

## Синтез и изучение свойств распада изотопов сверхтяжелых элементов Ds и Lv

В настоящее время изучение сверхтяжелых ядер стало одной из наиболее интересных и быстро развивающихся областей ядерной физики. Синтез новых элементов 119 и 120 требует ускорения более тяжелых ионов, таких как  $^{50}\text{Ti}$ ,  $^{51}\text{V}$ ,  $^{54}\text{Cr}$ . Однако переход от дважды магического  $^{48}\text{Ca}$  к таким ионам сопровождается дополнительным снижением сечения реакции. К сожалению, теоретические значения сечения реакций, приводящих к элементам 119 и 120, отличаются на 2-3 порядка. Однако для планирования таких экспериментов чрезвычайно важно иметь более точные оценки сечений.

### Сечение продуктов реакций полного слияния

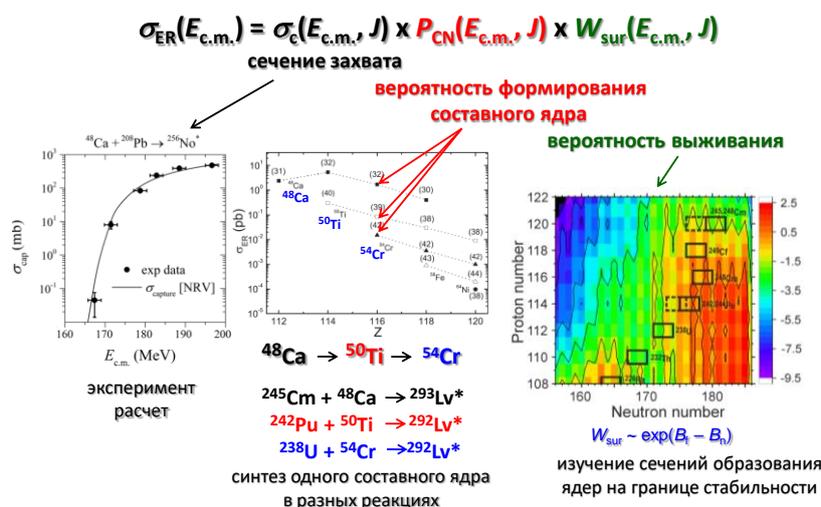


Рис. 1. Сечение продуктов реакции полного слияния. Приведены методы оценки различных процессов, которые определяют сечение образования конечных продуктов реакции.

В теории, сечение реакции слияния-испарения делится на три взаимосвязанных процесса: захват взаимодействующих ядер, образование возбужденного составного ядра и его выживание при испарении нейтронов (см. Рис. 1). Сечение захвата может быть измерено экспериментально или рассчитано теоретически. Для оценки вероятности образования составного ядра необходим синтез одного и того же ядра в реакциях с разными ионами, поскольку вероятность его выживания будет почти одинаковой. Для изучения вероятности выживания ядер, которая в значительной степени определяется барьерами деления и энергиями связи нейтронов, желательно изучить сечения реакций в широком диапазоне числа протонов и нейтронов в ядрах. Особое значение имеет изучение реакций, которые приводят к образованию ядер, находящихся на границе своей стабильности (с минимальными барьерами). Эксперименты были направлены на изучение перечисленных процессов реакции полного слияния.

Реакция  $^{232}\text{Th} + ^{48}\text{Ca}$  была изучена при четырех энергиях ионов на новом газонаполненном сепараторе DGFRS-2, установленном на канале циклотрона DC280 на SHE Фабрике в ЛЯР ОИЯИ. Некоторые параметры экспериментов, проведенных при трех самых низких энергиях, перечислены в таблице I.

Таблица I. Толщина мишени из  $^{232}\text{Th}$ , энергии  $^{48}\text{Ca}$  в середине слоя мишени в лабораторной системе, результирующие интервалы энергии возбуждения, суммарные дозы облучения, количество наблюдаемых цепочек распада  $^{277}\text{Ds}$  ( $3n$ ) и  $^{276}\text{Ds}$  ( $4n$ ) и сечения их образования.

| Толщина мишени (мг/см <sup>2</sup> ) | $E_{\text{lab}}$ (МэВ) | $E^*$ (МэВ) | Доза $\times 10^{19}$ | No. цепочек $3n / 4n$ | $\sigma_{3n}$ (пб) | $\sigma_{4n}$ (пб)     |
|--------------------------------------|------------------------|-------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|
| 0.89                                 | 231.1                  | 32.3-36.6   | 2.4                   | 0 / 1                 | <0.2               | $0.07^{+0.17}_{-0.06}$ |
| 0.76                                 | 237.8                  | 37.9-42.1   | 1.9                   | 0 / 5                 | <0.5               | $0.7^{+1.1}_{-0.5}$    |

Впервые были синтезированы три новых сверхтяжелых нуклида  $^{268}\text{Sg}$ ,  $^{272}\text{Hs}$  и  $^{276}\text{Ds}$ , см.

