

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

Рис. 2.

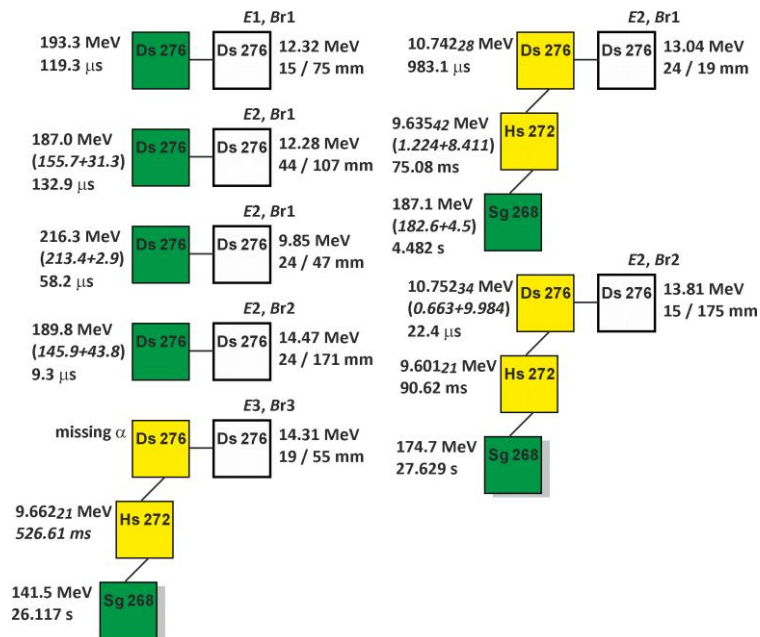


Рис. 2. Свойства распада ^{276}Ds , ^{272}Hs и ^{268}Sg . Верхние строки для каждой цепочки показывают энергию ^{48}Ca ($E_1 = 231$ МэВ, $E_2 = 238$ МэВ, $E_3 = 251$ МэВ) и магнитную жесткость сепаратора ($B\rho_1 = 2.42$ Т м, $B\rho_2 = 2.45$ Т м, $B\rho_3 = 2.43$ Т м) (вверху открытого квадрата с обозначением “Ds 276”). В правой части квадрата указаны энергия ER, а также вертикальное и горизонтальное положение на детекторе (в мм). В строках слева указаны энергии α -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 α -частиц выделены курсивом меньшего размера.

Суммарные свойства распада новых ядер в цепочке ^{276}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 α -частиц E_α , энергия α -распада Q_α и парциальные периоды полураспада.

Ядро	Тип распада, ветвь (%)	Период полураспада	E_α (МэВ)	Q_α (МэВ)	T_α	T_{SF}
^{276}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}Hs	α	$0.16^{+0.19}_{-0.06}$ с	9.628(21)	9.772(21)		
^{268}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}Ra до ^{249}Cf с ^{48}Ca . Теперь они впервые дополнены данными о синтезе нового изотопа элемента 110 в реакции $^{232}\text{Th} + ^{48}\text{Ca}$. Изотоп ^{276}Ds образуется с сечением на порядок меньшим, чем у более легкого нуклида ^{270}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}Ca , по сути, является восхождением на "остров стабильности" и шагом к магическим числам при $Z=114$ и $N=184$.

