

ДОКЛАДЫ ЛАУРЕАТОВ БОЛЬШОЙ ЗОЛОТОЙ МЕДАЛИ  
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК 2017 ГОДА

СВЕРХТЯЖЁЛЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

© 2019 г. Ю.Ц. Оганесян

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

E-mail: oganessian@jinr.ru

Поступил в редакцию 12.02.2019 г.

Поступил после доработки 12.02.2019 г.

Принят к публикации 04.03.2019 г.

Доклад посвящён синтезу сверхтяжёлых элементов, предсказанных микроскопической теорией ядра<sup>1</sup>. Тяжелейшие элементы с  $Z = 114–118$  были синтезированы в Лаборатории ядерных реакций Объединённого института ядерных исследований в Дубне в реакциях слияния ядер актиноидов с ядрами  $^{48}\text{Ca}$ , полученными на ускорительном комплексе У-400. Эксперименты проводились в сотрудничестве с физиками и химиками национальных лабораторий США в Ливерморе, Ок-Ридже и Университета Вандербильта в Нашвилле. Открытие этих элементов позволило завершить VII период Периодической системы химических элементов. Фундаментальные предсказания микроскопической теории ядра о возможном существовании сверхтяжёлых элементов получили экспериментальное подтверждение. Для проведения дальнейших исследований в области сверхтяжёлых ядер в ЛЯР ОИЯИ создана специальная лаборатория "Фабрика сверхтяжёлых элементов".

*Ключевые слова:* сверхтяжёлые элементы, "остров" стабильности, микроскопическая теория атомного ядра, реакции синтеза.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5873896563-570>

ОСНОВЫ МИРОЗДАНИЯ

В течение 22 веков – от Демокрита (ок. 460–370 до н.э.) до Дальтона (1766–1844) – считалось, что окружающий нас материальный мир состоит из мельчайших неделимых частиц – атомов, строительных кирпичей мироздания. Всего 36 химических элементов – разновидностей атомов, известных Дальтону, легли в основу картины мира, став своего рода алфавитом его сотворения. Периодическая система химических элементов, открытая в 1869 г. русским учёным Д.И. Менделеевым, демонстрирующая закономерность химического поведения известных к тому времени уже 63 элементов, показала,

что атом (элемент) имеет внутреннюю структуру, лежащую в основе этой закономерности. Действительно, через 26 лет, в 1897 г., Дж.Дж. Томсон обнаружил в атоме мельчайшие отрицательно заряженные частицы – электроны. Спустя 14 лет Э. Резерфорд предложил свою планетарную модель атома в виде плотного ядра, несущего практически всю массу и весь положительный заряд атома, и электронов,двигающихся вокруг ядра на большом расстоянии. В первой теоретической модели (Г.А. Гамов, 1928) атомное ядро рассматривалось как сферическая, равномерно заряженная капля, которая состоит из особой материи, напоминающей жидкость. Модель оказалась весьма продуктивной. На её основе Гамов построил теорию альфа-распада (1928), автор известной формулы К. Ф. фон Вайцзеккер рассчитал энергию связи протонов и нейтронов в ядрах (1935), а Н. Бор и Дж.А. Уилер создали капельную теорию ядерного деления (1939).



ОГАНЕСЯН Юрий Цолакович – академик РАН, научный руководитель Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрва ОИЯИ.

<sup>1</sup> Доклад Ю.Ц. Оганесяна на английском языке опубликован в журнале "Nuclear Physics News". 2019. V. 29. № 1. P. 5–10. <https://doi.org/10.1080/10619127.2019.1571799>

## СТРУКТУРА И СТАБИЛЬНОСТЬ ТЯЖЕЛЕЙШИХ ЯДЕР

Согласно теории Бора и Уилера, тяжёлое ядро предохраняет от разделения на два осколка потенциальный барьер. Высота барьера деления для ядра  $^{238}\text{U}$  равна 6 МэВ. Парциальный период спонтанного деления ядра  $^{238}\text{U}$  составляет  $T_{\text{сд}} = 10^{16}$  лет (Г.Н. Флёрв, К.А. Петржак, 1940). Для ядер тяжелее урана повышение заряда ядра приводит к понижению барьера деления и сильному уменьшению  $T_{\text{сд}}$ . С исчезновением барьера ( $V_f \approx 0$ ) ядро разделится на два осколка за кратчайшее время:  $T_{\text{сд}} = 10^{-19}$  с. В модели жидкой капли этот предел наступает уже для ядер с  $Z \geq 100$ . Предел же существования элементов (атомов) начинается чуть раньше, так как при  $T_{\text{сд}} \leq 10^{-14}$  с ядро распадается, прежде чем вокруг него возникнут орбитальные электроны.

