Math-Net.Ru
Общероссийский математический портал

Л. Белопухов, Трансурановые элементы,
Квант, 2023, номер 3, 2–13

https://www.mathnet.ru/kvant4101

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
https://www.mathnet.ru/rus/agreement

Параметры загрузки:
IP: 18.97.9.171
23 января 2026 г., 14:51:39

Трансурановые элементы

Л.БЕЛОПУХОВ

В 1789 ГОДУ БЫЛ ОПУБЛИКОВАН «Трактат о химии» великого французского химика Антуана Лорана Лавуазье. Фактически это был первый научный учебник химии. В нем была приведена «таблица субстанций, принадлежащих всем царствам природы, которые могут считаться простейшими составными частями тел». Позднее эти «субстанции» были названы химическими элементами – самыми маленькими носителями определенных химических свойств.

В таблице Лавуазье их было 33. Кроме водорода, углерода, азота, кислорода и известных тогда 17 металлов и неметаллов в список попали и такие субстанции, как теплород, свет и некоторые окислы. Но около 30 субстанций – это и были химические элементы.

Через 80 лет, в созданной Д.И.Менделеевым таблице (системе) было уже 62 элемента, включая и уран, самый тяжелый из известных тогда элементов, занявший 62-е место. Самое главное в менделеевской системе – это периодичность химических свойств. Числа 8 и 18, как характеристики этой периодичности, оказались верными, они и сейчас присутствуют в таблице элементов. В современном варианте таблицы элементы расположены в 18 группах и подгруппах.

В числе 62 элементов таблицы были и некоторые неоткрытые в природе. Менделеев назвал их по имени расположенных в предыдущих периодах элементов той же группы с приставкой «эка». Наиболее интересным был элемент №43, названный Менделеевым *экамарганец*. Его долго искали в природе, но так и не могли найти долгие годы. Только сто лет спустя,

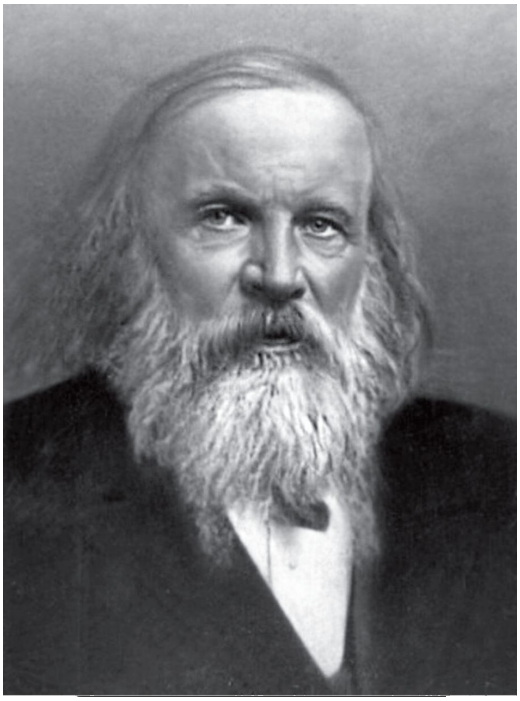
Антуан Лоран Лавуазье

в середине прошлого века ничтожные следы этого элемента были обнаружены в некоторых урановых рудах. Оказалось, что этот элемент рождается в реакциях самопроизвольного деления ядер урана (явлении, открытом в 1939 году советскими физиками Г.Флёровым и К.Петржаком).

Но еще в 1937 году 43-й элемент был синтезирован в результате бомбардировки атомов предыдущего элемента №42, молибдена, ядрами изотопа водорода – дейтерия. Эти ядра разгонялись до больших скоростей на циклотроне в радиационной лаборатории Калифорнийского университета в Беркли. Большая кинетическая энергия ядер дейтерия позволяла преодолеть испытываемое ими электрическое отталкивание от ядер молибдена.

Пожалуй, именно это событие можно считать началом эры искусственного создания элементов, отсутствующих в земной коре (или присутствующих в совершенно ничтожных количествах). Элемент и получил имя «искусственник», что на латыни звучит *технециум*, а в российской

DOI: https://doi.org/10.4213/kvant20230301



Дмитрий Иванович Менделеев

традиции – *технеций*. Сегодня он не является каким-либо экзотическим веществом. Этот искусственно созданный элемент нашел широкое применение в медицине как «меченый атом». Один из изотопов технеция особенно удобен для целей медицинской диагностики и лечения новообразований. Его маленький период полураспада (6 часов) означает, что он не накапливается в организме. А небольшая энергия гамма-частиц, сопровождающих его бета-распад, обеспечивает «мягкое» воздействие на ткани организма.