Рис. 2.

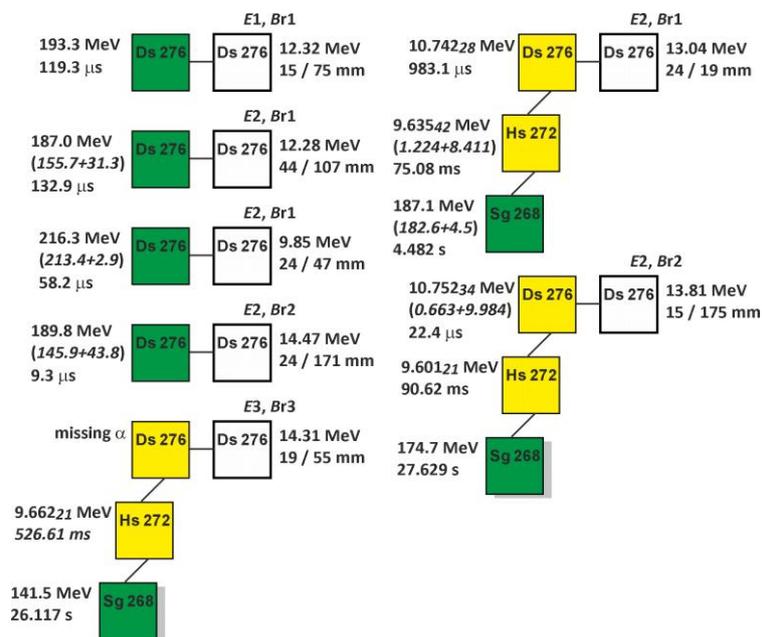


Рис. 2. Свойства распада  $^{276}\text{Ds}$ ,  $^{272}\text{Hs}$  и  $^{268}\text{Sg}$ . Верхние строки для каждой цепочки показывают энергию  $^{48}\text{Ca}$  ( $E_1 = 231$  МэВ,  $E_2 = 238$  МэВ,  $E_3 = 251$  МэВ) и магнитную жесткость сепаратора ( $B\rho_1 = 2.42$  Т м,  $B\rho_2 = 2.45$  Т м,  $B\rho_3 = 2.43$  Т м) (вверху открытого квадрата с обозначением “Ds 276”). В правой части квадрата указаны энергия ER, а также вертикальное и горизонтальное положение на детекторе (в мм). В строках слева указаны энергии  $\alpha$ -частиц (желтым цветом) и осколков SF (зеленым цветом) и временные интервалы между событиями. Энергии суммированных сигналов указаны в круглых скобках. События, отмеченные тенью, были зарегистрированы в периоды выключения пучка. Ошибки энергии  $\alpha$ -частиц выделены курсивом меньшего размера.

Суммарные свойства распада новых ядер в цепочке  $^{276}\text{Ds}$  приведены в таблице II.

Таблица II. В первых трех столбцах указаны ядро, тип распада и ветвь, а также период полураспада. В следующих четырех столбцах указаны энергия  $\alpha$ -частиц  $E_\alpha$ , энергия  $\alpha$ -распада  $Q_\alpha$  и парциальные периоды полураспада.

| Ядро              | Тип распада, ветвь (%) | Период полураспада        | $E_\alpha$ (МэВ) | $Q_\alpha$ (МэВ) | $T_\alpha$                | $T_{\text{SF}}$           |
|-------------------|------------------------|---------------------------|------------------|------------------|---------------------------|---------------------------|
| $^{276}\text{Ds}$ | SF: $57^{+15}_{-18}$   | $0.15^{+0.10}_{-0.04}$ мс | 10.746(28)       | 10.904(28)       | $0.36^{+0.32}_{-0.15}$ мс | $0.27^{+0.23}_{-0.10}$ мс |
| $^{272}\text{Hs}$ | $\alpha$               | $0.16^{+0.19}_{-0.06}$ с  | 9.628(21)        | 9.772(21)        |                           |                           |
| $^{268}\text{Sg}$ | SF                     | $13^{+17}_{-4}$ с         |                  |                  |                           |                           |

