделяли одновременно элементы 5-й и 4-й групп. Поэтому используемый метод применим к обоим изотопам — Db и Rf — конечным продуктам распада материнских ядер с $Z = 115$ и 114. Однако наблюдение в описанном эксперименте спонтанного деления изотопов резерфордия исключено из-за пренебрежимо малого сечения реакции $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca}, p, xn)^{290-x}114$ и короткого периода спонтанного деления, ожидаемого для Z-четного нуклида. Поэтому все события спонтанного деления, зарегистрированные детекторами в реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$, были отнесены только к цепочке распада 115-го элемента. Условия эксперимента (отделение от актинидов) исключали также предположение о возможном дополнительном α -распаде ^{268}Db с последующим спонтанным делением ^{264}Lr . В целом описанный эксперимент явился независимым доказательством синтеза 115-го элемента (равно как и 113-го элемента) в реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$.

Сравнительный анализ результатов «физического» и «химического» экспериментов по синтезу 115-го элемента в реакции $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ приведен в работе²¹.

Позднее описанный выше химический эксперимент был повторен^{28, 29} с использованием более селективных методик, обеспечивающих разделение элементов 5-й и 4-й групп, а в ряде опытов и разделения элементов внутри 5-й группы (выделялись фракции ниобия и тантала). Было зарегистрировано пять событий спонтанного деления, из которых три события относятся к спонтанному делению элементов 5-й группы, а два события — к делению элементов Та-фракции. События спонтанного деления элементов 4-й группы не зарегистрированы. Таким образом, были подтверждены результаты химической идентификации элемента 115 по конечному продукту распада — изотопу ^{268}Db .

Что касается химических свойств дубния, то авторы справедливо отмечают, что полученная в эксперименте статистика не позволяет сделать однозначного заключения об изменениях химических свойств элементов 5-й группы в ряду Nb–Ta–Db. Необходимы дополнительные эксперименты, постановка которых (с учетом периода полураспада ^{268}Db , равного 29 ч) расширит возможности для достаточно детального изучения химических свойств этого трансактинида.

Изучение химических свойств сверхтяжелых элементов — 114-го элемента и его соседей — представляет особый интерес. Это связано с тем, что в электронной структуре сверхтяжелого атома (особенно его внешних электронов) существенную роль начинают играть так называемые релятивистские эффекты. Элементы 112 (а также Zn, Cd, Hg) и 114 (Ge, Sn, Pb) относятся к 12-й и 14-й группам. Отсюда следует, что в основном состоянии они будут иметь электронные

конфигурации $[\text{Rn}]5f^{14}6d^{10}7s^2$ и $[\text{Rn}]5f^{14}6d^{10}7s^27p^2$ соответственно. Простые экстраполяции показывают, что элемент 112 близок по свойствам к благородным металлам. Вместе с тем учет релятивистских эффектов[§] в расчетах атомных свойств сверхтяжелых элементов предполагает сжатие сферических s- и $p_{1/2}$ -электронных орбиталей. Следствием этого является увеличение химической стабильности элементов 112 и 114 в основном состоянии. Таким образом, не исключено, что элементы 112 и 114 могут быть благородными газами подобно радону. Другие расчеты также подтверждают сильное сжатие 7s-орбиталей. Однако предсказывается, что релятивистское спин-орбитальное расщепление 6d-орбиталей приведет к тому, что элемент 112 будет благородным переходным металлом или даже полупроводником.

Отметим, что в случае 112-го элемента большинство теоретических предсказаний указывает на его повышенную летучесть и расходится в оценке его химической инертности (относится ли он к эка-ртути или эка-радону). Ответ на этот вопрос могло бы дать изучение адсорбции элемента 112 на поверхности благородных металлов. Постановка таких химических экспериментов стала возможной только после синтеза относительно долгоживущих изотопов элемента 112 в реакциях $^{48}\text{Ca} + ^{238}\text{U}$ и с $^{242}, ^{244}\text{Pu}$. Ниже приведены основные результаты химических опытов для изотопов элементов 112 и 114, проведенные на ускорительном комплексе ЛЯР ОИЯИ в 2006–2007 гг.