Понятно, что такое вещество нужно синтезировать только в самом лечебном учреждении – при перевозке от него ничего не останется В больницу доставляют радиоактивный изотоп молибдена, который превращается в технеций, легко извлекаемый химическим путем. Больничная установка называется «генератор технеция». В нее помещается изотоп молибдена. А очень высокая цена такого метода диагностики и лечения связана с производством этого изотопа молибдена на специальных ядерных реакторах.

Начало трансурановой эры

В 30-е годы прошлого столетия после создания Д.Иваненко и В.Гейзенбергом протонно-нейтронной модели атомного ядра началось стремительное развитие ядерной физики. В Италии в это время работал талантливый экспериментатор (и теоретик) Энрико Ферми. Он понимал, что самыми удобными «снарядами» для «стрельбы» по атомным ядрам являются именно нейтроны, поскольку они не имеют электрического заряда и могут очень близко подходить к атомным ядрам – настолько близко, что начинают действовать мощные ядерные силы притяжения нейтрона к ядру. И поскольку при проникновении нейтрона в ядро в нем нарушается тот баланс чисел протонов и нейтронов, при котором ядро было устойчивым, в нем происходят процессы, приводящие к увеличению на единицу числа протонов. А это означает увеличение положительного заряда ядра и, в соответствии с законом сохранения электрического заряда, появление электрона с большой кинетической энергией, позволяющей ему стремительно удаляться от ядра. Рождается изотоп химического элемента, имеющий номер на единицу больше, чем имеет элемент, атомы которого подверглись бомбардировке нейтронами.

В этом и заключается сущность отрицательного бета-распада. Ферми первым создал основы теории этого превращения атомных ядер. Она оказалась настолько сложной, что и сейчас еще не имеет окончательного завершения. Теория предсказывала, что вероятности бета-распадов у разных элементов могут отличаться во много раз. В отдельных случаях при поглощении нейтрона вылетает не электрон, а его античастица, которая получила название «позитрон». При этом новое ядро («дочернее») будет иметь электрический заряд на единицу меньше исходного ядра и в периодической системе будет занимать предыдущее место. Такое превращение называется положительным бета-распадом.

И при отрицательном, и при положительном бета-распадах образующиеся

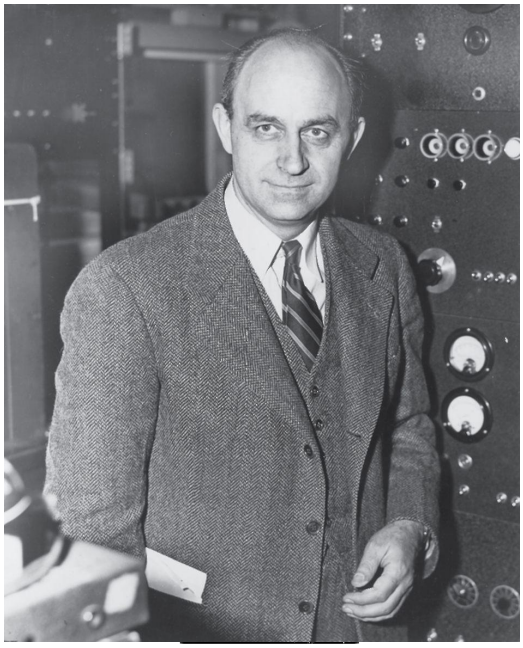
изотопы дочерних ядер неустойчивы, т.е. являются радиоактивными (искусственно созданными, а не природными радиоактивными элементами конца периодической системы). Они и получили название «меченых атомов», поскольку их путь в веществе можно проследить с помощью регистраторов частиц, которые обычно называются счетчиками. Меченые атомы нашли широкое применение в различных технических исследованиях, а главное – в биологии и медицине. Изотоп первого искусственного элемента – пример меченого атома.

Энрико Ферми в Италии, Ирен и Фредерик Жолио-Кюри во Франции в 1932–37 годах подвергали нейтронному облучению чуть ли не все элементы периодической системы. Были открыты десятки новых изотопов. Нейтроны при этом получались в радио-бериллиевых источниках, где происходила ядерная реакция

$$^{11}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\alpha \rightarrow {}^{14}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}n.$$

Получающиеся нейтроны имеют большую кинетическую энергию (в соответствии с законами сохранения энергии и импульса) и их скорости столь велики, что большая часть вылетает за пределы реакционной зоны, не успев присоединиться к какому-либо ядру мишени.

Ферми был первым, кто понял, что эти нейтроны целесообразно замедлить, и осуществил это, поставив на пути нейтронов замедлитель – вещество, которое будет не поглощать нейтроны, а в упругих соударениях замедлять их. Атомные ядра этого вещества должны быть достаточно легкими для того, чтобы отнимать у нейтронов кинетическую энергию. В начале периодической системы таких элементов всего только два – водород (точнее, его изотоп дейтерий) и углерод. Ферми использовал парафин – вещество, содержащее много углерода и водорода. И сейчас в большинстве ядерных реакторов в качестве замедлителя нейтронов используется углерод (в виде химически чистого графита) или «тяжелая» вода, в которой обычный водород заменен дейтерием.