Прикладная значимость ядерного деления — нового источника энергии — стала быстро возрастать, однако далеко не все данные, полученные в исследованиях этого процесса, описывались капельной моделью деления. Открытие спонтанно делящихся изомеров (1962) в 33 изотопах от U до Cf прямо противоречило модели жидкой капли. Изомерия ядерных форм, наличие у ядер двух (иногда трёх) состояний, из которых происходит спонтанное деление, не совместима с представлением о ядре как о бесструктурной, аморфной материи. В теории, описывающей свойства тяжёлых ядер, надо было строить новый дом. Он создавался поэтапно многими теоретиками мира, причём весьма быстро и увлечённо. Я с удовольствием перечислил бы все имена замечательных учёных, внёсших вклад в строительство здания микроскопической теории ядра, но ограниченный объём статьи не позволяет развернуться в полной мере. Более интересное представление о развитии этой науки читатель может получить из главы, написанной профессором А. Собичевским в нашей совместной публикации в журнале "Physica

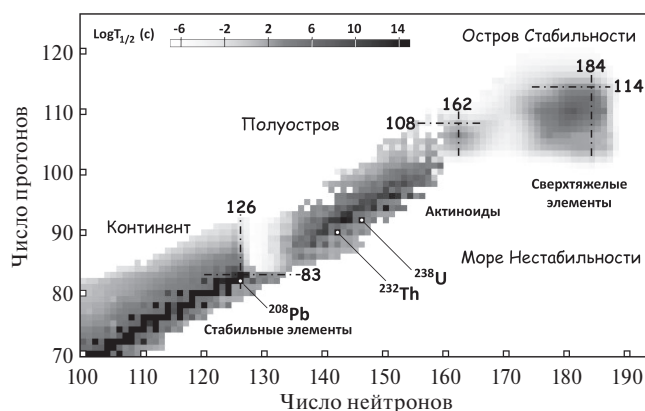


Рис. 1. Карта тяжёлых нуклидов

Scripta" [1]. Скажу только, что к концу 1989 г. о физике тяжёлых ядер уже говорили как о значительном событии в построении микроскопической теории атомного ядра.

Одним из фундаментальных следствий новой теории стало предсказание о возможном существовании гипотетических сверхтяжёлых элементов. В тяжёлом ядре движение его нуклонов на пути к делению связано с коллективными степенями свободы всей системы. Наиболее ярко влияние этой связи проявляется в делении тяжелейших ядер, которые могут существовать только благодаря особой внутренней структуре ядра — эффекту так называемых замкнутых оболочек, возникающих при определённых числах протонов и нейтронов: 2, 8, 20, 28, 50, 82 и 126. С этой точки зрения синтез и изучение свойств распада сверхтяжёлых ядер является прямой проверкой базисных положений микроскопической теории ядра.

На карте нуклидов сверхтяжёлые ядра очерчивают границы предельных ядерных масс. Сверхтяжёлые атомы определяют также предел Периодической таблицы химических элементов. Исследования по поиску сверхтяжёлых элементов в природе открывают новые пути проверки различных сценариев нуклеосинтеза.

Сегодня в литературе сверхтяжёлыми элементами часто именуется ядра с  $Z > 100$ . На самом деле это расплывчатое обобщение не отражает сути дела. Существование ядер второй сотни ожидается там, где будут возникать новые замкнутые оболочки. В области трансактиноидов (элементов с  $Z > 103$ ), по предсказаниям макро-микроскопической модели ядра, оболочки ожидалось для деформированных ядер с числом протонов  $Z = 108$  и числом нейтронов  $N = 162$ . Ещё более сильный эффект предсказывался для сферических — сверхтяжёлых ядер с  $Z = 114$  и  $N = 184$ , подобных по форме и внутренней структуре дважды "магическому" ядру  $^{208}\text{Pb}$  ( $Z = 82$ ,  $N = 126$ ) [2–4]. По мере удаления от "магических" чисел, эффект оболочек быстро уменьшается, что приводит к резкому падению стабильности ядер. Поэтому области существования сверхтяжёлых элементов (СТЭ) имеют вид "островов" с крутыми склонами, погружённых в глубокое "море нестабильности", где в отсутствие эффекта ядерных оболочек элементы существовать не могут (рис. 1).

## ПОИСК ГИПОТЕТИЧЕСКИХ СВЕРХТЯЖЁЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

После первых впечатляющих публикаций оценочных расчётов периодов полураспада ядерных тяжеловесов, находящихся в вершинах "острова", сравнимых в некоторых случаях с возрастом

Солнечной системы, начался экспериментальный штурм гипотетических СТЭ. В то время, в конце 1960-х годов, в Национальной лаборатории им. Э. Лоуренса в Беркли (США) и Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ в Дубне шли трудные, но уже обнадёживавшие эксперименты по синтезу 105-го элемента. Неудивительно, что синтез 115-го элемента казался тогда почти несбыточной мечтой.

Перед каждой лабораторией стояла задача найти способ обнаружения/получения сверхтяжёлых элементов. СТЭ искали в природе: в земных и лунных образцах, в космических лучах. Были сделаны попытки их искусственного синтеза с использованием высокопоточных ядерных реакторов, мощных ускорителей тяжёлых ионов и даже ядерных взрывов, созданы уникальные установки и методики с рекордной чувствительностью для сепарации и регистрации редчайших событий образования и распада сверхтяжёлых нуклидов. К сожалению, все усилия по синтезу сверхтяжёлых элементов, предпринятые в различных лабораториях в 1970–1985 гг., не дали результата. Это породило некий пессимизм. В статьях и выступлениях часто встречались суждения, что красивая теоретическая гипотеза о СТЭ, может быть, и имеет право на жизнь, но доказать её справедливость практически невозможно.