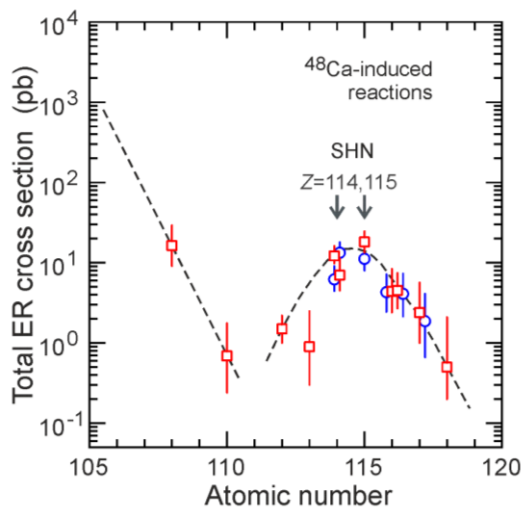


Рис. 3. Максимальные сечения образования изотопов тяжелых элементов в реакциях ^{48}Ca , с ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U , $^{242,244}\text{Pu}$, ^{243}Am , $^{245,248}\text{Cm}$, ^{249}Bk и ^{249}Cf . Данные, измеренные на DGFRS и DGFRS-2, показаны красными квадратами, результаты, полученные на SHIP,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

В ходе эксперимента при энергии ^{48}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}Ds , продукт 5n-канала.

Некоторые параметры экспериментов приведены в таблице III.

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

Реакция	Толщина мишени (мг/см ²)	E_{lab}^a (МэВ)	E^* (МэВ)	Доза $\times 10^{19}$	Но. цепочек 4n/5n	σ_{4n} (пб)	σ_{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 α частиц или осколков спонтанного деления и времена распада ядер в цепочках распада ^{275}Ds показаны на Рис. 4.

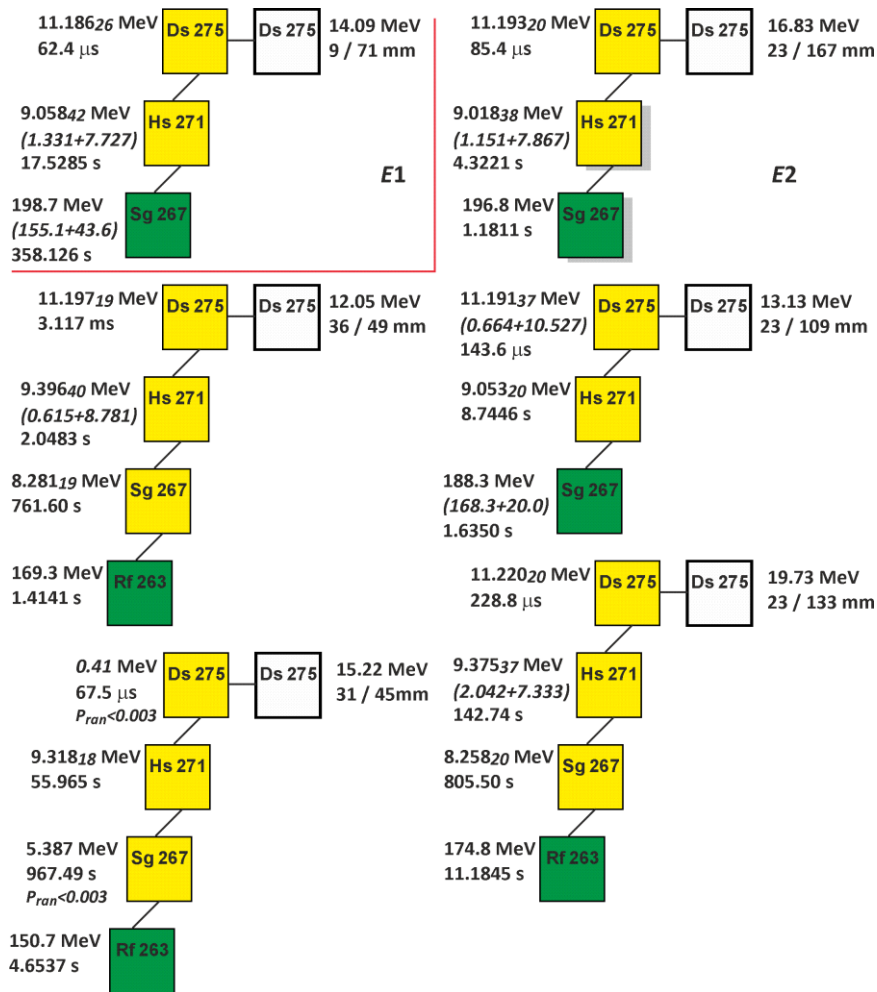


Рис. 4. То же, что и на Рис. 2, но для ^{275}Ds , образующегося в реакции $^{232}\text{Th} + ^{48}\text{Ca}$ при энергиях ионов $E1 = 251$ МэВ и $E2 = 257$ МэВ. Показаны вероятности случайного происхождения двух событий P_{ran} , эти частицы вылетели из фокального детектора, оставив в нем низкую энергию,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