Энрико Ферми

В 1935 году Ирен и Фредерик Жолио-Кюри стали нобелевскими лауреатами по химии «за синтез новых радиоактивных элементов», а в 1938 году Энрико Ферми получил Нобелевскую премию по физике «за открытие искусственной радиоактивности, вызванной бомбардировкой медленными нейтронами».

В 1934 году группа Ферми облучала нейтронами уран (элемент №92). По аналогии со всеми предыдущими опытами Ферми считал, что в результате был синтезирован 93-й элемент. Вполне логично Ферми назвал его трансурановым элементом. Об этом он заявил в своей Нобелевской лекции в декабре 1938 года. Но увы! Это было ошибкой.

На вручение Нобелевской премии Ферми приехал в Стокгольм со всей семьей – с женой, двумя детьми и их няней и после нобелевских торжеств не вернулся в Италию, а уехал в Нью-Йорк. И Ферми не успел узнать, что в эти самые дни, когда он готовился к невозвращению на родину (где во всю господствовал фашистский режим), в Германии радиохимики Отто Ган и Фриц Штрассман, повторив опыты Ферми, доказали, что принятый им за

трансурановый элемент №93 на самом деле представлял собой хорошо известный барий, родившийся совсем в другом процессе – делении ядра изотопа урана ^{235}U при попадании в него нейтрона. Работавшая в контакте с этими учеными выдающаяся физик-теоретик Лизе Мейтнер и ее коллега Отто Фриш создали теорию этого процесса. Весной 1939 года была опубликована их статья.

Нильс Бор был одним из первых, кто обратил внимание на возможность цепного (лавинного) процесса деления этого изотопа урана. В каждом акте деления под действием нейтрона обязательно кроме продуктов деления («половинок» ядра урана) должно рождаться несколько нейтронов, которые в свою очередь будут вызывать деление других урановых ядер. Реакция приобретает цепной (лавинный) характер. И за короткое время процесс деления может охватить все ядра урана.

В природе этого не происходит прежде всего потому, что изотопа ^{235}U в природном уране мало (0,72%), а рождающиеся нейтроны – быстрые. Они вылетают за пределы реакционной зоны, не успев вызвать развитие цепной реакции. Кроме того, в природной горной породе, содержащей уран, другие атомы будут активно поглощать нейтроны. И группа физиков-ядерщиков, сосредоточившаяся в США, пришла к выводу о возможности создания искусственных условий для развития цепной реакции. Из расчетов стало ясно, что это может стать источником огромной энергии (в расчете на килограмм в десять миллионов раз больше, чем выделяется при горении или обычном взрыве).

Поскольку деление урана было открыто немецкими физиками, в стране, грозящей войной всему миру, нужно было опередить Германию в работах по созданию страшного оружия. Прежде всего физики договорились не публиковать в научных журналах материалы по ядерной физике, а сами же работы не прекращать и, наоборот, всемерно усиливать. Особенно ускорились работы после получения в 1940 году грантов от правительства США (в результате знаменитого письма А.Эйнштейна президенту Ф.Рузвельту) и успешной тайной закупки США у Бельгии большого количества урановой руды (в то время уран добывали только в Чехословакии и в африканской бельгийской колонии).

Нептуний и плутоний

В 1940 году в США уже широким фронтом шло изучение реакции деления изотопов урана. Развернулись и работы по получению трансурановых элементов, но не с помощью нейтронов, как это делалось за несколько лет до этого в Италии, Франции и Германии, а на ускорителе в Беркли. Радиационная лаборатория Калифорнийского университета стала ведущей научной организацией, занимавшейся «проблемой урана», и была такой до создания сверхсекретной лаборатории в Лос-Аламосе, где были сосредоточены работы по конструированию бомбы. А работами по урану стал руководить Эрнест Орландо Лоуренс, получивший в 1939 году Нобелевскую премию по физике «за изобретение и совершенствование циклотрона». В 1936 году Лоуренс возглавил Берклиевс-

Национальная лаборатория в Беркли

Эрнест Орландо Лоуренс

кую лабораторию и оставался на этом посту до конца жизни (до 1958 г.). В августе 1958 года лаборатория стала носить имя Лоуренса, сокращенно ее называют LBL, и получила статус Национальной лаборатории США.

В Берклиевской национальной лаборатории имени Э.Лоуренса сосредоточены прорывные работы по физике, астрономии, химии и биологии, так или иначе связанные с атомной и ядерной физикой. Среди сотрудников лаборатории (по данным на 2022 год) 16 нобелевских лауреатов. Девиз лаборатории – «Привнесение научных решений в мир».