В этих экспериментах в качестве мишени использовался изотоп плутония ^{242}Pu , в который добавляли ^{141}Nd (~ 1 вес. %). Последний при облучении ионами ^{48}Ca дает изотоп ^{185}Hg — 49-секундный α -излучатель. Кроме того, в реакциях неполного слияния ядер ^{48}Ca и ^{242}Pu образуются изотопы радона, в том числе 4-секундный α -излучатель ^{219}Rn . Таким образом, в проводимых экспериментах контролировалось одновременно поведение трех химических элементов: 112-го, Hg и Rn.

Эксперимент проводили следующим образом. Мишень ^{242}Pu облучали ускоренными до энергии 270 МэВ ионами ^{48}Ca . Образовавшиеся в результате слияния ядер ^{48}Ca и ^{242}Pu изотопы элемента 114 «вылетали» из мишени, тормозились в среде He–Ar и доставлялись по капилляру к детекторам. Детектирующая система состояла из 32 пар PIPS-детекторов, находящихся напротив друг друга и обеспечивающих высокую эффективность регистрации α -частиц и осколков спонтанного деления. На поверхность одного из каждой пары детекторов был нанесен тонкий слой золота. Температура поверхности каждой пары детекторов варьировалась по ходу движения He–Ar-струи от 35°C (первая пара детекторов) до -184°C (последняя пара). Далее события могли развиваться по двум «сценариям». Если элемент 114 летуч при комнатной температуре, а быстроедействие методики (время, за которое образовавшийся в мишенной камере элемент достигал детекторов) сравнимо с временем жизни его изотопов (например, время жизни изотопа $^{287}114$ составляет ~ 0.5 с), то ядра элемента 114 будут захватываться струей He–Ar и транспортироваться по тefлоновому капилляру на расстояние около 10 м в криодетектор. Если же элемент 114 нелетуч или быстроедействие методики недостаточно, то струей He–Ar будут захватываться ядра элемента 112, образующегося при распаде элемента 114.

§ Теоретические оценки влияния релятивистских эффектов на свойства СТЭ, включая анализ различных методов расчета, приведены в обзорах Першиной и Титова (см. настоящий выпуск журнала «Успехи химии»).

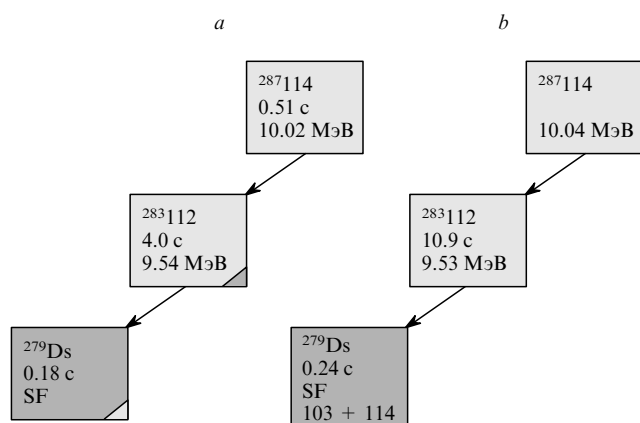


Рис. 6. Цепочки распада изотопа $^{287}_{114}$:

a — эксперимент, проведенный на газонаполненном сепараторе;¹⁶ *b* — химический эксперимент.³⁵

В эксперименте 2006 г. методика была нацелена на изучение свойств только элемента 112; быстроедействие составляло около 4 с. Были зарегистрированы две цепочки распада ($\alpha \rightarrow f$) в точном соответствии с полученными ранее данными для изотопа $^{283}_{112}$. Следует отметить, что в физических экспериментах изотоп $^{283}_{112}$ и его дочернее ядро — изотоп $^{279}_{110}$ — были зарегистрированы и как непосредственный продукт реакции $^{238}\text{U}(^{48}\text{Ca}, 3n)$, и как дочернее и внучатое ядра в цепочках распада радионуклидов $^{287}_{114}$ и $^{291}_{116}$, образовавшихся в реакциях $^{242}\text{Pu}(^{48}\text{Ca}, 3n)$ и $^{245}\text{Cm}(^{48}\text{Ca}, 2n)$. Таким образом, результаты проведенных химических экспериментов явились первым независимым подтверждением синтеза новых элементов 112, 114 и 116 (см. работу³⁰). Позднее синтез элемента 112 в реакции $^{238}\text{U}(^{48}\text{Ca}, 3n)$ был подтвержден группой Хоффмана (Германия)³¹ в физическом эксперименте на кинематическом сепараторе SHIP.

