

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ГРАНИЦАХ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

Бердоносов С.С., Дзюба Е.А.

Химический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Прежде всего отметим, что в этой статье использованы представления о нижней и верхней границах периодической системы (ПС), разработанные в отечественной литературе во второй половине XX века Д.Н. Трифоновым [1]. По Трифонову, нижнюю границу ПС образуют водород и гелий (элементов с меньшими атомными номерами Z нет), а верхнюю границу – трансурановые элементы с атомными номерами $Z > 92$ и более. Вопрос о существовании верхней и нижней границ ПС возник сразу же после открытия Д. И. Менделеевым периодического закона и создании им ПС (март 1869 г.). Если речь идёт о нижней границе, то проблема состоит в возможности существования элементов со значениями атомного номера с Z менее 1.

Нижняя граница периодической системы

В 1902 г. Д.И. Менделеев опубликовал статью «Попытка химического понимания мирового эфира», где предположил, что мировой эфир (в то время считали, что он заполняет всё окружающее нас пространство, в котором распространяются электромагнитные волны) представляет собой наилегчайший, абсолютно инертный газ, способный проникать везде и всегда, и именно он образует нижнюю границу ПС. В физике понятие мирового эфира возникло при изучении распространения света и электромагнитных волн. Химическая концепция эфира стала актуальной для Менделеева после открытия благородных (инертных) газов, новую группу которых (нулевую группу) он помес-

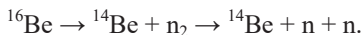
тил в последний вариант опубликованной при его жизни ПС элементов. Туда же, до водорода, он поместил ещё два гипотетических элемента: ньютоний и короний.

Менделеев предполагал, что ньютоний может иметь атомный вес, близкий к одной миллионной атомного веса водорода. Вторым элементом – короний, хотя гипотетически был и тяжелее ньютония, но должен был находиться в ПС также до водорода. Короний ошибочно открыли на Солнце в 1869 г. В 1930 г. было доказано, что спектральная линия, зарегистрированная при солнечном затмении 1869 г., принадлежала не коронию, а высоко ионизированному железу Fe^{13++} (такая ионизация атомов железа свидетельствовала о том, что температура солнечной короны невероятно высока).

С разработкой специальной теории относительности и квантово-механической модели атома теория мирового эфира потеряла свою актуальность и в настоящее время упоминается главным образом в работах по истории физики. Не оказалось в природе и других элементов легче водорода.

После открытия нейтрона было высказано предположение о том, что ему отвечает элемент нейтроний, способный образовывать несколько изотопов, один из которых – свободный нейтрон, период полураспада которого около 10 мин. Гипотетически возможно существование и изотопов нейтрония: динейтрона и тетранейтрона, однако обнаружить их не удалось.

Некоторые экспериментальные данные можно рассматривать как косвенное подтверждение существования нейтрония. Например, нестабильный динейтрон может образовываться как промежуточный продукт при распаде нейтронно-избыточных ядер ${}^8\text{He}$, ${}^5\text{H}$, ${}^6\text{H}$ и ${}^{16}\text{Be}$:



В 1951 г. М. Дойч [2] экспериментально идентифицировал позитроний – атомоподобную систему, состоящую из электрона и его античастицы (позитрона). Позитроний Ps можно рассматривать как легчайший химический элемент. К настоящему времени позитроний до-

вольно хорошо изучен. Его масса в два раза больше массы электрона, а радиус вдвое больше радиуса атома водорода. Позитроний по свойствам близок к водороду и может образовывать гидрид, цианид, а также соединения с галогенами и литием. В зависимости от спина (квантовая характеристика, определяющая момент импульса) электрона и позитрона, различают два вида позитрония: *para*-позитроний (находится в синглетном состоянии, т.е. позитрон и электрон в нём имеют разные спины, и суммарный спин равен нулю), и *ortho*-позитроний (триплетное состояние, спины однонаправлены, суммарный спин 1), который живет гораздо дольше, чем *para*-позитроний (порядка 142 наносекунд).