В создании атомной бомбы на первый план быстро вышли работы по получению сверхчистого изотопа урана-235, способного к эффективной реакции деления и получению второго делящегося элемента – трансуранового, как назвал его Лоуренс. На ускорителе разгонялись дейтроны, а мишенью были ядра изотопа урана-238. В ядерной реакции

$$^{238}_{92}\mathrm{U} \to {}^{2}_{1}\mathrm{H} \to {}^{238}_{93}\mathrm{Np} + 2\,{}^{1}_{0}n$$

получается ядро атома нового элемента с числом протонов 93. Имя «нептуний» ему было дано Э.Лоуренсом некоторое время спустя. Изотоп этого трансуранового элемент испытывает бета-распад с коротким временем жизни (периодом полураспада) около 3 суток. Он превращается в изотоп следующего, 94-го элемента в реакции радиоактивного превращения

$$^{238}_{93}\mathrm{Np} \to {}^{238}_{94}\mathrm{Pu} \to {}^{0}_{-1}\beta.$$

Трансурановый элемент №94 и представлял главный интерес для создания атомной бомбы. Лоуренс впоследствии назвал его плутонием, завершая «планетный» ряд названий. Он, правда, не мог знать, что вскоре астрономы лишат Плутон звания планеты и переведут в группу планет-карликов.

Быстро выяснилось, что 3 из 20 изотопов плутония обладают свойствами при попадании нейтрона испытывать деление с выделением большого количества энергии. Один из них, плутоний-239, оказался самым подходящим для использования в бомбе. Его сейчас называют «оружейным плутонием». Этот изотоп получается не в ускорителях, а в цикле ядерных реакций

$$^{238}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}n \to {}^{239}_{92}\mathrm{U}, \quad {}^{239}_{92}\mathrm{U} \to {}^{239}_{93}\mathrm{Np} + {}^{0}_{-1}\beta,$$

$$^{239}_{93}\mathrm{Np} \to {}^{239}_{94}\mathrm{Pu} + {}^{0}_{-1}\beta.$$

Большое количество медленных нейтронов, необходимых для первой реакции этого цикла, можно получить за счет реакции деления урана-235.

Получением плутония стал заниматься Э.Ферми. Под его руководством в Металлургической лаборатории в Чикаго был сооружен первый в мире графитовый ядерный реактор. Работы по его созданию развернулись в декабре 1941 года, а уже через год реактор был запущен и стал вырабатывать первые ощутимые граммы плутония. А еще через три года в СССР физики вновь проделали весь этот путь – от получения первых атомов трансурановых элементов нептуния и плутония до промышленных реакторов, ставших фабриками оружейного плутония и мирными атомными электростанциями.

От №95 к №118

Работы по синтезу других трансурановых элементов 70 лет назад развернулись в нескольких научных центрах. В США это была, конечно, Берклиевская национальная лаборатория. Позднее неподалеку, в городе Ливерморе, возникла еще одна национальная лаборатория, созданая для работ по термоядерной реакции синтеза – вначале для создания водородной бомбы. Но в ней тоже занимались синтезом трансурановых элементов. И сегодня в этой лаборатории продолжаются эти работы, а также идет работа по созданию управляемого термоядерного синтеза как источника энергии. Разогрев плазмы до высокой температуры начала термоядерной реакции (20 миллионов градусов) здесь осуществляется с помощью концентрации многих лазерных излучений на плазменном шарике. Недавно в печати появилось сообщение о том, что концентрация лучей 192 мощных лазеров нагрела плазму до нужной температуры и реакция началась.

Два крупных научных центра по синтезу трансурановых элементов появились 70 лет назад в Европе. Один центр – Институт тяжелых ионов – возник в Германии, в земле Гессен в пригороде Дармштадта. Сейчас он называется Центром по изучению тяжелых ионов имени Гельмгольца. В этом названии отражена главная особенность этого центра – использование для синтеза линейных ускорителей тяжелых ионов (тяжелых по сравнению с протонами, дейтронами и альфа-частицами). Другой центр – в Советском Союзе в подмосковном городе Дубне (о нем будет рассказано дальше). Еще один центр возник в далекой Японии. Он называется просто: Институт физико-химических исследований. В США к двум национальным лабораториям присоединилась и еще одна, в штате Теннесси в городе Ок-Ридж.

Все эти центры до недавнего времени плодотворно сотрудничали, соревнуясь в своих открытиях и споря иной раз по поводу приоритета и присвоения названий открываемым трансурановым элементам. Утверждение открытия элемента, внесение его в периодическую систему и окончательное присвоение названия производится Международным союзом теоретической и прикладной химии (IUPAC). Эта авторитетная международная организация была создана в 1919 году, она состоит из 20 отделов, один из которых (отдел неорганической химии) занимается, в частности, трансурановыми элементами. Утверждение рекомендаций этого отдела происходит на конгрессах IUPAC раз в 4 года. Последний раз это было в 2016 году, с тех пор новые элементы официально еще не открыты.