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

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

Мы оценили свойства изотопов ^{271}Hs и ^{267}Sg отдельно для разных ветвей распада. Оказалось, что эти изотопы не только распадаются с разными энергиями α -частиц (^{271}Hs) или типами распада (^{267}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 α -частиц E_α , энергия α -распада Q_α , а также рассчитанные значения спина и парциальных периодов полураспада относительно α -распада и SF.

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

^{271}Hs	α	46^{+56}_{-16} с	9.34(2)	9.48(2)	11/2	63 с	21 ч
^{267}Sg	SF	100^{+92}_{-39} с	–	–	1/2	16 ч	140 с
^{267}Sg	α	$9.8^{+11.3}_{-4.5}$ мин	8.27(2)	8.40(2)	9/2	6 мин	2.9 ч
^{263}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}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}Cn , полученного в реакции холодного слияния $^{208}\text{Pb}(^{70}\text{Zn},1n)$. Во второй цепочке энергия α -частицы ^{273}Ds оказалась примерно на 0.2 МэВ ниже, чем измеренная для ^{273}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).

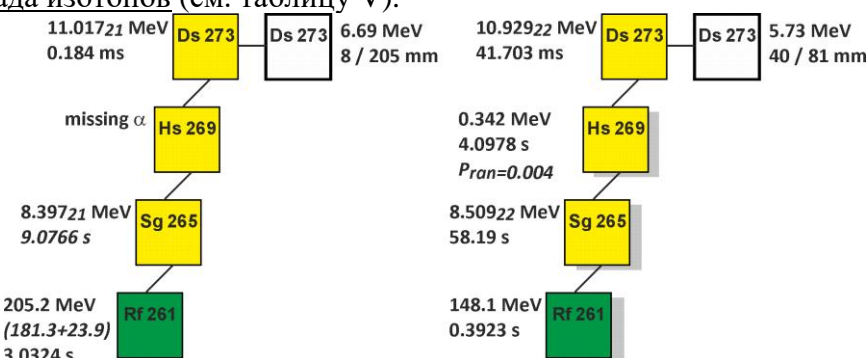


Рис. 5. То же, что и на Рис. 4, но для ^{273}Ds , наблюдаемого в реакции $^{238}\text{U} + ^{40}\text{Ar}$ при энергии ионов 212 МэВ (см. таблицу III).

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

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

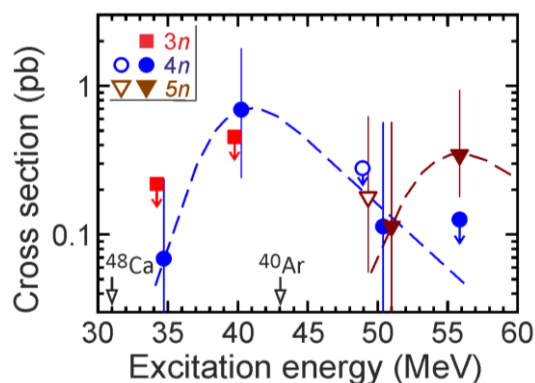


Рис. 6. Сечения от $3n$ - до $5n$ -испарительных каналов реакций $^{232}\text{Th} + ^{48}\text{Ca}$ (закрытые символы) и $^{238}\text{U} + ^{40}\text{Ar}$ (открытые символы). Символы со стрелками показывают верхние пределы сечения. Пунктирные линии, пересекающие данные, показаны для наглядности. Барьеры 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}Ca к ^{54}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}Ca .