Существует раздел материаловедения – позитронная дефектоскопия. В её основе лежит тот факт, что позитроний может свободно перемещаться по твёрдому телу (коэффициент диффузии при комнатной температуре около $1 \text{ см}^2 / \text{с}$ [3]). Аннигиляция позитрония (его превращение в два γ -кванта) происходит, когда позитроний при перемещении по твёрдому телу сталкивается с трёхмерным дефектом.

Наряду с позитронием могут образовываться и другие нестабильные экзотические атомы, которые легче водорода: протоний Рп (пара, состоящая из протона и антипротона) и мюоний Му (в качестве ядра здесь выступает мюон, окруженный электроном). Мюоний по свойствам похож на атомарный водород и иногда рассматривается как его сверхлегкий изотоп.

Верхняя граница периодической системы

С верхней границей ПС всё гораздо сложнее: нужно учитывать, что с увеличением атомного (ранее использовали термин «порядкового») номера элементов, стабильность ядер падает, так как постепенно увеличиваются силы внутриядерного отталкивания, действующие между входящими в состав ядер протонами. Физики для объяснения устойчивости тяжёлых ядер используют представления о так называемых релятивистских эффектах. При увеличении массы ядра для предотвращения падения электрона на ядро должна резко возрастать ско-

рость движения электрона вокруг ядра, и в очень тяжёлых ядрах скорость движения электронов в устойчивом к аннигиляции атоме должна быть сравнима со скоростью света. При меньших скоростях движения электрон упадёт на ядро.

Верхнюю границу ПС можно условно разделить на естественную и искусственную. Естественная граница проходит по самому тяжёлому элементу, который встречается в природе (на данный момент это элемент №94 плутоний Pu, ничтожно малые количества изотопов которого с массовыми числами 239 и 244 обнаружены в природе). Искусственная граница определяется последним синтезированным элементом, и пока что это элемент №118 оганесон Og.

В рамках оболочечной модели строения ядер было высказано предположение о том, что среди элементов с $Z = 110$ и больше могут быть и такие, нуклиды которых обладают повышенной устойчивостью (их периоды полураспада составляют часы и даже месяцы). Такими могут быть ядра с числом протонов 114, 126, 164 и с числом нейтронов 184, 196. Это так называемые «острова стабильности» По предположениям некоторых физиков-теоретиков, такие ядра могут существовать в природе.

Вопрос о верхней границе возник уже после того, как учёные установили, что самый тяжёлый элемент, встречающийся в природе в заметных количествах, это уран. Изучение урана и других радиоактивных элементов стало толчком для развития исследований в области радиоактивности, и уже в 1940 г. был искусственно получен первый трансурановый элемент – нептуний Np ($Z = 93$). Возник вопрос: а как много элементов можно синтезировать искусственно? Где предел устойчивости ядер, т.е. с каким максимально значением Z может существовать разумное время (не менее 10^{-12} — 10^{-10} с) ядро?

Одно из первых предположений о пределе устойчивости ядер высказал Р. Фейнман. Он считал, что предел устойчивости ядер определяется энергией s -электрона. Когда энергия этого электрона снижается ниже некоторого критического значения, он немедленно «падает» на ядро. По предположению Фейнмана, основанному на решении ре-

лятивистского уравнения Дирака, невозможно существование атомов с $Z > 137$. Из полученного решения этого уравнения можно было предположить, что при $Z = 137$ энергии $1s$ -электрона такого атома будет отвечать мнимое число. Электрон немедленно упадёт на ядро, и атомный номер понизится. Однако модель, в соответствии с которой было высказано такое предположение, исходит из точечного размера ядра, а, значит, для реальных ядер она непригодна.

Расчёты с учётом ненулевых размеров ядра показывают, что при Z более 173 будет происходить мгновенный позитронный распад с уменьшением атомного заряда ядра на единицу. Очевидно, что предсказания о возможности существования ядер со столь большими значениями Z , основанные на использовании представлений об энергии связи s -электронов с ядром, очень приближены и не могут быть положены в основу современных взглядов на предел устойчивости ядер с ростом их заряда.