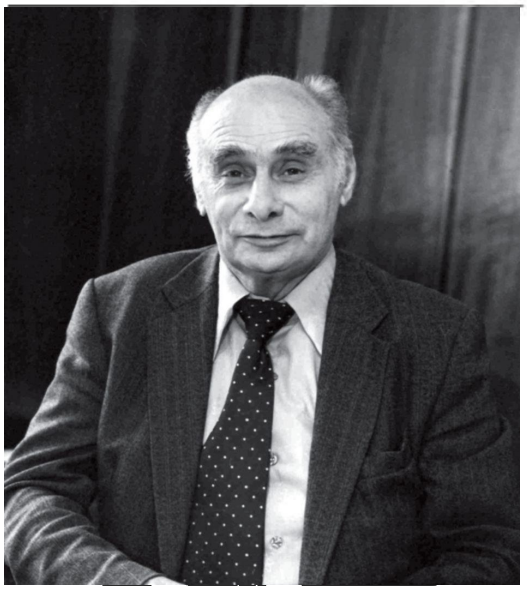
Открытие трансурановых элементов можно разделить на три этапа. С 1940 по 1974 год это происходило практически только в Берклиевской национальной лаборатории. Было синтезировано 14 трансуранов – с №93 по №106. Всеми этими работами руководил Гленн Теодор Сиборг, выдающийся американский физик и химик. Всю жизнь он был верен Берклиевской лаборатории и Калифорнийскому университету, где стал его президентом. В годы создания атомной бомбы он возглавлял плутониевую часть проекта в Чикагской металлургической лаборатории, где работал Ферми. В 1961 году Сиборг был назначен председателем

Гленн Теодор Сиборг

Комиссии по атомной энергии США. Вместе с сотрудниками Берклиевской лаборатории Сиборг идентифицировал более 100 изотопов четырнадцати трансурановых элементов, разработав тончайшие методы изучения свойств этих изотопов. Он стал нобелевским лауреатом по химии 1951 года (вместе с Эдвином Макмилланом). И поэтому заслуженно элементу №106 было присвоено имя *сиборгий* (впервые при жизни ученого-открывателя).

Получение новых элементов начиналось с атомов плутония, бомбардируемых альфа-частицами, разогнанными в циклотронах. Так был получен элемент №95 (америций). Его бомбардировка альфа-частицами дала следующий элемент – №96 (кюрий). Затем были синтезированы берклий (№97) и калифорний (№98). Эти 4 элемента нашли широкое применение и в научных исследованиях, и в самых различных областях (от военного дела до медицины). Сегодня их получают в реакциях с нейтронами на специально сооруженных для этой цели ядерных реакторах. При длительной работе реакторов потоки нейтронов постепенно, один за другим превращают плутоний в америций, америций – в кюрий, кюрий – в берклий, берклий – в калифорний. Главная трудность и огромный объем работ связаны с извлечением новых элементов из их смеси с продуктами деления урана в отработанном ядерном топливе реактора. Понятно, что себестоимость новых изотопов очень высокая. Так, например, один грамм калифорния стоит 60 миллионов долларов. Это – самый дорогой металл в мире. Для сравнения – грамм золота (в зависимости от конъюнктуры) имеет цену 40–50 долларов.

Следующие элементы, №99 (эйнштейний), №100 (фермий), №101 (менделевий), №102 (нобелий) и №103 (лоуренсий), характерны тем, что у них нет долгоживущих изотопов. Максимальные периоды полураспада не превышают нескольких часов, а большинство изотопов имеют миллисекундные периоды полураспада. Это сильно затруднило изучение химических свойств изотопов и их спектров. По



Георгий Николаевич Флёров

этим причинам их главное применение – это использование для синтеза последующих трансурановых элементов. Интересно, что эйнштейний и фермий были обнаружены впервые в осадках после испытания первого американского устройства прообраза водородной бомбы в 1952 году на атолле Эниветок в Тихом океане. И только через 10 лет ничтожное количество эйнштейния было получено на синхротроне в Беркли.