Сечения образования наиболее тяжелых элементов (максимум полного сечения хп-каналов) показаны на Рис. 3. Данные были получены при синтезе элементов с  $Z=108$  и  $112-118$  в реакциях слияния мишенных ядер от  $^{226}\text{Ra}$  до  $^{249}\text{Cf}$  с  $^{48}\text{Ca}$ . Теперь они впервые дополнены данными о синтезе нового изотопа элемента 110 в реакции  $^{232}\text{Th} + ^{48}\text{Ca}$ . Изотоп  $^{276}\text{Ds}$  образуется с сечением на порядок меньшим, чем у более легкого нуклида  $^{270}\text{Hs}$  ( $N = 162$ ) в реакции  $^{226}\text{Ra}(^{48}\text{Ca}, 4n)^{270}\text{Hs}$ . Напротив, при переходе в область более тяжелых элементов ( $Z > 110$ ) сечение увеличивается

Такое изменение полностью согласуется с теоретическими моделями, предсказывающими замкнутые оболочки с  $Z=108$ ,  $N=162$  и  $Z=114$ ,  $N=184$ . При предельных значениях масс атомных ядер эффект этих оболочек значительно увеличивает выживаемость самых тяжелых составных ядер и, таким образом, определяет существование сверхтяжелых

элементов. В связи с этим, значительное увеличение сечения от Ds к изотопам Fl и Mc, наблюдаемое в реакциях слияния с  $^{48}\text{Ca}$ , по сути, является восхождением на "остров стабильности" и шагом к магическим числам при  $Z=114$  и  $N=184$ .

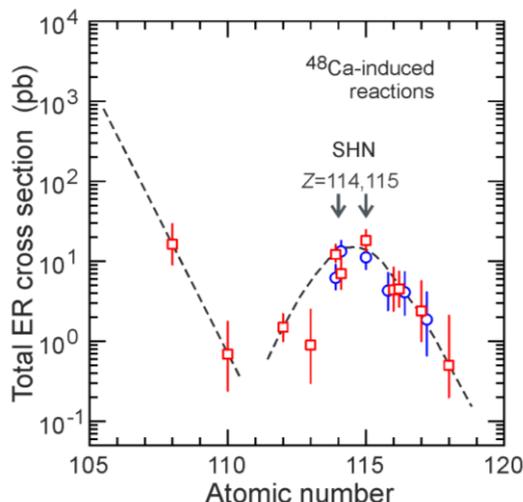


Рис. 3. Максимальные сечения образования изотопов тяжелых элементов в реакциях  $^{48}\text{Ca}$ , с  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{242,244}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{245,248}\text{Cm}$ ,  $^{249}\text{Bk}$  и  $^{249}\text{Cf}$ . Данные, измеренные на DGFRS и DGFRS-2, показаны красными квадратами, результаты, полученные на SHIP, BGS, TASCА и GARIS обозначены синими кружками. Линии нарисованы для наглядности.

В ходе эксперимента при энергии  $^{48}\text{Ca}$  231 МэВ, продолжавшегося менее месяца, была достигнута чувствительность около 70 фб, что указывает на большой потенциал для исследования сверхтяжелых ядер с низким сечением образования.

В ходе реакции  $^{232}\text{Th} + ^{48}\text{Ca}$ , изученной при двух из четырех самых высоких энергиях ионов, впервые был синтезирован новый нуклид  $^{275}\text{Ds}$ , продукт 5n-канала.

Некоторые параметры экспериментов приведены в таблице III.

Таблица III. Толщины мишеней из  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$ , энергии ионов в середине слоев мишени в лабораторной системе  $E_{\text{lab}}$ , результирующие интервалы энергии возбуждения  $E^*$ , суммарные дозы пучка, количество наблюдаемых цепочек распада  $^{276}\text{Ds}$  (4n),  $^{275}\text{Ds}$  (5n) и  $^{273}\text{Ds}$  (5n), а также величина сечения их образования  $\sigma$ .