Возможно, что сведения о пределе устойчивости ядер могут быть получены не на основе расчётных данных об энергии s -электрона, а на базе представлений о строении ядра. Зная, как ядро «устроено», можно попытаться предсказать устойчивость сверхтяжёлых ядер, в том числе и тех, которые можно получить в будущем [4].

Модели строения ядра

Одной из первых моделей ядра стала капельная модель, разработанная Н. Бором. Согласно этой модели, ядро представляет собой заряженную сферу («каплю»). Подобно капле жидкости, с поверхности ядра могут испаряться протоны и нейтроны. Ядерная капля характеризуется наличием силы поверхностного натяжения. Капля может разделяться на более мелкие капли, мелкие капли способны сливаться в одну большую и т.д.

При возрастании числа протонов в ядре устойчивость ядра-капли снижается, пока не произойдёт деление капли на более мелкие фрагменты. Деление происходит в тот момент, когда деформация капли под действием силы поверхностного натяжения и кулоновского от-

талкивания протонов не достигнет некоторого критического значения – так называемого барьера деления. Если сообщить устойчивому ядру-капле дополнительную энергию, оно может разделиться на два неравных осколка.

Барьер деления постепенно понижается с увеличением числа протонов в ядре, и некоторые тяжёлые ядра начинают делиться самопроизвольно. В результате время жизни таких ядер уменьшается. Пределом роста Z станет элемент, барьер деления ядра которого будет стремиться к нулю. Ядро такого элемента будет невозможно зафиксировать, так как оно моментально разрушится. Минимальный период спонтанного деления оценивается в 10^{-23} с. По расчётам физиков Н. Бора и Дж. Уиллера, для ядер с $Z^2/A \geq 49$ деление происходит практически мгновенно. Таким образом, у элементов с $Z \geq 120$ барьер деления будет чрезвычайно мал.

В соответствии с этими представлениями, верхняя граница устойчивости ядер проходит в районе g -элементов восьмого периода, т.е. элементов, у которых гипотетически начинается заполнение электронами g -подуровня 7-го слоя (возможно, начиная с 121-го элемента).

Капельная модель объясняла неустойчивость сверхтяжёлых ядер их способностью к самопроизвольному делению, но не учитывала, что, например, ядра урана и некоторых других трансурановых элементов способны делиться не по одному, а по двум различным путям. Так, период полураспада основного состояния ядра ^{238}U оценивается примерно в 10^9 лет, а его изомера $^{238}\text{U}^m$ – в 10^{-6} с. Это противоречит капельной модели ядра, согласно которой в ходе деформаций ядра нет промежуточных метастабильных состояний [4].

В соответствии с другой, оболочечной теорией строения, в ядре нуклоны расположены на определённых оболочках, постепенное заполнение которых происходит по мере роста числа нуклонов (аналогично тому, как происходит заполнение электронами электронной оболочки атомов). Оболочечная модель строения ядра предполагает, что стабильность ядра повышается при полном заполнении той или иной ядерной оболочки нуклонами.

Согласно этой теории, каждая микрочастица (протон, нейтрон) в ядре находится в определённом квантовом состоянии, характеризуемом его энергией, моментом вращения и орбитальным моментом. Оказывается, что некоторые ядра, содержащие определённое число нейтронов и протонов, характеризуются повышенной стабильностью (энергия связи нуклонов в таких ядрах выше, чем в соседних ядрах). Числа протонов и нейтронов в ядрах с повышенной устойчивостью стали называть *магическими* (магические числа нейтронов и протонов в ядре отвечают как бы замкнутым, заполненным состояниям в ядре, как и электронные оболочки атома, содержащие определённое число электронов и обладающие повышенной устойчивостью).

В 1932—1934 гг. немецкий физик В. Эльзассер объяснил стабильность магических ядер предположением о том, что нуклоны способны двигаться в ядре независимо друг от друга в одночастичной потенциальной яме (аналогично электронам). Это кажется удивительным, ведь, если предположить, что нуклоны находятся в постоянном движении, они должны были бы постоянно сталкиваться друг с другом, меняя направление и теряя энергию из-за того, что ядро довольно плотно упаковано. Но многие ядра стабильны длительное время!