В серии экспериментов 2007 г. были зарегистрированы еще три события образования и распада ядра $^{283}_{112}$. Полученные данные³² по химическому поведению элемента 112 полностью повторили результаты первого эксперимента.

Атомы элемента 112 были обнаружены на поверхности золота в температурном интервале от -5 до -39°C . Статистический анализ данных, проведенный авторами работы³³, позволил оценить стандартную энтальпию адсорбции 112-го элемента на поверхности золота ($-\Delta H_{\text{адс}} = 52^{+4}_{-3}$ кДж·моль $^{-1}$). Используя установленную ранее эмпирическую зависимость

$$-\Delta H_{\text{адс}} = [(1.08 \pm 0.005)\Delta H_{\text{субл}} + (10.3 \pm 6.4)] \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1},$$

удалось определить стандартную энтальпию сублимации элемента 112, которая оказалась равной 39^{+23}_{-10} кДж·моль $^{-1}$. С учетом рассчитанной ранее энтропии сублимации значение температуры кипения элемента 112 составляет 357 К. На основании полученных данных был сделан вывод, что элемент 112 является более тяжелым гомологом ртути; для него сохраняется тенденция изменения свойств элементов 12-й группы.[¶]

¶ Более детально методика данных экспериментов приведена в обзоре Гегелера (см. настоящий выпуск журнала «Успехи химии»).

Во втором эксперименте время транспорта ядер отдачи к детекторам было сокращено до 1 с. В этом опыте было зарегистрировано событие,^{34–36} полностью повторяющее цепочку распада ядра $^{287}_{114}$ в эксперименте на газонаполненном сепараторе¹⁶ (рис. 6). Распад ядра изотопа $^{287}_{114}$ наблюдался с помощью детектора, поверхность которого была покрыта золотом, температура этого детектора составляла -80°C . На сегодняшний день это лишь одно событие. Дальнейшие эксперименты нацелены на увеличение числа событий, что может быть достигнуто повышением быстроедействия методики. Повторение этого результата означало бы, что поведение элемента 114 ближе к поведению инертных газов, чем к поведению его ближайшего гомолога — свинца.

V. Перспективы

В реакциях дважды магического ядра ^{48}Ca с актинидными мишенями были синтезированы новые сверхтяжелые элементы Периодической системы Менделеева с атомными номерами 112–116 и 118. Синтез элемента 117 до настоящего времени не осуществлен из-за трудностей получения необходимой мишени — изотопа ^{249}Bk . Период полураспада этого уникального изотопа составляет всего 320 сут, и его наработка (длительные облучения более легких и достаточно долгоживущих изотопов актинидов на высокопоточном реакторе с последующим выделением и очисткой) в требуемых для эксперимента количествах (десятки миллиграммов) является сложнейшей задачей. Не менее сложна и постановка экспериментов с изотопом ^{249}Bk , как в силу его высокой активности (более 10 Ки), так и в силу относительно короткого времени жизни этого изотопа. Однако ожидаемый результат адекватен указанным трудностям.

На рис. 7 приведены теоретически рассчитанные цепочки распада изотопов элемента 117, образующихся в реакции $^{48}\text{Ca} + ^{249}\text{Bk}$. Можно видеть, что в данной реакции следует ожидать синтеза 14 новых изотопов СТЭ, при этом времена жизни изотопов 113-го и 115-го элементов будут достаточны для постановки экспериментов по изучению их химических свойств. В настоящее время в ЛЯР ОИЯИ совместно с Оксиджской и Ливерморской Национальными Лабораториями (США) и НИИАР (Дмитровград, Россия) завершается подготовка к данным экспериментам.

Синтез еще более тяжелых изотопов в реакциях слияния ядер актинидов с ионами ^{48}Ca ограничивается отсутствием необходимых мишеней. Изотоп ^{249}Cf , который используется в качестве мишени в экспериментах по синтезу ядер с $Z = 118$, может оказаться последним в ряду актинидов. В то же время, согласно микроскопическим моделям типа Хартри–Фока–Боголюбова или релятивистской модели среднего поля, движение в сторону более тяжелых ядер с $Z \geq 120$ ведет к изменению распределения плотности вещества в объеме ядра (так называемые «ядра-пузыри»). Ожидается, что эти ядра будут обладать повышенной стабильностью.