| Реакция                            | Толщина мишени (мг/см <sup>2</sup> ) | $E_{\text{lab}}^a$ (МэВ) | $E^*$ (МэВ) | Доза $\times 10^{19}$ | Но. цепочек 4n/5n | $\sigma_{4n}$ (пб)     | $\sigma_{5n}$ (пб)     |
|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------|-------------------|------------------------|------------------------|
| $^{232}\text{Th} + ^{48}\text{Ca}$ | 0.65                                 | 250.6                    | 48.9-52.3   | 2.0                   | 1/1               | $0.11^{+0.46}_{-0.09}$ | $0.11^{+0.46}_{-0.09}$ |
| —                                  | —                                    | 257.0                    | 54.2-57.5   | 3.2                   | 0/5               | <0.2                   | $0.34^{+0.59}_{-0.16}$ |
| $^{238}\text{U} + ^{40}\text{Ar}$  | 0.69                                 | 212.2                    | 47.5-50.7   | 3.2                   | 0/2               | <0.3                   | $0.18^{+0.44}_{-0.12}$ |

Энергии  $\alpha$  частиц или осколков спонтанного деления и времена распада ядер в цепочках распада  $^{275}\text{Ds}$  показаны на Рис. 4.

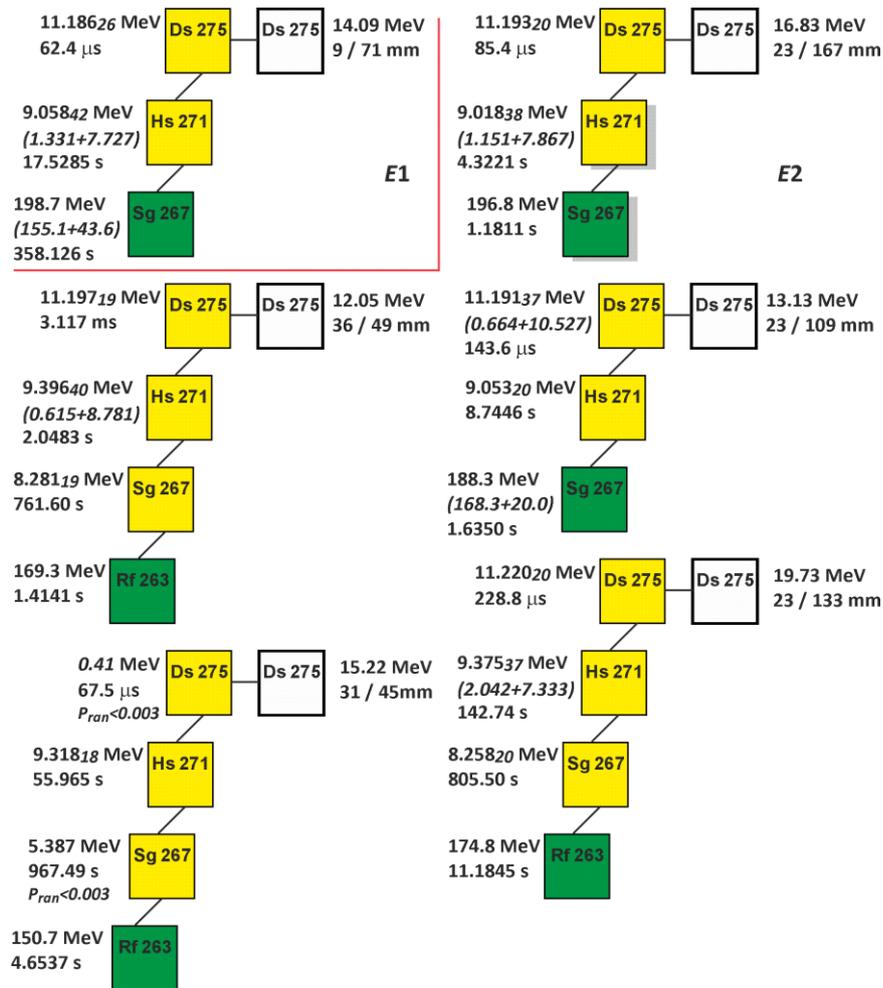


Рис. 4. То же, что и на Рис. 2, но для  $^{275}\text{Ds}$ , образующегося в реакции  $^{232}\text{Th} + ^{48}\text{Ca}$  при энергиях ионов  $E1 = 251$  МэВ и  $E2 = 257$  МэВ. Показаны вероятности случайного происхождения двух событий  $P_{\text{ran}}$ , эти частицы вылетели из фокального детектора, оставив в нем низкую энергию, но не попали в боковой детектор.

Распады  $^{275}\text{Ds}$  привели к образованию ранее синтезированных дочерних ядер  $^{271}\text{Hs}$ ,  $^{267}\text{Sg}$  и  $^{263}\text{Rf}$ , что означает первое наблюдение и идентификацию сверхтяжелого ядра, продукта слияния  $^{48}\text{Ca}$  с актинидным ядром, методом генетических корреляций с известными ядрами.