Преодолеть возникшее противоречие стало возможным на основе использования принципа В. Паули: два фермиона в ядре (аналогично тому, как два электрона электронной оболочки атома) не могут иметь одно и то же квантовое состояние. Поэтому в ядре нет низкоэнергетических состояний, на которые могли бы перейти ядерные частицы, и, как следствие, они не могут принимать участие во взаимодействиях. Это исключает возможность потери энергии в ядре при столкновении нуклонов. Принцип Паули стал основанием для использования оболочечной теории строения ядра.

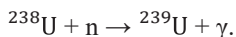
Значения магических чисел отвечают числам нуклонов в ядре при полном заполнении той или иной оболочки. Атомные ядра, которые содержат магическое число протонов или нейтронов, имеют большую энергию связи нуклонов и, следовательно, повышенную стабильность.

В настоящий момент известны следующие магические числа протонов и нейтронов в ядре: 2, 8, 20, 28, 34, 50, 82, 126 (число 126 относится только к числу нейтронов). Ядра, в которых число протонов равно числу нейтронов, называют самоспряжёнными. Самое стабильное самоспряжённое магическое ядро — ^{40}Ca (в нём 20 протонов и 20 нейтронов), все же остальные ядра с $N = Z$ относят к числу протонно-избыточных, они неустойчивы и быстро распадаются.

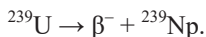
Как бы то ни было, теория позволяла высказать только предположения о пределе стабильности ядер. Для окончательных выводов нужны были экспериментальные данные об устойчивости сверхтяжёлых ядер.

Синтез трансурановых элементов с использованием нейтронных потоков

В первой половине XX века было установлено, что элементы со значением Z , большими 92 (трансурановые элементы), можно получить искусственно за счёт ядерных реакций. Для их проведения наиболее удобны нейтроны, которые при сближении с ядрами мишени не испытывают электростатического отталкивания. В 1940 г. была проведена ядерная реакция с участием ядер урана-238 и нейтронов:

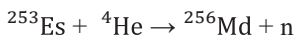


Далее ядро урана-239 испытывает β -распад ($T_{1/2}$ около 23,5 мин) и возникает нуклид первого трансуранового элемента нептуния:



Подобным путём в период 1940—1953 гг. с помощью нейтронов удалось получить трансурановые элементы вплоть до фермия Fm ($Z = 100$). Дальнейшие попытки получить с помощью нейтронов более тяжёлые элементы к успеху не привели, так как с ростом Z быстро возрастала нестабильность ядер. Ядра, образовавшиеся после поглощения избыточного нейтрона, испытывали быстрый самопроизвольный α -распад (значение Z ядра при этом уменьшается на 2), и поэтому получить ядра с $Z > 100$ таким путём оказалось невозможно.

Для получения ядер с $Z > 100$ был разработан новый метод синтеза сверхтяжёлых элементов, так называемый «холодный ядерный синтез» [5]. Он заключается в том, что ядра мишени облучают ядрами более легких элементов (например, ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$ или ${}^{20}\text{Ne}$). При столкновении возможно слияние бомбардирующей и бомбардируемой частиц. Таким способом удалось получить следующий за фермием элемент – менделевий:



и ряд других элементов с $Z = 102$ — 108 .

Получение элементов с ещё большими атомными номерами потребовало развития оболочечной модели ядра. Важным развитием этих представлений стало использование понятия о *магических числах*. На основе магических чисел было выдвинуто предположение о том, что существуют такие нуклиды сверхтяжёлых элементов, которые отличаются относительной стабильностью в «море» нестабильных нуклидов и образуют некий остров стабильности ядер.

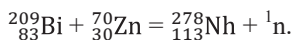
На основе оболочечной модели ядра и расчётов с помощью потенциала Вудса-Саксона, учитывая спин-орбитальные взаимодействия, было показано, что повышенной стабильностью будет обладать ядро с $Z = 114$. Наиболее устойчиво к спонтанному делению ядро с $Z = 114$, $N = 184$ (его период полураспада $\sim 10^{16}$ лет). Для этого элемента с изменением числа нейтронов на 6—8 период полураспада уменьшается на 10—15 порядков.