Вторая группа трансурановых элементов, от №104 (резерфордий) до № 112 (коперниций), характерна тем, что они были синтезированы не на американском континенте, а в Европе – в Институте тяжелых ионов в Дармштадте и в Объединенном институте ядерных исследований в подмосковной Дубне. Идея получения всех этих элементов родилась в Дубненском институте (Г.Н.Флёров и Ю.Ц.Оганесян). Это – столкновение ядер элементов конца периодической системы с ядрами середины периодической системы, а именно висмута и хрома, свинца и железа, свинца и никеля. При этом важно, чтобы ядро одного из этих атомов было особенно крепким, имело большую энергию связи нуклонов, что следовало из теоретической оболочечной модели атомных ядер. Но для разгона

одного из ядер до нужной энергии при этом необходимы были мощные ускорители. Они и были построены в этих двух центрах, в Дармштадте – линейный, в Дубне – циклический. Идентификация новых ядер стала еще более трудной. Время их жизни было столь коротким, что идентификация, например получение характеристических рентгеновских спектров, не поспевала за их радиоактивным распадом. Нужно было разрабатывать специальные методы исследования для каждого элемента.

Третий этап синтеза трансуранов, с №113 (нихоний) по №118 (оганесон) – это приоритетность Дубненского института (с участием для двух элементов ученых из Ливерморской национальной лаборатории США). Развивая оболочечную теорию ядер, Ю.Ц.Оганесян рассчитал, что наиболее подходящими ядрами для бомбардировок должны быть ядра изотопа кальция. Так и оказалось. И многие теоретические предсказания свойств новых элементов были подтверждены, например – плотность дармштадтия. Она оказалась самой большой плотностью для всех элементов, как и было предсказано, равной 34,8 г/см^3 .

Особый интерес представляло получение 118-го элемента, оганесона, названного так в честь его создателя, академика Юрия Цолаковича Оганесяна. Внимательный читатель, возможно, обратил внимание на необычное для всех других трансурановых элементов окончание *он* у этого элемента. Дело в том, что у атома оганесона наружная, седьмая электронная оболочка имеет 8 электронов. Подобные наружные электронные оболочки имеют химически инертные атомы («благородные газы»). Все они (кроме гелия) имеют окончание *он*. Самый тяжелый благородный газ на Земле – это радон. Эти атомы мало подвержены соединению с другими атомами – они химически нейтральны. Они даже не могут объединиться в собственную молекулу, как это делают водород, кислород и азот. Теория однако предсказывала, что температура сжижения этого нового вещества будет примерно 350 К, а температура отвердевания еще ниже. При комнатной температуре вещество из оганесона теоретически должно быть не благородным газом, а «благородным» твердым телом, оганесоновым льдом. Правда, в 2007 году было синтезировано всего три (!) атома оганесона и проверить эти предсказания было невозможно. Но прошло много лет, научились получать уже заметные доли грамма этого элемента (бомбардировкой заряженными частицами мишени из калифорния), и теоретические предсказания сбываются.

Может возникнуть вопрос: почему так трудно идентифицировать новые элементы и определять их физические и химические свойства? Казалось бы, что после открытия элемента и убежденности в его существовании нужно переходить к его массовому производству с использованием калифорниевой мишени (другие трансурановые изотопы не подходят из-за малого времени жизни). Но вспомните цену калифорния! Мишени из калифорния делают только лишь в двух местах – в США и в России. Дубненский институт имеет калифорниевую мишень, он ее бережет для

Юрий Цолакович Оганесян

получения новых, еще не открытых элементов.

В двух следующих абзацах обсуждаются вопросы о порядке заполнения электронных атомных оболочек. Это особенно интересно тем, кто любит химию.

Открытие 118-го элемента подвело некоторый итог заполнению периодической системы новыми элементами. Еще Лоуренс в 1947 году назвал элементы после актиния (№89) актиноидами, по аналогии с лантаноидами (элементами с №57 по №72). У 14 лантаноидов при неизменной наружной оболочке из двух $5s$-электронов постепенно заполняется электронами внутренняя подоболочка $4f$. У актиноидов при неизменной наружной оболочке из двух $7s$-электронов четырнадцатью электронами заполняется внутренняя подоболочка $5f$. Последний элемент, у которого она заполнена, это 102-й элемент – нобелий. Лоуренс предсказал, что у 103-го элемента останется неизменной наружная оболочка, состоящая из двух электронов, а начнет заполняться внутренняя оболочка $6d$. Так и оказалось – это было подтверждено исследованием химических свойств 103-го элемента. Не потому ли его и назвали лоуренсием?

В d-подоболочке может быть не больше 10 электронов, и 10 элементов, начиная с лоуренсия, сейчас принято называть сверхактиноидами (это слово тоже придумал Лоуренс). Последний из них – 112-й элемент, коперниций. Поэтому очень важно было знать, как поведет себя 113-й атомный электрон. Оказалось, что ему выгоднее стать в состояние $7p$ наружной седьмой оболочки, чем в состояния внутренних оболочек $5g$ или $6f$. Изучение химических свойства 113-го элемента (нихония), проведенное в Дубне, надежно показало это. Полностью заполненной $7p$-подоболочка стала у оганесона, 118-го элемента.