Здесь надо сделать важное отступление. В 1974 г. в двух лабораториях с разницей в несколько месяцев были получены первые результаты по синтезу нового 106-го элемента (Sg): в Беркли – в реакции слияния  $^{249}\text{Cf} + ^{18}\text{O} \rightarrow ^{263}\text{Sg} + 4n$  [5], в Дубне – в реакции  $^{208}\text{Pb} + ^{54}\text{Cr} \rightarrow ^{261,260}\text{Sg} + 1n, 2n$  [6]. Сечение образования изотопов Sg в них примерно одинаково. Но есть существенное различие в способе его получения. В слиянии с "магическим" ядром  $^{208}\text{Pb}$  энергия возбуждения компаунд-ядра  $^{262}\text{Sg}^*$  на кулоновском барьере реакции примерно втрое меньше, чем в реакции  $^{249}\text{Cf} + ^{18}\text{O}$ . Происходит своего рода холодное слияние, что способствует выживанию компаунд-ядра в процессе его охлаждения эмиссией нейтронов [7]. Если в первом случае Cf является наиболее тяжёлым мишенным материалом, нарабатываемым в достаточном количестве в ядерном реакторе, то в реакциях холодного слияния с мишенями из  $^{208}\text{Pb}$  или  $^{209}\text{Bi}$  можно наращивать массу и заряд бомбардирующего иона, получая при этом слабо нагретое компаунд-ядро. Синтез элементов можно вести до тех пор, пока чувствительность эксперимента позволяет наблюдать продукты реакции ядерного слияния. Именно по этому сценарию развивались события последующих 38 лет. Основные работы по синтезу элементов тяжелее Sg проводились в Институте тяжёлых

ионов (Gesellschaft für Schwerionenforschung – GSI, Дармштадт, Германия) с участием физиков и химиков Европы и стран других континентов. Описание экспериментов по синтезу и исследованию свойств распада шести тяжелейших в то время элементов с  $Z = 107–112$  читатель может найти в оригинальных работах и замечательных обзорах П. Армбрустера, Г. Мюнценберга и З. Хофмана [8–10]. Там же приводятся результаты интересных исследований механизма взаимодействия массивных ядер вплоть до реакций под действием пучка ионов  $^{238}\text{U}$  с мишенями из  $^{238}\text{U}$  и  $^{248}\text{Cm}$ . Наконец, значительно позже, уже в новом столетии, проявив определённую смелость и терпение, в Институте физико-химических исследований (Rikagaku Kenkyūsho – RIKEN, Токио, Япония) в реакции  $^{209}\text{Bi} + ^{70}\text{Zn}$  был синтезирован 113-й элемент (Nh) [11].

В реакциях холодного слияния дважды "магическое" деформированное ядро  $^{270}\text{Hs}$  не удалось синтезировать (его получили позже в реакциях под действием пучка ионов  $^{48}\text{Ca}$ ). Однако сам факт существования ядер с  $Z = 106–112$ , расположенных вокруг замкнутых оболочек  $Z = 108, N = 162$ , и характер их последовательных альфа-распадов оказались весьма близкими к расчётам макромикроскопической модели ядра. В связи с этим стали убедительнее выглядеть предположения о существовании обширного "острова" более тяжёлых (сверхтяжёлых) и более стабильных ядер, который возникает вследствие эффекта следующих – сферических – оболочек  $Z = 114$  и  $N = 184$ . Но по-прежнему все трудности их получения и исследования были связаны с реакциями синтеза СТЭ, так как ни один из каналов взаимодействия ядер стабильных изотопов (пучки радиоактивных ионов исключались по причине их крайне низкой интенсивности) не мог создать столь массивное ядро, содержащее более 60% нейтронов.

## РЕАКЦИИ СИНТЕЗА

Иллюстрацией к сказанному может служить популярный рисунок 2, где карта нуклидов показана вместе с кораблями (реакциями), призванными совершить путешествие к берегам мистического острова. Все они когда-то приводили исследователей к заветным целям. Но теперь эти корабли не в состоянии совершить столь длительное плавание. Действительно, (n,γ)-реакции даже в огромных потоках нейтронов ядерных взрывов не позволяют удалиться от U-Pu-берега более чем на 20 массовых единиц; реакции под действием лёгких ионов дают возможность пройти лишь полпути до острова; реакции холодного слияния ядер  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{209}\text{Bi}$  с массивными ионами с массой  $A \geq 70$  а.е.м. ведут мимо острова. Не хватает ней-