Из расчётов периода полураспада и энергии равновесной деформации для ядер с Z от 104 до 120 была получена зависимость, показывающая, что в области с $Z = 114$ и $N = 184$ должны располагаться ядра, имеющие сферическую форму. Пока что все обнаруженные сверхтяжёлые ядра имеют деформированную форму. Согласно современным теоретическим моделям, стабильность сверхтяжёлых ядер должна резко возрастать при приближении числа нейтронов в ядре к $N = 184$.

Наиболее устойчивыми нуклидами сверхтяжёлых элементов оказываются те, в ядрах которых отношение числа нейтронов к числу протонов приближается к 1,5. Поэтому для получения тяжёлых элементов с $Z > 110$ нужно использовать в качестве бомбардирующих частиц «перегруженные» нейтронами стабильные ядра. К числу таких ядер принадлежат ядра ^{48}Ca и ^{70}Zn . Это – самые тяжёлые стабильные изотопы данных элементов, которые наиболее богаты нейтронами (соответственно 28 нейтронов и 20 протонов в ядрах кальция-48 и 40 нейтронов и 30 протонов в ядрах цинка-70). Действительно, с помощью ядер кальция-48 за сравнительно короткий период времени удалось синтезировать элементы с Z вплоть до $Z = 118$.

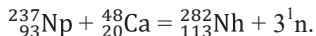
Синтез элементов с Z 113—118

Элемент 113 нихоний Nh. Первые ядра этого элемента получены коллективом исследователей Японии в 2004—2005 гг. по ядерной реакции:



Исследователи России, США, Японии и других стран договорились в честь Японии дать этому элементу название «нихоний» (с японского – страна восходящего солнца). Интересно, что японским физикам за 8 лет работы удалось зафиксировать образование всего 3-х (!) атомов нихония.

В Дубне с использованием кальция-48 получили другой изотоп нихония:



К настоящему времени синтезированы α -радиоактивные изотопы нихония с массовыми числами 278, 282, 283, 284, 285 и 286. Наиболее устойчив ^{286}Nh , значение $T_{1/2}$ 19,6 с. Предположительно по химическим свойствам нихоний похож на азот, фосфор и аналогичные элементы – так называемые пниктиды.

Элемент 114 флеровий Fl. Назван в честь российского физика Георгия Николаевича Флёрва. К настоящему времени исследователи

Дубны в сотрудничестве с учёными Ливерморской национальной лаборатории (США) получили изотопы флеровия с массовыми числами 285—289. С этой целью атомами кальция-48 облучали мишени из ^{242}Pu и ^{244}Pu . В случае изотопов флеровия с массовыми числами 286, 287, 288 и 289 зарегистрировано образование 24, 16, 18 и 8 соответствующих ядер. Наиболее устойчив ^{289}Fl (значение $T_{1/2}$ около 2,5 с).

По предварительным оценкам, по химическому поведению флеровий похож на свинец. Впрочем, из-за релятивистских эффектов возможно сходство поведения флеровия с инертными газами.

Элемент 115 московий Mc, название дано в честь Москвы и Московской области, в которой расположена Дубна. Первые опыты по получению этого элемента были выполнены в Дубне совместной группой исследователей России и Ливерморской национальной лаборатории (США) в июле–августе 2003 г. При облучении ядрами ^{48}Ca мишени из ^{243}Am получены 3 ядра московия-288 и один атом московия-287. Получен также ^{289}Mc . Все нуклиды московия α -радиоактивны. Предположительно степени окисления московия +1 и +3.

Элемент 116 ливерморий Lv. Название дано в честь Ливерморской национальной лаборатории (США), сотрудники которой многие годы проводят в тесном сотрудничестве с Лабораторией ядерных реакций имени Г.Н.Флёрва Объединенного института ядерных исследований (Дубна, Москва) исследования синтеза ядер новых сверхтяжёлых элементов. Кроме лаборатории ядерных реакций в работе по получению первых атомов элемента №116 принимали участие сотрудники Научно-исследовательского института атомных реакторов (Димитровград, Россия) и Электрохимприбора (г. Лесной Свердловской области, Россия).