Измеренные энергии  $\alpha$ -частиц материнского ядра  $^{275}\text{Ds}$  аналогичны, и времена распада не указывают на возможные распады с разными периодами полураспада. Однако некоторая разница в энергии  $\alpha$ -частиц  $^{271}\text{Hs}$  и в типе распада последующего изотопа  $^{267}\text{Sg}$  позволяет предположить наличие распадов через разные возбужденные уровни.

Мы оценили свойства изотопов  $^{271}\text{Hs}$  и  $^{267}\text{Sg}$  отдельно для разных ветвей распада. Оказалось, что эти изотопы не только распадаются с разными энергиями  $\alpha$ -частиц ( $^{271}\text{Hs}$ ) или типами распада ( $^{267}\text{Sg}$ ), но и их периоды полураспада также заметно различаются, см. таблицу IV.

Таблица IV. Суммарные свойства распада ядер, синтезированных в реакции  $^{232}\text{Th} + ^{48}\text{Ca}$ . В первых трех столбцах указаны ядро, тип распада и экспериментальный период полураспада. В следующих пяти столбцах показаны энергия  $\alpha$ -частиц  $E_\alpha$ , энергия  $\alpha$ -распада  $Q_\alpha$ , а также рассчитанные значения спина и парциальных периодов полураспада относительно  $\alpha$ -распада и SF.

| Ядро              | Тип распада | $T_{1/2}^{\text{exp}}$    | $E_\alpha$ (МэВ) | $Q_\alpha$ (МэВ) | Спин | $T_a^{\text{calc}}$ | $T_{\text{SF}}^{\text{calc}}$ |
|-------------------|-------------|---------------------------|------------------|------------------|------|---------------------|-------------------------------|
| $^{275}\text{Ds}$ | $\alpha$    | $0.43^{+0.29}_{-0.12}$ мс | 11.20(2)         | 11.37(2)         | 3/2  | 0.22 мс             | 2.0 с                         |
| $^{271}\text{Hs}$ | $\alpha$    | $7.1^{+8.4}_{-2.5}$ с     | 9.05(2)          | 9.18(2)          | 3/2  | 5.1 с               | 6.0 мин                       |

|                   |          |                          |         |         |      |       |       |
|-------------------|----------|--------------------------|---------|---------|------|-------|-------|
| $^{271}\text{Hs}$ | $\alpha$ | $46^{+56}_{-16}$ с       | 9.34(2) | 9.48(2) | 11/2 | 63 с  | 21 ч  |
| $^{267}\text{Sg}$ | SF       | $100^{+92}_{-39}$ с      | –       | –       | 1/2  | 16 ч  | 140 с |
| $^{267}\text{Sg}$ | $\alpha$ | $9.8^{+11.3}_{-4.5}$ мин | 8.27(2) | 8.40(2) | 9/2  | 6 мин | 2.9 ч |
| $^{263}\text{Rf}$ | SF       | $5.1^{+4.6}_{-1.7}$ с    | –       | –       | 1/2  | 0.5 ч | 6.4 с |

В реакции  $^{238}\text{U}(^{40}\text{Ar},5n)$  наблюдались две цепочки распада  $^{273}\text{Ds}$  (см. таблицу III и Рис. 5). Свойства распада ядер в одной из них хорошо согласуются со свойствами ядер, измеренными в пяти цепочках распада материнского ядра  $^{277}\text{Cn}$ , полученного в реакции холодного слияния  $^{208}\text{Pb}(^{70}\text{Zn},1n)$ . Во второй цепочке энергия  $\alpha$ -частицы  $^{273}\text{Ds}$  оказалась примерно на 0.2 МэВ ниже, чем измеренная для  $^{273}\text{Ds}$  ( $E_\alpha \approx 11.10$  МэВ), а время распада (41.7 мс) на два порядка превышает его среднее время распада ( $T_{1/2} = 0.18^{+0.11}_{-0.05}$  мс), определенное по шести распадам. На основе этих результатов была предложена рабочая гипотеза о характере распада изотопов (см. таблицу V).