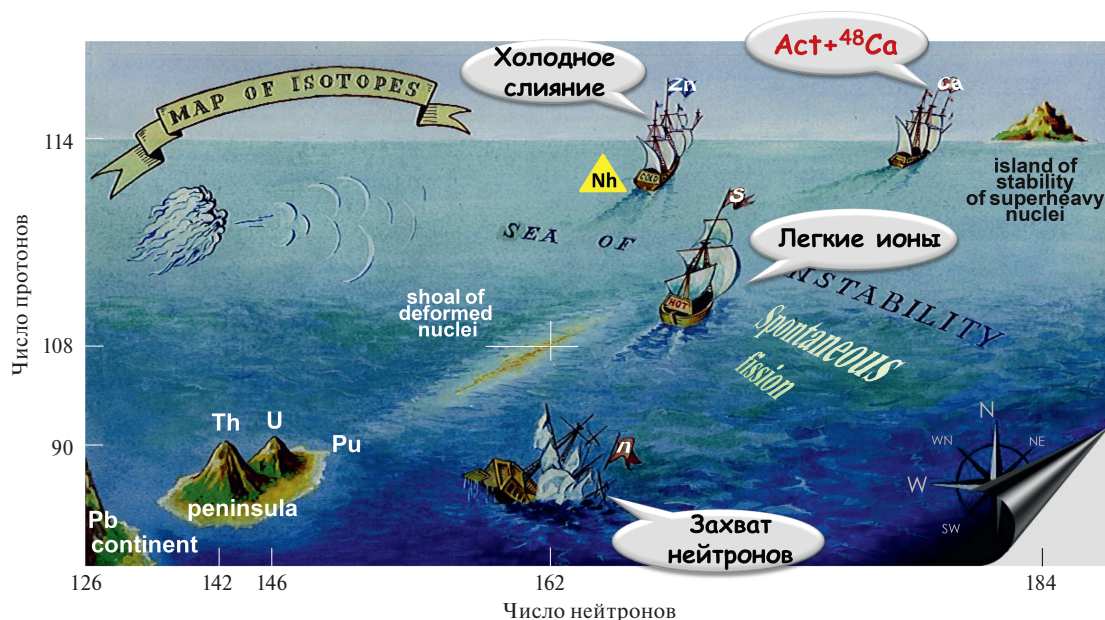


Рис. 2. Карта изотопов – символическое изображение "окраин" Таблицы Д.И. Менделеева: учёные стремятся достичь "острова" стабильных элементов, преодолев "море нестабильности"

тронов в сталкивающихся ядрах – это, пожалуй, принципиальное ограничение реакций данного типа.

В подобной ситуации остаётся единственная возможность – наращивать число нейтронов в сливающихся ядрах. Но этот путь, как выяснится дальше, сильно усложнил эксперимент [12]. Для синтеза 114-го элемента была выбрана реакция горячего слияния  $^{244}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{292}\text{Fl}^*$ , где ядром-мишенью является долгоживущий изотоп  $^{244}\text{Pu}$  ( $8 \cdot 10^7$  лет), а бомбардирующим ядром – стабильный, но редкий и очень дорогостоящий изотоп  $^{48}\text{Ca}$ . Компаунд-ядро  $^{292}\text{Fl}^*$ , содержащее 114 протонов и 178 нейтронов, всё ещё удалено от

дважды "магического" ядра  $^{298}\text{Fl}$  ( $Z = 114, N = 184$ ) на 6 нейтронов. Но здесь теорией предсказывался заметный рост барьера деления сверхтяжёлого компаунд-ядра, что должно было существенно увеличить его выживаемость в процессе охлаждения эмиссией нейтронов. Ожидания оправдались: сечение образования  $^{288}\text{Fl}$  в реакции  $^{244}\text{Pu} + ^{48}\text{Ca}$  оказалось примерно в 500 раз выше сечения образования более лёгкого ядра  $^{278}\text{Nh}$  ( $Z = 113$ ), полученного позднее в реакции холодного слияния  $^{209}\text{Bi} + ^{70}\text{Zn}$ .

Результаты первых экспериментов с  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$ , проведённых в 2000 г., несмотря на малое число событий, показали много общего с предсказаниями теории (рис. 3). Сценарии распада и свойства ядер в цепочках последовательных альфа-распадов изотопов 114-го и 116-го элементов находились в хорошем согласии с упомянутыми выше расчётами макро-микроскопической модели. Наиболее показательны периоды полураспада новых ядер. Самые тяжёлые изотопы 110-го и 112-го элементов, полученные в реакциях холодного слияния, в реакциях с  $^{48}\text{Ca}$  имеют дополнительно 8 нейтронов. В результате их периоды полураспада возрастают примерно в  $10^5$  раз! Подобный эффект свидетельствует о том, что нейтронно-избыточные изотопы этих элементов уже вошли в область действия нейтронной оболочки  $N = 184$ . Отметим, что приведённые на рисунке 3 тяжёлые изотопы 114-го и 116-го элементов всё ещё удалены от оболочки  $N = 184$  на 9 и 7 нейтронов соответственно.

Дальнейшие события развивались достаточно быстро. Используя в качестве мишеней доступ-

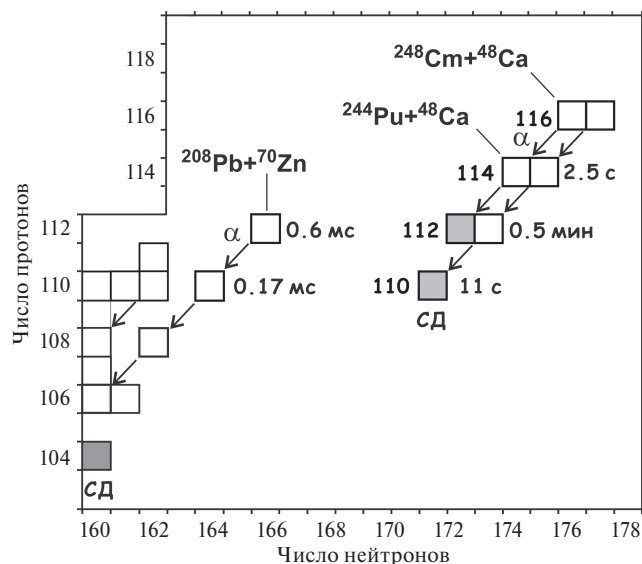


Рис. 3. Результаты экспериментов  $^{244}\text{Pu}$ ,  $^{248}\text{Cm} + ^{48}\text{Ca}$