Имеются сообщения о синтезе изотопов ливермория с массовыми числами 290—293. Все они α -радиоактивны, наибольший период полураспада у ^{293}Lv (61 мс).

Возможно, ливерморий – химический аналог полония. Но у ливермория должны быть более сильно выражены металлические свойства.

Элемент 117 теннессин Ts. Назван в честь штата Теннесси (США), в котором расположены Национальная лаборатория Ок-Ридж, лаборатория Университета Вандербильта и Университета Теннесси в Ноксвилле. Эти организации вместе с физиками Дубны с использованием ионов кальция-48 получили первые 5 атомов ^{293}Ts и один (всего 1!) атом ^{294}Ts . В качестве мишени использованы 20 мг $^{249}_{97}\text{Bk}$, наработанного в Теннесси и доставленного самолетом в Россию. В дальнейшем появилось сообщение о получении ещё 5 атомов ^{293}Ts . К настоящему времени имеются сообщения о получении изотопов теннессина с массовыми числами 293 и 294. Оба α -радиоактивны, период полураспада ^{293}Ts 22 мс, а ^{294}Ts 51 мс.

Элемент 118 оганесон Og. Назван в честь академика РАН профессора Юрия Цолаковича Оганесяна, который многие годы руководит в Дубне исследованиями синтеза сверхтяжёлых элементов. Это второй случай в истории, когда новый химический элемент назван в честь ныне здравствующего учёного. Первым был выдающийся американский учёный Гленн Теодор Сиборг (элемент сиборгий). Оганесон синтезирован в Дубне совместной группой физиков России и сотрудников Ливерморской национальной лаборатории (США) в 2002—2005 гг. К настоящему времени (2018 г.) удалось синтезировать 3 атома ^{294}Og . Они α -радиоактивны, период полураспада 0,89 мс.

Предполагают, что оганесон завершает 7 период и может быть отнесен к инертным газам, хотя, по оценкам физиков, при нормальных условиях он будет не газом, а твёрдым веществом.

Предсказания свойств последующих элементов

Следующие два элемента после оганесона с атомными номерами 119 и 120 будут $8s$ -элементами и относиться соответственно к щелочным и щелочноземельным металлам. Элементы 119 и 120, скорее всего, похожи на рубидий и стронций, а не на их непосредственных соседей (франций и радий), так как $8s$ -орбиталь должна стабилизироваться и как бы стягиваться.

После 120 элемента ожидается начало серии суперактинидов (суперактиноидов). Элемент 121 скорее всего будет похож по своим свойствам на лантан и актиний, а элемент 122 – на церий и торий. Для первых суперактинидов предсказывают довольно малую энергию связи электронов, из-за чего они могут потерять все свои валентные электроны. Например, элемент 126 может легко образовывать состояние со степенью окисления +8, а для последующих элементов степени окисления могут быть и выше. С увеличением атомного номера суперактинидов максимальная возможная степень окисления будет сначала увеличиваться, а затем уменьшаться. Так, например, у элемента 156 гипотетическая максимальная степень окисления +2. Это будет очень тяжёлый металл с плотностью около 26 г / см^3 . А у 148-го элемента возможна степень окисления +12.

Однако точно предсказать свойства элементов с Z выше 122 нельзя. Расчёты усложняет то, что орбитали $5g$, $6f$ и $7d$ будут иметь примерно одинаковые энергии. Вследствие этого электронные оболочки «смешаются» настолько, что это приведёт к новым химическим свойствам, и предсказать химическое поведение этих элементов с использованием «классической периодической системы» довольно сложно. Например, ожидается, что у элемента с $Z = 160$ будут смешанные характеристики элементов 10, 12, 14 и 18 групп.