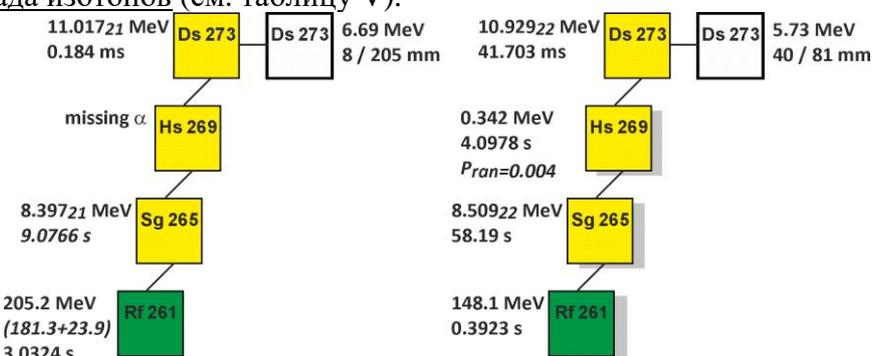


Рис. 5. То же, что и на Рис. 4, но для  $^{273}\text{Ds}$ , наблюдаемого в реакции  $^{238}\text{U} + ^{40}\text{Ar}$  при энергии ионов 212 МэВ (см. таблицу III).

Таблица V. То же, что в таблице IV, но для  $^{273}\text{Ds}$ .

| Ядро                | Тип распада | $T_{1/2}^{exp}$           | $E_\alpha$ (МэВ) | $Q_\alpha$ (МэВ) | Спин | $T_a^{calc}$ | $T_{SF}^{calc}$ |
|---------------------|-------------|---------------------------|------------------|------------------|------|--------------|-----------------|
| $^{273}\text{Ds}^a$ | $\alpha$    | $30^{+140}_{-15}$ мс      | 10.93(2)         | 11.09(2)         | 11/2 | 87 мс        | 110 с           |
| $^{273}\text{Ds}^b$ | $\alpha$    | $0.18^{+0.11}_{-0.05}$ мс | 11.10(7)         | 11.27(7)         | 1/2  | 0.21 мс      | 47 с            |
| $^{269}\text{Hs}^a$ | $\alpha$    | $13^{+10}_{-4}$ с         | 9.20(4)          | 9.34(4)          | 9/2  | 15 с         | 2.2 ч           |
| $^{269}\text{Hs}^b$ | $\alpha$    | $2.8^{+13.6}_{-1.3}$ с    | 9.08(15)         | 9.22(15)         | 1/2  | 3 с          | 14 мин          |
| $^{265}\text{Sg}^a$ | $\alpha$    | $8.5^{+2.6}_{-1.6}$ с     | 8.84(5)          | 8.97(5)          | 11/2 | 11 с         | 14 ч            |
| $^{265}\text{Sg}^b$ | $\alpha$    | $14.4^{+3.7}_{-2.5}$ с    | 8.69(5)          | 8.82(5)          | 3/2  | 12 с         | 59 мин          |
| $^{261}\text{Rf}^a$ | $\alpha$    | $68 \pm 3$ с              | 8.28(2)          | 8.41(2)          | 11/2 | 87 с         | 12 мин          |
| $^{261}\text{Rf}^b$ | SF          | $2.6^{+0.7}_{-0.5}$ с     | 8.51(6)          | 8.64(6)          | 3/2  | 7.4 с        | 3.7 с           |

Сечения образования ядер в реакциях  $^{232}\text{Th} + ^{48}\text{Ca}$  и  $^{238}\text{U} + ^{40}\text{Ar}$  показаны на Рис. 6. Как видно, сечения  $5n$ -каналов реакций при  $E^* \approx 50$  МэВ одинаковы в пределах экспериментальных погрешностей.

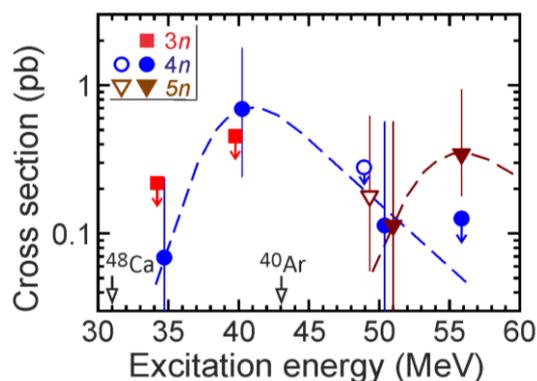


Рис. 6. Сечения от  $3n$ - до  $5n$ -испарительных каналов реакций  $^{232}\text{Th} + ^{48}\text{Ca}$  (закрытые символы) и  $^{238}\text{U} + ^{40}\text{Ar}$  (открытые символы). Символы со стрелками показывают верхние пределы сечения. Пунктирные линии, пересекающие данные, показаны для наглядности. Барьеры Басса показаны прямыми стрелками для сравнения.