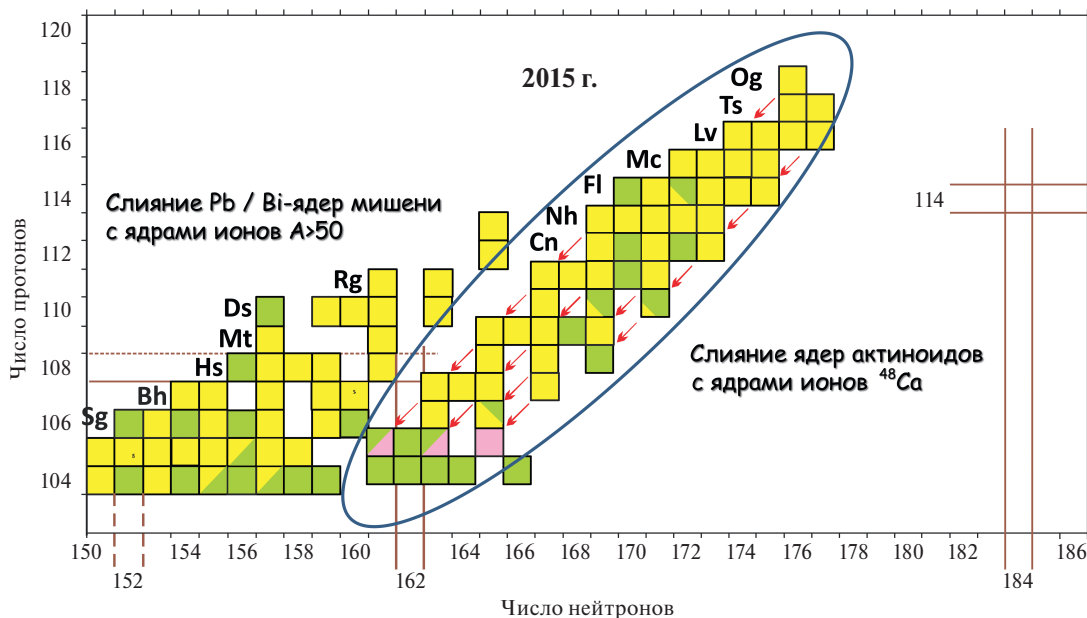


Рис. 4. Карта нуклидов тяжёлых и сверхтяжёлых элементов. В овале – 55 нейтронно-обогащённых нуклидов с  $Z = 104–118$ , синтезированных в реакциях под действием  $^{48}\text{Ca}$

ные и относительно долгоживущие изотопы Ra, U, Pu, Cm и Cf в ядерных реакциях с  $^{48}\text{Ca}$ , были синтезированы различные изотопы  $Z$ -чётных элементов от 108-го до 118-го [13–18]. Практически все синтезированные ядра испытывают один или несколько альфа-распадов, которые заканчиваются спонтанным делением. Вследствие сильных запретов на спонтанное деление у ядер с нечётным числом нейтронов цепочки длиннее, чем у чётно-чётных изотопов. Энергии альфа-переходов для всех 19 нуклидов, берущих начало от материнских ядер с чётным числом протонов, согласуются с предсказаниями различных моделей в пределах 5–7%. В распаде дважды "магического" ядра  $^{270}\text{Hs}$  ( $Z = 108$ ,  $N = 162$ ) спонтанное деление не наблюдалось ( $T_{\text{сд}} \geq 10$  с). Однако с ростом числа нейтронов в области  $N > 162$  парциальный период спонтанного деления быстро уменьшается: у изотопа  $^{277}\text{Hs}$  ( $N = 169$ )  $T_{\text{сд}} \approx 3$  мс. Следует отметить, что не только ядро  $^{277}\text{Hs}$ , но и изотопы других элементов с  $Z = 110$ , 112 и 114 в области  $N = 169–170$  испытывают спонтанное деление с периодом полураспада несколько миллисекунд. Эта своего рода яма находится между замкнутыми нейтронными оболочками  $N = 162$  и  $N = 184$  – там, где эффект оболочек минимален. Действительно, при  $N > 171$  парциальный период  $T_{\text{сд}}$  снова быстро возрастает с увеличением числа нейтронов (вступает эффект нейтронной оболочки  $N = 184$ ), и все ядра с  $N \geq 172$  вновь преимущественно испытывают альфа-распад. Такая зависимость  $T_{\text{сд}}(N)$  наглядно демонстрирует, что стабильность сверхтяжёлых ядер относительно спонтанного деления определяется эффектом ядерных оболочек.