Возможно, для элемента 164 будет относительно стабильное металлическое состояние. Большая энтальпия кристаллизации может привести к увеличению температуры плавления. Предсказывается, что этот металл будет мягким, почти как ртуть.

Теоретический интерес к химии 164-го элемента обусловлен, в частности, тем, что его изотоп с массовым числом 482 будет находиться в центре гипотетического второго острова стабильности.

Зачем получают новые элементы?

Каково практическое значение работ по синтезу сверхтяжёлых элементов? И причём очень дорогостоящих работ. Можно оценить, что синтез каждого атома с атомным номером 113 и больше по сово-

купности обходится в сотни тысяч, а то и в миллионы долларов США. Только государства с развитой экономикой могут позволить себе участие в работах по синтезу сверхтяжёлых элементов.

Из-за очень малых значений периодов полураспада (доли миллсекунды и менее) накопить атомы этих элементов в количествах, которые позволили бы любое их практическое применение, невозможно. Можно здесь отметить, что воздействовать на период полураспада и добиться его увеличения современная физика не может. Так что использовать сверхтяжёлые элементы для создания новых продуктов питания, новых лекарств или новых видов оружия нельзя.

Так что польза от изучения свойств новых сверхтяжёлых элементов только одна – расширение знаний о свойствах материи, о строении ядер. А пока предвидеть, что даст человечеству такое расширение знаний в будущем, невозможно.

Какие ещё элементы удастся получить в будущем?

Можно констатировать, что все полученные искусственно трансурановые элементы (элементы с $Z > 92$) радиоактивны. Устойчивость ядер элементов по мере роста Z достаточно быстро снижается. Это обусловлено заметным усилением сил внутриядерного отталкивания протонов внутри ядра. Так, если $T_{1/2}$ наиболее устойчивого изотопа урана ^{238}U составляет 4,47 млрд лет ($1,41 \cdot 10^{16}$ с), то значение $T_{1/2}$ ^{294}Og около 1 мс. Уменьшение при возрастании атомного номера на 26 единиц составило около 10^{19} раз. Причём, чем больше значение Z , тем круче уменьшение $T_{1/2}$ с ростом атомного номера.

Оправданно предположить, что данная тенденция сохранится и при дальнейшем росте Z . Поэтому можно ожидать, что уже у элементов с Z 128—130 значение периода полураспада самого устойчивого нуклида составит менее 10^{-12} — 10^{-15} с, и говорить о возможности получения и изучения свойств столь неустойчивых ядер бессмысленно.

В ближайшие 10—15 лет можно ожидать сообщений о получении ядер элементов с атомными номерами 119—125 (возможно, успех удастся достичь за счёт использования ядер $^{70}_{40}\text{Zn}$). А где-то около

$Z = 130$ наступит предел возможности искусственного получения ядер новых сверхтяжёлых элементов. Сохранится возможность получения ядер новых нуклидов уже известных элементов.

Выводы

В ближайшие 10—15 лет физикам, скорее всего, удастся получить очень неустойчивые ядра новых элементов с Z 119—130, периоды полураспада которых будут составлять от тысячных до миллиардных долей секунды и менее. Длительность существования наиболее устойчивых нуклидов элементов с $Z > 130$ составит менее длительности столкновения двух ядерных частиц, которые могут участвовать в ядерной реакции (по оценке, около 10^{-15} — 10^{-13} с). Таким образом, возможности искусственного получения ядер новых элементов будут исчерпаны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трифонов Д.Н. Структура и границы периодической системы. М.: Атомиздат. 1969. 270, с. 2.
2. Deutsch M. Evidence for the formation of positronium in gases. Phys. Rev. 1951. V. 82. P. 455—456.
3. Шантарович В.П., Бердоносков С.С., Знаменская И.В. и др. Особенности миграции позитрония по твёрдому телу. Радиохимия, 2006. Т. 48. № 5. С.454—457.
4. Сазонов А.Б. Ядерная физика. М.: Изд. «Юрайт», 2017. 269 с.
5. Хофманн С. Синтез сверхтяжёлых элементов методом холодного слияния. Успехи химии. 2009. Т. 78. № 12. С. 1211—1227.