По-видимому, для синтеза таких ядер следует использовать реакции слияния ядер изотопов актинидов с ионами тяжелее ^{48}Ca , например с ионами ^{50}Ti , ^{58}Fe , ^{64}Ni и т.д. Предварительные эксперименты,³⁷ проведенные в 2008 г. в ЛЯР ОИЯИ на газонаполненном сепараторе, установили верхнюю границу сечения образования изотопов элемента 120 в реакции $^{244}\text{Pu} + ^{58}\text{Fe}$ как равную 0.4 пикобарн (эта величина на порядок ниже, чем в реакциях с ^{48}Ca). Очевидно, что постановка экспериментов с ионами тяжелее ^{48}Ca требует

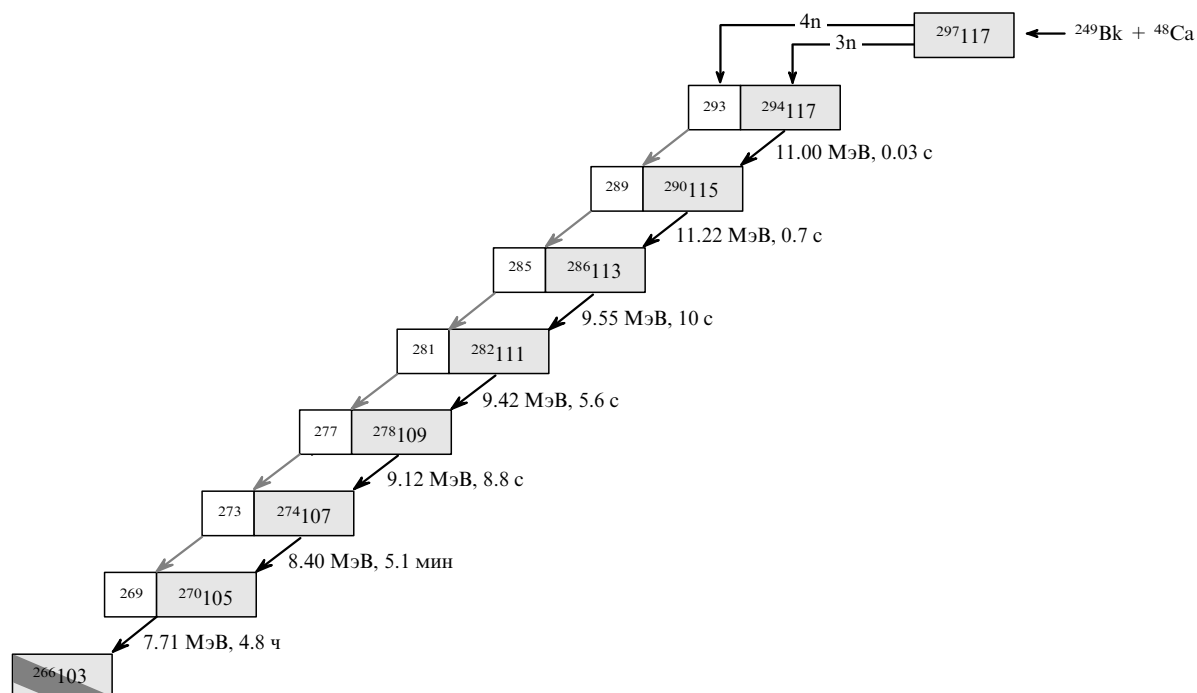


Рис. 7. Ожидаемая схема распада изотопов элемента 117, образующегося в реакции $^{249}\text{Bk} + ^{48}\text{Ca}$.

кардинальной модернизации экспериментальной базы (ускорителей, сепараторов).

Возрастающая стабильность сверхтяжелых ядер с $Z \geq 120$ целиком меняет подход к проблеме их синтеза в реакциях слияния с тяжелыми ионами. Необходимость разделения продуктов реакции in-flight в синтезе ядер с $Z = 112-114$ с целью быстрой доставки атомов отдачи на детекторы не является решающим фактором вследствие их достаточно длинных периодов полураспада. Представляется более предпочтительным использование классических on-line масс-сепараторов, так как последние не только характеризуются высокими эффективностью (благодаря возможности использования более толстых мишеней) и селективностью, но и позволяют определять массы ядер. Идея использования таких сепараторов в настоящее время реализуется в Дубне, где создана и проходит тестовые испытания установка MASHA (Mass Analyzer of Superheavy Atoms).