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

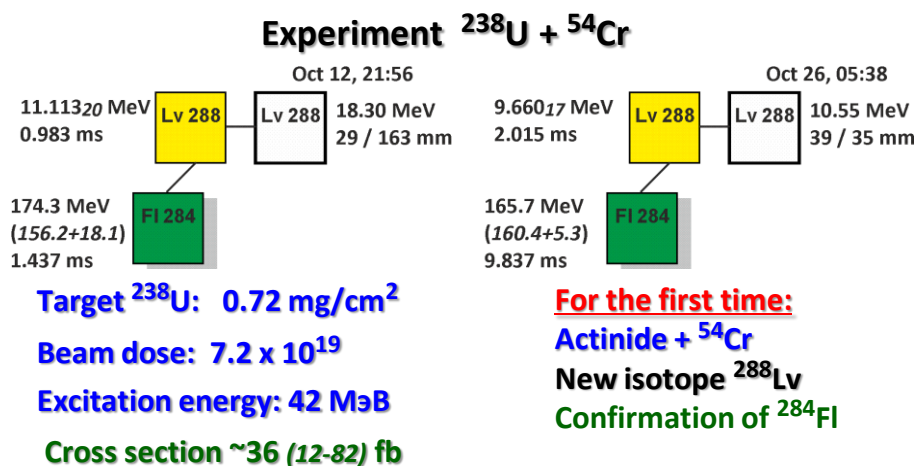


Рис. 7. Экспериментальные параметры и свойства ядер в цепочках распада нового изотопа ^{288}Lv . Во второй цепочке полная энергия α -частицы не была зарегистрирована (данные находятся в стадии анализа).

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

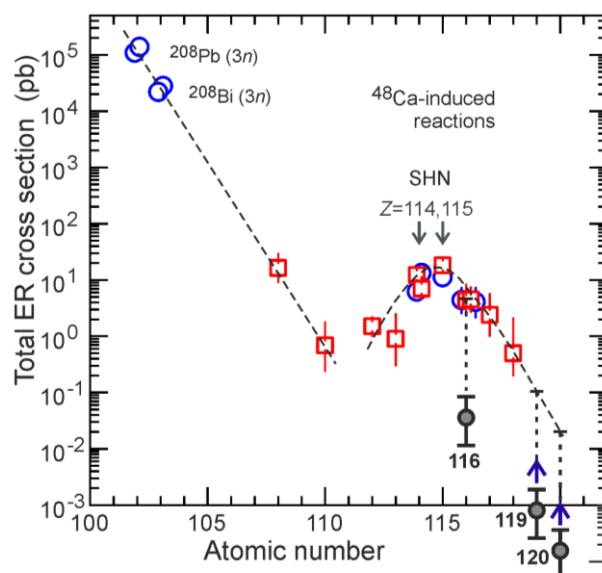


Рис. 8. То же, что и на Рис. 3, но с сечением реакции $^{238}\text{U}(^{54}\text{Cr},4n)^{288}\text{Lv}$ и предварительными оценками для элементов 119 и 120, которые показаны черными кружками.

Если мы предположим, что падение сечений для элементов 119 и 120 в реакциях с ^{48}Ca останется таким же, как это наблюдается при переходе от элементов 114, 115 к элементу 118, а переход от ^{48}Ca к ^{54}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}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 α -распадов новых ядер, за которыми следуют α -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}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}Nh , но и впервые синтезировать и изучить свойства новых ядер ^{281}Nh , ^{277}Rg , ^{273}Mt , ^{269}Bh , ^{265}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}Ti и ^{54}Cr для синтеза одного элемента (Рис. 1). Экспериментальные оценки вероятности образования составного ядра в реакциях с ^{50}Ti и ^{54}Cr свидетельствуют об уменьшении сечения при переходе от ^{50}Ti к ^{54}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 $^{238}\text{U}+^{54}\text{Cr} \rightarrow ^{292}\text{Lv}^*$.