Сегодня сверхактиноидами называют элементы с №103 по №118. А что же дальше? Последующие элементы продолжатель дела Лоуренса Гленн Сиборг назвал суперактиноидами. Дальнейшие синтезы покажут характер заполнения электронных оболочек у них. Но кроме этого физиков волнует вопрос о теоретических предсказаниях особой устойчивости некоторых суперактиноидов, которые были названы «островом стабильности».

Но вот уже 7 лет нет сведений о синтезе новых элементов. У кандидатов на места №119 и №120, об открытии которых промелькнули сообщения, слишком короткое время жизни, чтобы можно было сделать надежные выводы. В Дубне ждут полного ввода в строй нового мощного ускорителя – ионного коллайдера. Аналогичные проблемы существуют и в других мировых центрах синтеза трансурановых элементов.

А нужно ли продолжать работы по синтезу трансуранов? Может быть, следует прекратить эти сверхдорогие исследования и ограничиться 118-ю элементами периодической системы? Есть несколько ответов на такой вопрос. Прежде всего, исследования эти развивают всю ядерную физику. Сегодня создается кварко-глюонная модель атомного ядра. Она должна прийти на смену оболочечной модели, на которой были основаны все сделанные синтезы. В ближайшие годы научное сообщество физиков-ядерщиков ждет открытия новых элементов, у которых найдутся долгоживущие изотопы. Тогда станет ясно, находятся ли на верном пути теоретики-ядерщики.

Но не слишком ли велика плата за новый вариант теории ядра? Ведь все эксперименты ядерной физики очень дорого обходятся. Строительство гигантских ускорителей, трансурановые синтезы, проблема захоронения радиоактивных отходов – это многомиллиардные затраты. Однако напрашивается аналогия с освоением ближнего космоса и астрофизическими исследованиями Вселенной. Это ведь тоже стоит очень дорого. Но остановить развитие работ как в космических исследованиях, так и в ядерной физике невозможно. Кроме вопросов национально-государственного престижа, это необходимо для удовлетворения жажды узнать новое о том мире, в котором мы живем. Развитие прогресса с самого начала возникновения человечества определялось не только материальными потребностями. Жажда познания (или,

как иногда более грубо говорится, любопытство), наверное, самая главная духовная потребность человечества.

Не менее важно, по-видимому, и практическое значение получения новых элементов. Считается, что заметное уменьшение смертности от онкологических заболеваний связано именно с использованием для ранней диагностики и лечения искусственных, созданных на ускорителях и в реакторах элементов – технеция, калифорния и др. Вполне возможно, что изотопы из «острова стабильности» тоже проявят себя в этом применении.

Впрочем, есть и другие области, где трансурановые элементы оказались незаменимыми. Интересно, что без трансурановых элементов, как источников энергии, многие космические исследования были бы невозможны, например – посылка космических аппаратов к Луне или проекты отклонения крупных астероидов от возможного удара по Земле.

О названиях элементов

Что касается «старой» периодической системы, с ее 92 элементами, то созданная в 1919 году международная организация IUPAC первым делом навела порядок в их названиях, вернее в окончаниях этих названий. Было решено (в старом варианте периодической системы) названия элементов с первой по шестую группу заканчивать окончанием *ит*, седьмой группы (галогенов) – окончанием *ин*, восьмой группы (химически нейтральных, «благородных» элементов) – окончанием *он* (кроме гелия, который произносится как *helium*).

В бурные послереволюционные годы российские химики не успели (или не захотели) освоить эти правила, и нашему времени достался полный хаос в этом вопросе. Из 92 элементов периодической системы 48 заканчиваются у нас на *ий*, что, вообще говоря, соответствует духу славянских языков. У 10 элементов сохранились их исторически укоренившиеся в русском языке имена, естественно, не предусмотренные их открывателями (кремний, железо, медь, мышьяк, серебро, олово, сурьма, золото, ртуть, свинец). Правда, в химических формулах эти элементы произносятся, как и полагается – в латинском международном звучании с окончанием *ит* (силициум, феррум, купрум, арсеникум, аргентум, станнум, стибиум, аурум, хидраргирум, плюмбум). Пять благородных газов произносятся так, как и во всем мире, и заканчиваются на *он*. Что же касается оставшихся 29 элементов, то тут – полный разнобой. Шесть элементов, имеющих и славянские и неславянские корни, – водород, углерод, азот, кислород, фосфор, сера – в формулах произносятся просто по первой букве их латинского (международного) названия. Самое известное вещество с таким произношением – это H_2O. И еще у 23 элементов много разных вариантов – все галогены, титан, хром, марганец, кобальт, никель и т.д. до платины и урана.