Описанную картину образования и распада сверхтяжёлых ядер дополнили 29  $Z$ -нечётных изотопов, полученных позднее в реакциях с  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{243}\text{Am}$  и  $^{249}\text{Bk} + ^{48}\text{Ca}$ . В силу больших запретов на спонтанное деление ядер с нечётным числом протонов и нейтронов цепочки последовательных альфа-переходов в ядрах 113-го, 115-го и 117-го элементов тянутся вплоть до изотопов 105-го элемента (Db). В длинных цепочках распада можно наблюдать изменения стабилизирующего эффекта сферической оболочки  $N = 184$  в сверхтяжёлых ядрах Mc/Ts, его падение в дочерних ядрах и усиление вновь в четвёртом–пятом поколении при подходе к деформированной оболочке  $N = 162$  в конечных ядрах Db. Для последних наблюдается спонтанное деление с периодами полураспада от 0,2 до 30 ч. Весьма вероятно, что спонтанное деление изотопов  $^{268}\text{Db}$  и  $^{270}\text{Db}$  относится к продуктам их электронного захвата: чётно-чётным ядрам  $^{268}\text{Rf}$  ( $N = 164$ ) и  $^{270}\text{Rf}$  ( $N = 166$ ). В процессе деформации ядер Rf на пути к точке разрыва эффект нейтронной оболочки  $N = 82$  в осколках деления приведёт к почти строго симметричному делению с  $Q_{\text{f}} \sim 280$  МэВ.

#### СВЕРХТЯЖЁЛЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА КАРТЕ НУКЛИДОВ

В целом синтез новых элементов в реакциях холодного и горячего слияния с ядрами  $^{48}\text{Ca}$  существенно обогатил область, сосредоточенную в конце карты нуклидов (рис. 4). В этих реакциях были синтезированы 12 новых химических эле-

ментов с атомными номерами 107–118, которые заполнили VII период Периодической системы химических элементов. В овале рисунка 4 находятся 55 нейтронно-обогащённых нуклидов с  $Z = 104–118$ , синтезированных в реакциях под действием  $^{48}\text{Ca}$ . Теперь самое тяжёлое ядро, полученное когда-либо в лаборатории, имеет массу 294. Оно наблюдалось нами в виде двух изобар в реакциях сначала с мишенью из  $^{249}\text{Cf}$  как чётно-чётное ядро с  $Z = 118$ ,  $N = 176$ , испытывающее альфа-распад с  $T_{1/2} \approx 0,5$  мс, а потом – с мишенью из  $^{249}\text{Bk}$  как нечётно-нечётное ядро с  $Z = 117$ ,  $N = 177$  и  $T_{1/2} \approx 50$  мс. Отсюда следует, что могут существовать ядра с массой  $A > 300$  а.е.м. и элементы с  $Z > 118$ .

Главный вывод из экспериментальных исследований, проводившихся на протяжении последних 40 лет, заключается в том, что при движении от Pb/Bi – последних стабильных элементов – в область более тяжёлых нуклидов наблюдается удивительная живучесть атомных ядер. Вследствие внутренней (оболочечной) структуры ядерного вещества понижается энергия основного состояния тяжёлого ядра, возникает барьер деления, что делает возможным существование сверхтяжёлых элементов. *Фундаментальные предсказания микроскопической теории ядра о возможном существовании сверхтяжёлых элементов получили прямое экспериментальное подтверждение.*

Вместе с тем открытие сверхтяжёлых элементов породило много вопросов. Могут ли существовать элементы тяжелее, чем синтезированные СТЭ, новые ядерные оболочки и более далёкие "острова"? Могут ли СТЭ образоваться во Вселенной в различных астрофизических сценариях нуклеосинтеза? Где располагаются СТЭ в Периодической системе химических элементов, похожи ли они на свои лёгкие гомологи? Конечно, возникают и другие вопросы. Но мы лишь кратко остановимся на проблеме, связанной со строением сверхтяжёлых атомов и химическим поведением сверхтяжёлых элементов.

### НОВЫЕ "ПОСЕЛЕНЦЫ" В ТАБЛИЦЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Во многих современных расчётах, проведённых в квантовой электродинамике, было показано, что периодический закон работает для всех элементов от  $Z = 1$  до  $Z = 172$  [19]. Однако при движении в область всё более тяжёлых элементов с увеличением заряда ядра растёт, приближаясь к скорости света, скорость электронов. Согласно теории относительности, это увеличивает полную энергию электрона (эффект роста массы электрона), вследствие чего уменьшается размер тяжёлого атома. "Релятивистское сжатие" ведёт к изменению квантовых характеристик и энергии связи

последнего электрона, ответственного за химическое поведение элемента. Поэтому, двигаясь вдоль VII периода Таблицы Д.И. Менделеева от элементов с  $Z = 104$  к  $Z = 118$ , мы должны увидеть влияние "релятивистского эффекта" в виде всё возрастающего различия в химическом поведении СТЭ относительно своих лёгких гомологов.