В целом полученные за последние годы результаты явились первым экспериментальным подтверждением гипотезы существования «островов стабильности» сверхтяжелых элементов, что открывает широкие перспективы дальнейших исследований, нацеленных на синтез и изучение свойств новых сверхтяжелых элементов Периодической системы Менделеева.

Описанные в настоящем обзоре эксперименты выполнены на ускорительном комплексе Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова ОИЯИ (Дубна, Россия) в сотрудничестве с Отделом аналитической и ядерной химии Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса (LLNL, США) и Отделом радиохимии Института Пауля Шеррера (PSI, Швейцария). Используемые в описанных работах уникальные изотопы Pu, Am, Cm и Cf были получены на высокопоточных реакторах НИИЯР (Димитровград, Россия) и Окриджской национальной лаборатории (США). Дополнительное изотопное обогащение ряда изотопов проводилось на масс-сепараторе C2 ВНИИЭФ (Саров, Россия).

Успешное проведение экспериментов стало возможным благодаря концентрации научных и инженерных ресурсов ЛЯР им. Г.Н.Флерова, поддержке дирекции ОИЯИ и широкому сотрудничеству с учеными других научных центров, работающими в этой области ядерной физики.

Данная работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 09-02-06065-г, 07-03-004-30-аб 09-02-12060-офи_м, 09-03-12029-офи_м).

Литература

1. K.A.Petrzhak, G.N.Flerov. *Phys. Rev.*, **58**, 89 (1940)
2. O.Hahn, F.Strassmann. *Naturwissenschaften*, **27**, 89; 163 (1939)
3. N.Bohr, J.Wheeler. *Phys. Rev.*, **56**, 426 (1939)
4. Yu.Ts.Oganessian, A.G.Demin, A.S.Iljinov, S.P.Tretyakova, A.A.Pleve, Yu.E.Penionzhkevich, M.P.Ivanov, Yu.P.Tretyakov. *Nucl. Phys. A*, **239**, 157 (1975)
5. W.D.Myers, W.J.Swiatecki. *Nucl. Phys.*, **81**, 1 (1966)
6. V.M.Strutinsky. *Nucl. Phys. A*, **95**, 420 (1967)
7. A.Sobiczewski, F.A.Gareev, B.N.Kalinkin. *Phys. Lett.*, **22**, 500 (1966)
8. H.Meldner. *Ark. Fys.*, **36**, 593 (1967)
9. S.G.Nilsson, C.F.Tsang, A.Sobiczewski, Z.Szymanski, S.Wycech, C.Gustafson, I.-L.Lamm, P.Moller, B.Nilsson. *Nucl. Phys. A*, **131**, 1 (1969)
10. Yu.Ts.Oganessian. *Lect. Notes Phys.*, **33**, 221 (1974)
11. M.Schadel. In *The Chemistry of Superheavy Elements*. Kluwer Acad. Publ., Netherlands, 2003. P. 318
12. Л.И.Гусева. *Успехи химии*, **5**, 484(2005)
13. I.Zvara. In *The Inorganic Radiochemistry of Heavy Elements*. Springer-Verlag, Berlin, 2008. P. 225
14. E.K.Hulet, R.W.Lougheed, J.F.Wild, J.H.Landrum, P.C.Stevenson, A.Ghiorso, J.M.Nitschke, R.J.Otto, D.J.Morrissey, P.A.Baisden, B.F.Gavin, D.Lee, R.J.Silva, M.M.Fowler, G.T.Seaborg. *Phys. Rev. Lett.*, **39**, 385 (1977)