Вторая часть экспериментов была связана с изучением процесса образования составного ядра. Чтобы понять возможности синтеза новых элементов 119 и 120, особенно важно определить наиболее оптимальные реакции. Этот вопрос зависит как от величины сечения реакции, так и от наличия необходимых мишенных изотопов и ускоряемых ионов. Для этого важно измерить сечения реакций, которые приводят к образованию более легких элементов, но сечения которых заведомо выше, например,  $^{242}\text{Pu}(^{50}\text{Ti},xn)^{292-x}\text{Lv}$  и  $^{238}\text{U}(^{54}\text{Cr},xn)^{292-x}\text{Lv}$ . Сечения этих реакций можно сравнить, например, с сечением реакции  $^{245}\text{Cm}(^{48}\text{Ca},2-3n)^{290,291}\text{Lv}$ , что может определить степень уменьшения сечения образования элемента 116 при переходе от  $^{48}\text{Ca}$  к  $^{54}\text{Cr}$ . Это поможет получить более достоверную информацию о процессе формирования составного ядра (вторая стадия процесса слияния-испарения, см. Рис. 1). Отметим, что до сих пор не было измерено сечение реакции полного слияния ядер актинидов с ионами тяжелее  $^{48}\text{Ca}$ .

Некоторые параметры эксперимента  $^{238}\text{U}(^{54}\text{Cr},xn)^{292-x}\text{Lv}$  и двух наблюдавшихся цепочек распада нового синтезированного изотопа  $^{288}\text{Lv}$  показаны на Рис. 7.

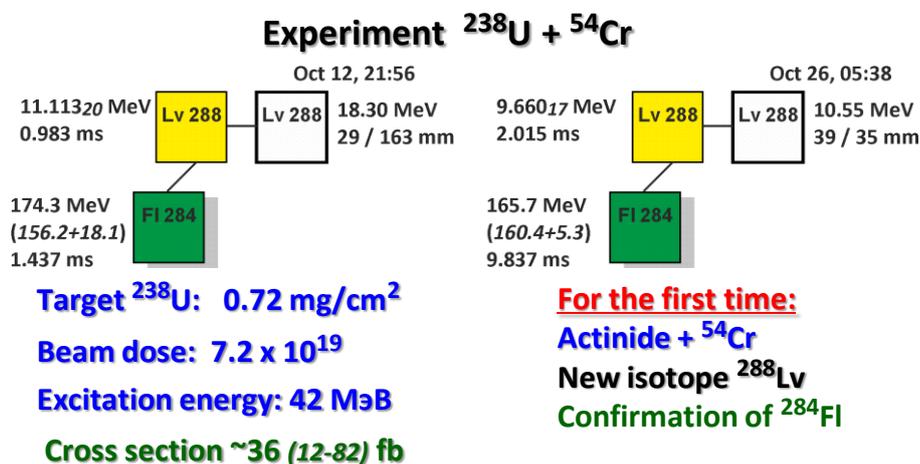


Рис. 7. Экспериментальные параметры и свойства ядер в цепочках распада нового изотопа  $^{288}\text{Lv}$ . Во второй цепочке полная энергия  $\alpha$ -частицы не была зарегистрирована (данные находятся в стадии анализа).

Из сравнения сечений образования изотопов элемента 116 в реакциях с  $^{48}\text{Ca}$  и  $^{54}\text{Cr}$  следует, что переход к более тяжелой частице привел к уменьшению сечения более чем в 100 раз, см. Рис. 8.