Сначала исследовалась пара конца 12-й группы Периодической системы химических элементов Sn/Hg на предмет образования их соединений с золотом [20]. Несмотря на малое число атомов Sn ( $Z = 112$ ) в этом эксперименте, их адсорбция на Au-поверхности при различных температурах указывала на более высокую летучесть и меньшую химическую активность 112-го элемента по сравнению с Hg. По количественным оценкам температура кипения 112-го элемента ( $84 \pm 110^\circ\text{C}$ ) оказалась заметно меньше, чем у Hg ( $356,8^\circ\text{C}$ ). Но это малая разница. Элемент с  $Z = 112$  – благородный металл, типичный представитель 12-й группы элементов. Высокую летучесть повторяет элемент 113 в атомарном состоянии или в виде гидроксидов. Ситуация, однако, сильно изменилась при переходе к паре 14-й группы элементов Fl/Pb. Согласно последним данным лабораторий Дубны и Дармштадта, различие в этой паре значительно возрастает по сравнению с Sn/Hg. Элемент 114 – скорее всего, газообразный благородный металл (новая субстанция!), в то время как Pb закипает при  $1750^\circ\text{C}$ .

Сейчас внимание приковано к самому тяжёлому элементу с  $Z = 118$ . В нерелятивистском варианте он находится в 18-й группе и является благородным газом, гомологом Rn ( $Z = 86$ ). Теперь, более чем 100 лет спустя после открытия благородных газов В. Рамзаем (Нобелевская премия 1904 г.), мы ищем ответ на вопрос, будет ли 118-й элемент благородным газом? И, судя по последним теоретическим публикациям [21, 22], всё чаще получаем отрицательный ответ: скорее всего, нет! По современным релятивистским расчётам, Таблица Д.И. Менделеева не дотягивает до  $Z = 172$ . Периодический закон химического поведения элементов с ростом их атомного номера ещё работает (с некими оговорками для самых тяжёлых элементов) при заполнении VII периода, вплоть до  $Z = 118$ . Критическим будет переход от 118-го к 119-му элементу. Есть основания считать, что уже в области  $Z = 121–123$  различие между группами заметно ослабнет, "размажется". С дальнейшим ростом атомного номера периодичность химических свойств элементов с  $Z > 122$  будет быстро ослабевать. Это и есть предел Таблицы, которая с учётом "релятивистского эффекта" и других поправок сократится примерно так, как показано на рисунке 5. И вновь экстраординарные прогнозы теории нуждаются в экспериментальной проверке.

1																	18
1 H	2											13	14	15	16	17	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 br	36 kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La →	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac →	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
		:(119):		:(120):		:(121):											
Lanthanides →		58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
Actinides →		90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

Рис. 5. Предел Периодической системы химических элементов, согласно прогнозам теории

## НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ В ИЗУЧЕНИИ СВЕРХТЯЖЁЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Очевидно, что в исследованиях сверхтяжёлых атомов и химических свойств сверхтяжёлых элементов мы находимся в начале длинного пути. Эта широкая дорога освещена странной теорией света и вещества (квантовой электродинамикой), и движение по ней обещает быть увлекательным и результативным. Но при очень малых сечениях образования СТЭ, исчисляемых пикобарнами (примерно  $10^{-12}$  часть от полного сечения реакции), — это, скорее, вопрос долгого времени работы и ограниченных возможностей. Проблема остро стоит перед всеми исследователями СТЭ в настоящее время, ещё более ощутимой она видится в будущем. Для её разрешения требуется существенно повысить чувствительность экспериментов и производство самих СТЭ. В последние годы экспериментальная активность несколько снизилась, так как основное внимание было направлено на создание новых ускорителей и более совершенных экспериментальных установок.

Естественно, каждая лаборатория имеет свой подход к решению этой задачи. В ОИЯИ, например, создаётся специальная лаборатория "Фабрика СТЭ", оснащённая новым ускорителем тяжёлых ионов — циклотроном ДЦ-280 для получения пучков с варьируемой энергией от 4 до 8 МэВ/нуклон и интенсивностью до 10 мкА-частиц (в 10 раз выше современного уровня). В сочетании с новым сепаратором ядер отдачи DGFRS-II длительность облуче-

ний — светимость экспериментов на "Фабрике СТЭ" возрастёт примерно в 50–100 раз. Убеждён, что, помимо новых технических возможностей, существенную роль, как и ранее, будет играть объединение усилий разных групп исследователей — международное сотрудничество.

В заключение хотел бы поздравить коллег, работающих в области СТЭ, и всех, кто интересуется этой проблемой, с Международным годом Периодической таблицы химических элементов (IUPTE). Таблица Д.И. Менделеева на протяжении 150 лет остаётся предметом исключительного научного интереса в различных областях знаний.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Oganessian Yu. Ts., Sobiczewski A., Ter-Akopian G.M.* Superheavy nuclei: from predictions to discovery // *Phys. Scr.* 2017. V. 92. №2. P. 023003.
2. *Sobiczewski A., Gareev F.A., Kalinkin B.N.* Closed shells for  $Z > 82$  and  $N > 126$  in a diffuse potential well // *Phys. Lett.* 1966. V. 22. №4. P. 500–502.
3. *Strutinsky V.M.* Shell effects in nuclear masses and deformation energies // *Nucl. Phys.* 1967. V. 95. №2. P. 420–442.
4. *Nilsson S.G., Tsang C.F., Sobiczewski A. et al.* On the nuclear structure and stability of heavy and superheavy elements // *Nucl. Phys.* 1969. V. 131. №1. P. 1–66.
5. *Ghiorso A., Nitschke J.M., Alonso J.R. et al.* Element 106 // *Phys. Rev. Lett.* 1974. V. 33. №25. P. 1490–1493.
6. *Oganessian Yu. Ts., Tret'yakov Yu.P., Il'nov A. S. et al.* Synthesis of neutron-deficient isotopes of fermium, kurchatovium and element 106 // *JETP Lett.* 1974. V. 20. №8. P. 265–266.