15. P.Armbruster, Y.K.Agarwal, W.Brüchle, M.Brügger, J.P.Dufour, H.Gäggeler, F.P.Hessberger, S.Hofmann, P.Lemmertz, G.Münzenber, K.Poppensieker, W.Reisdorf, M.Schädel, K.-H.Schmidt, J.H.R.Schneider, W.F.W. Schneider, K.Sümmerer, D.Vermeulen, G.Wirth, A.Ghiorso, K.E.Gregorich, D.Lee, M.Leino, K.J.Moody, G.T.Seaborg, R.B.Welch, P.Wilmarth, S.Yashita, C.Frink, N.Greulich, G.Herrmann, U.Hickmann, N.Hildebrand, J.V.Kratz, N.Trautmann, M.M.Fowler, D.C.Hoffman, W.R.Daniels, H.R.von Gunten, H.Dornhöfer. *Phys. Rev. Lett.*, **54**, 406 (1985)
16. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, G.G.Gulbekian, S.L.Bogomolov, B.N.Gikal, A.N.Mezentsev, S.Iliev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, A.A.Voinov, G.V.Buklanov, K.Subotic, V.I.Zagrebaev, M.G.Itkis, J.B.Patin, K.J.Moody, J.F.Wild, M.A.Stoyer, N.J.Stoyer, D.A.Shaughnessy, J.M.Kenneally, P.A.Wilk, R.W.Lougheed, R.I.II'kaev, S.P.Vesnovskii. *Phys. Rev. C*, **70**, 064609 (2004)
17. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, R.N.Sagaidak, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, A.A.Voinov, G.G.Gulbekian, S.L.Bogomolov, B.N.Gikal, A.N.Mezentsev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, K.Subotic, V.I.Zagrebaev, G.K.Vostokin, M.G.Itkis, R.A.Henderson, J.M.Kenneally, J.H.Landrum, K.J.Moody, D.A.Shaughnessy, M.A.Stoyer, N.J.Stoyer, P.A.Wilk. *Phys. Rev. C*, **76**, 011601 (2007)
18. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, G.G.Gulbekian, S.L.Bogomolov, B.N.Gikal, A.N.Mezentsev, S.Iliev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, O.V.Ivanov, G.V.Buklanov, K.Subotic, M.G.Itkis, K.J.Moody, J.F.Wild, N.J.Stoyer, M.A.Stoyer, R.W.Lougheed. *Phys. Rev. C*, **62**, 041604 (2000)
19. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, G.G.Gulbekian, S.L.Bogomolov, B.N.Gikal, A.N.Mezentsev, S.Iliev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, A.A.Voinov, G.V.Buklanov, K.Subotic, V.I.Zagrebaev, M.G.Itkis, J.B.Patin, K.J.Moody, J.F.Wild, M.A.Stoyer, N.J.Stoyer, D.A.Shaughnessy, J.M.Kenneally, R.W.Lougheed. *Phys. Rev. C*, **69**, 054607 (2004)
20. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, G.G.Gulbekian, S.L.Bogomolov, A.N.Mezentsev, S.Iliev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, A.A.Voinov, G.V.Buklanov, K.Subotic, V.I.Zagrebaev, M.G.Itkis, J.B.Patin, K.J.Moody, J.F.Wild, M.A.Stoyer, N.J.Stoyer, D.A.Shaughnessy, J.M.Kenneally, R.W.Lougheed. *Phys. Rev. C*, **69**, 021601 (2004)
21. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, S.N.Dmitriev, Yu.V.Lobanov, M.G.Itkis, A.N.Polyakov, Yu.S.Tsyganov, A.N.Mezentsev, A.V.Yeremin, A.A.Voinov, E.A.Sokol, G.G.Gulbekian, S.L.Bogomolov, S.Iliev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, G.V.Buklanov, S.V.Shishkin, V.I.Chepygin, G.K.Vostokin, N.V.Aksenov, M.Hussonnois, K.Subotic, V.I.Zagrebaev, K.J.Moody, J.B.Patin, J.F.Wild, M.A.Stoyer, N.J.Stoyer, D.A.Shaughnessy, J.M.Kenneally, P.A.Wilk, R.W.Lougheed, H.W.Gäggeler, D.Schumann, H.Bruchertseifer, R.Eichler. *Phys. Rev. C*, **72**, 034611 (2005)
22. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, R.N.Sagaidak, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, A.A.Voinov, G.G.Gulbekian, S.L.Bogomolov, B.N.Gikal, A.N.Mezentsev, S.Iliev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, K.Subotic, V.I.Zagrebaev, G.K.Vostokin, M.G.Itkis, K.J.Moody, J.B.Patin, D.A.Shaughnessy, M.A.Stoyer, N.J.Stoyer, P.A.Wilk, J.M.Kenneally, J.H.Landrum, J.F.Wild, R.W.Lougheed. *Phys. Rev. C*, **74**, 044602 (2006)
23. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, G.G.Gulbekian, S.L.Bogomolov, B.N.Gikal, A.N.Mezentsev, S.Iliev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, O.V.Ivanov, G.V.Buklanov, K.Subotic, M.G.Itkis, K.J.Moody, J.F.Wild, N.J.Stoyer, M.A.Stoyer, R.W.Lougheed, C.A.Laue, Ye.A.Karelin, A.N.Tatarinov. *Phys. Rev. C*, **63**, 011301 (2001)
24. Yu.Ts.Oganessian. *Phys. Scr.*, **125**, 57 (2006)
25. S.N.Dmitriev, Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, S.V.Shishkin, A.V.Yeremin, Yu.V.Lobanov, Yu.S.Tsyganov, V.I.Chepygin, E.A.Sokol, G.K.Vostokin, N.V.Aksenov, M.Hussonnois, M.G.Itkis, H.W.Gäggeler, D.Schumann, H.Bruchertseifer, R.Eichler, D.A.Shaughnessy, P.A.Wilk, J.M.Kenneally, M.A.Stoyer, J.F.Wild. *Mendeleev Commun.*, **1** (2005)
26. H.Gäggeler, W.Brüchle, M.Brügger, K.J.Moody, M.Schädel, K.Sümmerer, G.Wirth, T.Blaich, G.Herrmann, N.Hildenbrand, J.V.Kratz, M.Lerch, N.Trautmann, W.R.Daniels, M.M.Fowler, D.C.Hoffman, K.Gregorich, D.Lee, G.T.Seaborg, R.Welch, H.R.von Gunten. *J. Less-Common Met.*, **122**, 433 (1986)
27. D.Schumann, H.Bruchertseifer, R.Eichler, B.Eichler, H.W.Gäggeler, S.N.Dmitriev, Yu.Ts.Oganessian, V.P.Utyonkov, S.V.Shishkin, A.V.Yeremin, Yu.Y.Lobanov, Yu.S.Tsyganov, V.I.Chepygin, E.A.Sokol, G.K.Vostokin, N.V.Aksenov, M.Hussonnois, M.G.Itkis. *Radiochim. Acta*, **93**, 727 (2005)
28. N.J.Stoyer, J.H.Landrum, P.A.Wilk, K.J.Moody, J.M.Kenneally, D.A.Shaughnessy, M.A.Stoyer, J.F.Wild, R.W.Lougheed, S.N.Dmitriev, Yu.Ts.Oganessian, S.V.Shishkin, N.V.Aksenov, E.E.Tereshatov, G.A.Bozhikov, G.K.Vostokin, V.K.Utyonkov, A.A.Yeremin. *Nucl. Phys. A*, **787**, 388 (2007)
29. P.A.Wilk, J.H.Landrum, D.A.Shaughnessy, J.M.Kenneally, N.J.Stoyer, M.A.Stoyer, K.J.Moody, N.V.Aksenov, G.A.Bozhikov, E.E.Tereshatov, G.K.Vostokin, S.V.Shishkin, S.N.Dmitriev. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **3**, 275 (2008)
30. R.Eichler, N.V.Aksenov, A.V.Belozero, G.A.Bozhikov, V.I.Chepygin, R.Dressler, S.N.Dmitriev, H.W.Gäggeler, V.A.Gorshkov, F.Haenssler, M.G.Itkis, V.Ya.Lebedev, A.Laube, O.N.Malyshev, Yu.Ts.Oganessian, O.V.Petrushkin, D.Piguet, P.Rasmussen, S.V.Shishkin, A.V.Shutov, A.I.Svirikhin, E.E.Tereshatov, G.K.Vostokin, M.Wegrzecki, A.V.Yeremin. *Nature (London)*, **447**, 72 (2007)
31. S.Hofman, D.Ackermann, S.Antalic, H.G.Burkhard, V.F.Comas, R.Dressler, Z.Gan, S.Heinz, J.A.Heredia, F.P.Heßberger, J.Khuygbaatar, B.Kindler, I.Kojouharov, P.Kuusinicmi, M.Leino, B.Lommel, R.Mann, G.Münzenberg, K.Nichio, A.G.Popeko, S.Saro, H.J.Scöht, B.Streicher, B.Silignano, J.Uusitalo, M.Vcnhart, A.V.Yeremin. *Eur. Phys. J. A*, **32**, 251(2007)
32. R.Eichler, N.V.Aksenov, A.V.Belozero, G.A.Bozhikov, V.I.Chepygin, R.Dressler, S.N.Dmitriev, H.W.Gäggeler, V.A.Gorshkov, F.Haenssler, M.G.Itkis, V.Ya.Lebedev, A.Laube, O.N.Malyshev, Yu.Ts.Oganessian, O.V.Petrushkin, D.Piguet, P.Rasmussen, S.V.Shishkin, A.V.Shutov, A.I.Svirikhin, E.E.Tereshatov, G.K.Vostokin, M.Wegrzecki, A.V.Yeremin. *Nucl. Phys. A*, **787**, 373 (2007)
33. R.Eichler, N.V.Aksenov, A.V.Belozero, G.A.Bozhikov, V.I.Chepygin, S.N.Dmitriev, R.Dressler, H.W.Gäggeler, A.V.Gorshkov, M.G.Itkis, F.Haenssler, A.Laube, V.Ya.Lebedev, O.N.Malyshev, Yu.Ts.Oganessian, O.V.Petrushkin, D.Piguet, A.G.Popeko, P.Rasmussen, S.V.Shishkin, A.A.Serov, A.V.Shutov, A.I.Svirikhin, E.E.Tereshatov, G.K.Vostokin, M.Wegrzecki, A.V.Yeremin. *Angew. Chem., Int. Ed.*, **47**, 3262 (2008)