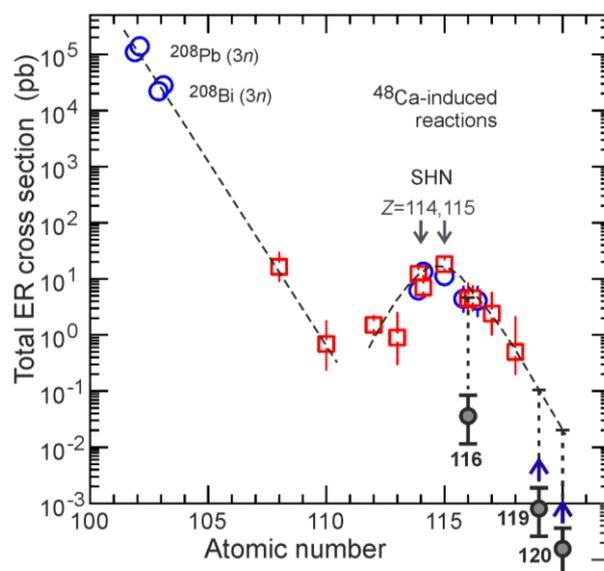


Рис. 8. То же, что и на Рис. 3, но с сечением реакции  $^{238}\text{U}(^{54}\text{Cr},4n)^{288}\text{Lv}$  и предварительными оценками для элементов 119 и 120, которые показаны черными кружками.

Если мы предположим, что падение сечений для элементов 119 и 120 в реакциях с  $^{48}\text{Ca}$  останется таким же, как это наблюдается при переходе от элементов 114, 115 к элементу 118, а переход от  $^{48}\text{Ca}$  к  $^{54}\text{Cr}$  приведет к дополнительному и аналогичному падению сечений, то ожидаемое значение сечения реакции  $^{243}\text{Am}+^{54}\text{Cr} \rightarrow ^{297}119^*$  составит около 1 фб и будет еще ниже для элемента 120. В этом случае, чтобы получить один атом элемента 119, продолжительность эксперимента должна составить около 3 лет.

Однако следует отметить, что такая формальная экстраполяция не совсем оправдана, поскольку сравниваются сечения реакций  $^{248}\text{Cm}+^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{293,296}\text{Lv}^*$  ( $N=177, 180$ ) и  $^{238}\text{U}+^{54}\text{Cr} \rightarrow ^{292}\text{Lv}^*$  ( $N=176$ ), которые приводят к образованию различных составных ядер. Но вероятность выживания для  $^{293,296}\text{Lv}^*$ , согласно расчетам, должна быть выше (см. Рис. 1). Если это так, то коэффициент падения сечения, обусловленный изменением сечения захвата и вероятности образования составного ядра при переходе к более тяжелому иону  $^{54}\text{Cr}$  и приводящий к  $^{292}\text{Lv}^*$ , должен быть меньше.

Исходя из вышеизложенного, важными направлениями исследований являются:

1. При открытии новых элементов особое внимание уделяется их идентификации. Одним из основных методов является регистрация  $\alpha$ -распадов новых ядер, за которыми следуют  $\alpha$ -распады известных ядер. Альфа-распад  $^{293,294}119$ , продуктов реакции  $^{243}\text{Am}(^{54}\text{Cr},3-4n)$ , приводит к образованию неизвестных изотопов  $^{289,290}\text{Ts}$ . Свойства дочерних ядер в цепочке распада  $^{290}\text{Ts}$  ( $^{286}\text{Mc} - ^{266}\text{Db}$ ) были определены нами ранее, но свойства ядер в цепочке распада  $^{293}119$  неизвестны. Наиболее оптимальным способом решения этой проблемы является синтез ядер  $^{281,282}\text{Nh}$  в реакции  $^{237}\text{Np}(^{48}\text{Ca},3-4n)$ . Будет возможным не только получить больше ядер  $^{282}\text{Nh}$ , но и впервые синтезировать и изучить свойства новых ядер  $^{281}\text{Nh}$ ,  $^{277}\text{Rg}$ ,  $^{273}\text{Mt}$ ,  $^{269}\text{Bh}$ ,  $^{265}\text{Db}$ .

2. Сечения реакций, приводящих к образованию изотопов элементов 119 и 120, могут отличаться в 8 раз (при использовании одного и того же иона, см. Рис. 8). Согласно расчетам, эти сечения могут отличаться в 10 раз, если использовать разные ионы  $^{50}\text{Ti}$  и  $^{54}\text{Cr}$  для синтеза одного элемента (Рис. 1). Экспериментальные оценки вероятности образования составного ядра в реакциях с  $^{50}\text{Ti}$  и  $^{54}\text{Cr}$  свидетельствуют об уменьшении сечения при переходе от  $^{50}\text{Ti}$  к  $^{54}\text{Cr}$  примерно в 4 раза. Для измерения этого фактора большое значение имеет эксперимент, в котором составное ядро  $^{292}\text{Lv}^*$  будет получено в реакции  $^{242}\text{Pu}+^{50}\text{Ti}$ , которое наблюдалось в реакции  $^{238}\text{U}+^{54}\text{Cr} \rightarrow ^{292}\text{Lv}^*$ .