7. *Oganessian Yu. Ts., Iljinov A. S., Demin A. G., Tretyakova S. P.* Experiments on the production of fermium neutron-deficient isotopes and new possibilities of synthesizing elements with  $Z > 100$  // *Nucl. Phys.* 1975. V. 239. № 2. P. 353–364.
8. *Armbruster P.* On the Production of Heavy Elements by Cold Fusion: The Elements 106 to 109 // *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 1985. V. 35. P. 135–194.
9. *Münzenberg G.* Recent advances in the discovery of transuranium elements // *Rep. Prog. Phys.* 1988. V. 51. № 1. P. 57–104.
10. *Hofmann S.* New elements – approaching  $Z=114$  // *Rep. Prog. Phys.* 1998. V. 61. P. 639–689.
11. *Morita K., Morimoto K., Kaji D. et al.* New Result in the Production and Decay of an Isotope,  $^{278}113$ , of the 113th Element // *J. Phys. Soc. Jpn.* 2012. V. 81. № 10. P. 103201–103204.
12. *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Lobanov Yu. V. et al.* Synthesis of superheavy nuclei in the  $^{48}\text{Ca}+^{244}\text{Pu}$  reaction:  $^{288}114$  // *Phys. Rev. C.* 2000. V. 62. № 4. P. 041604.
13. *Oganessian Yu. Ts.* Heaviest nuclei from  $^{48}\text{Ca}$ -induced reactions // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2007. V. 34. P. 165–242.
14. *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V. K., Abdullin F. Sh. et al.* Synthesis and study of decay properties of the doubly magic nucleus  $^{270}\text{Hs}$  in the  $^{226}\text{Ra} + ^{48}\text{Ca}$  reaction // *Phys. Rev. C.* 2013. V. 87. P. 034605.
15. *Düllmann C. E., Schädel M., Yakushev A. et al.* Production and Decay of Element 114: High Cross Sections and the New Nucleus  $^{277}\text{Hs}$  // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 104. № 25. P. 252701.
16. *Ellison P. A., Gregorich K. E., Berryman J. S. et al.* New Superheavy Element Isotopes:  $^{242}\text{Pu} (^{48}\text{Ca}, 5n)^{285}114$  // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 105. № 18. P. 182701.
17. *Gates J. M., Düllmann Ch. E., Schädel M. et al.* First superheavy element experiments at the GSI recoil separator TASCA: The production and decay of element 114 in the  $^{244}\text{Pu} (^{48}\text{Ca}, 3-4n)$  reaction // *Phys. Rev. C.* 2011. V. 83. P. 054618.
18. *Hofmann S., Heinz S., Mann R. et al.* The reaction  $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{296}116^*$  studied at the GSI-SHIP // *Eur. Phys. J. A.* 2012. V. 48. P. 62.
19. *Fricke B., Greiner W. J., Waber T.* The continuation of the periodic table up to  $Z = 172$ . The chemistry of superheavy elements // *Theor. Chim. Acta.* 1971. V. 21. № 3. P. 235–260.
20. *Eichler R., Aksenov N. V., Belozherov A. V. et al.* Chemical characterization of element 112 // *Nature.* 2007. V. 447. P. 72–75.
21. *Jerabek P., Schuettrumpf B., Schwerdtfeger P., Nazarewicz W.* Electron and Nucleon Localization Functions in Superheavy Elements // *Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 120. P. 053001.
22. *Nazarewicz W.* The limits of nuclear mass and charge // *Nature Phys.* 2018. V. 14. P. 537–541.

## SUPERHEAVY ELEMENTS

© 2019 Yu. Ts. Oganessian

*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow Oblast, Russia*

*E-mail: oganessian@jinr.ru*

Received 12.02.2019

Revised version received 12.02.2019

Accepted 04.03.2019

Synthesis of superheavy elements predicted by microscopic nuclear theory is investigated. The heaviest elements with  $Z = 114–118$  were synthesized by fusion reactions of actinide nuclei with  $^{48}\text{Ca}$  ions accelerated using the U-400 complex at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions (FLNR), one of seven laboratories that comprise the Joint Institute for Nuclear Research (JINR) located in Dubna, Russia. The experiments were carried out in collaboration with physicists and chemists working at the Livermore and Oak Ridge national laboratories in located in California and Tennessee, respectively. Discovery of these elements allowed completion of the seventh period of the periodic table. The microscopic nuclear theory's fundamental predictions about the possible existence of superheavy elements received the experimental confirmation. A new laboratory, i.e., the "STE Factory" associated with the JINR FLNR, has been established to research superheavy nuclei.

*Keywords:* superheavy elements, island of stability, nuclear microscopic theory, reactions of synthesis.