34. S.N.Dmitriev, N.V.Aksenov, A.V.Belozerov, G.A.Bozhikov, V.I.Chepigin, R.Dressler, R.Eichler, H.W.Gäggeler, A.V.Gorshkov, F.Haenssler, R.A.Henderson, M.G.Itkis, A.M.Johnsen, J.M.Kennealy, A.Laube, V.Ya.Lebedev, O.N.Malyshev, K.J.Moody, Yu.Ts.Oganessian, O.V.Petrushkin, D.Piguet, A.G.Popeko, P.Rasmussen, D.A.Shaughnessy, S.V.Shishkin, A.V.Shutov, M.A.Stoyer, N.J.Stoyer, A.I.Svirikhin, E.E.Tereshatov, G.K.Vostokin, M.Wegrzecki, P.A.Wilk, A.V.Yeremin. In *Proceedings of the 3rd International Conference on the Chemistry and Physics of the Transactinide Elements (TAN 07)*. Davos, Switzerland, 2007. P. 22
35. N.Dmitriev. In *Proceedings of the NRC7 — 7th International Conference on Nuclear and Radiochemistry*. Budapest, Hungary, 2008. P. 41
36. R.Eichler. In *Proceedings of the NRC7 — 7th International Conference on Nuclear and Radiochemistry*. Budapest, Hungary, 2008. P. 43
37. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, R.N.Sagaidak, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, A.A.Voinov, A.N.Mezentsev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, K.Subotic, V.I.Zagrebaev, S.N.Dmitriev, R.A.Henderson, K.J.Moody, J.M.Kenneally, J.H.Landrum, D.A.Shaughnessy, M.A.Stoyer, N.J.Stoyer, P.A.Wilk. *Phys. Rev. C*, **79**, 024603 (2009)

SUPERHEAVY ELEMENTS IN D.I.MENDELEEV'S PERIODIC TABLE

Yu.Ts.Oganessian, S.N.Dmitriev

*Flerov Laboratory of Nuclear Reactions of the Joint Institute for Nuclear Research
6, Ul. Joliot-Curie, 141980 Dubna Moscow Region, Russian Federation, Fax +7(496)212–8933*

The results on the synthesis of new elements of Mendeleev Periodic table are summarized and analyzed. The attention is focused on the synthesis and study of new superheavy elements synthesized in complete fusion reactions of ^{48}Ca ions with actinide targets. The perspectives for the synthesis of element 117, as well as of elements 118 and higher are considered.

Bibliography — 37 references.

Received 31st July 2009