Когда был синтезирован 43-й элемент, он получил международное имя *технециум*. Но, естественно, в нашей стране он получил имя с традиционным окончанием большинства элементов – *технеций*. То же самое произошло и со всеми трансурановыми элементами. Все они у нас оканчиваются на *ий*, а «там» – на *ум*. Единственное исключение – 118-й элемент. Как и полагается благородному химическому элементу, он всюду произносится одинаково – *оганесон*.

Как обстоит дело с присвоением названий новым трансурановым элементам? Отдел Международного союза теоретической и прикладной химии, который занимается трансурановыми элементами, работает над утверждением нового элемента с внесением его в периодическую систему и присвоением ему названия. Этот отдел готовит предложения для утверждения их конгрессом Международного союза.

Дело в том, что синтезированный элемент принято сразу же называть условным именем – по принципу, введенному еще Д.И.Менделеевым. Так, 118-й элемент вначале имел названия *экарадон*. В 2015 году было признано его открытие коллективом Дубенского института и он был внесен в периодическую систему элементов под предварительным именем *унунок-*

тий. А через год он получил окончательное имя *оганесон* (*oganesson* в международном написании).

Для первых трансурановых элементов трудностей в утверждении приоритета и присвоении названий не возникало. Была только одна научная организация, где совершался синтез новых элементов, Берклиевская национальная лаборатория, и один научный руководитель, Э.Лоуренс. Названия элементов с №93 по №100 (от нептуния по фермия) не вызывали никаких дискуссий. Все началось потом, когда в работу по синтезу включились немецкая и советская группы. Появился даже термин «трансфермиевские войны». Эти «войны» на самом деле были доброжелательными дискуссиями, не мешавшими продолжению совместной работы по обсуждению результатов и поиску истины.

Два элемента получили «планетные» названия, а десять элементов после урана – по географическому названию страны или региона, где были проведены работы (даже если они и не завершились в этой стране). Это – америций, берклий, калифорний, дубний, дармштадтий, хассий (Дармштадский научный центр находится в немецкой земле Гессен), нихоний (древнее название Японии), московий (в честь Московской области, в которой находится город Дубна), ливерморий и теннессий (в честь штата, где находится Ок-Риджский научный центр). А 102-й элемент получил название *нобелий* по предложению шведских ученых, много сделавших для его синтеза. Остальные названия даны в честь ученых – физиков и химиков. Это – кюрий, эйнштейний, фермий, менделевий, лоуренсий, резерфордий, сиборгий, борий, мейтнерий, рентгений, коперниций, флеровий и оганесон.

Неожиданное название 112-го элемента – коперниций – было присвоено по просьбе ученых Дармштадского института тяжелых ионов, которые синтезировали его, а 110-й элемент уже получил имя дармштадтий. И в 537-ю годовщину со дня рождения Коперника, 19 февраля 2010 года, немецкие ученые обратились в IUPAC с соответствующей просьбой.

Объединенный институт ядерных исследований в Дубне

Мейтнерий получил свое название в честь Лизе Мейтнер, которая в 1939 году первой разобралась в реакции деления ядра урана и создала теорию этого явления в рамках капельной модели ядра. С этого и начался «атомный век» цивилизации.

Утвержденная приоритетность государств в открытии трансуранов такова: США – 10 элементов, Россия (СССР) – 7 элементов, Германия – 5 элементов, совместный приоритет у России и США у 3 элементов. И еще один элемент имеет совместный приоритет России и Германии.

Физика в городе на Волге

В заключение – немного о нашем российском центре, дубненском Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ), где было синтезировано большинство трансурановых элементов, открытых в этом столетии.

Дубненский институт был создан одновременно с выступлением И.В.Курчатова в английском центре ядерных исследований, тогда занимавшимся, главным образом, созданием ядерного оружия – водородных бомб. Это выступление 25 апреля 1956 года само было бомбой. В разгар первой холодной войны главный ядерщик нашей страны подробно рассказал, какие работы ведутся в СССР по термоядерной реакции синтеза гелия из изотопов водорода. В Англии и США эти

Один из дубненских ускорителей

работы считались тогда сверхсекретными.

А за месяц до этого в Москве представители 11 стран подписали Соглашение о создании ОИЯИ с целью «объединения их научного и ядерного потенциала для изучения фундаментальных свойств материи». Этот институт возник на базе Института ядерной физики АН СССР, находящегося в подмосковном городе Дубна, около Волги, вытекающей в этом месте из Московского моря (Иваньковского водохранилища). Там уже был ускоритель и под руководством В.И.Векслера велись работы по созданию протонного синхрофазотрона на 10 ГэВ, тогда самого крупного в мире.

ОИЯИ, как коллаборация исследователей из многих стран, был создан по аналогии с появившимся Европейским центром (ЦЕРН) для стран, не вошедших в него. Финансовый вклад СССР составлял 50%, КНР 20%. Остальные 30% приходились на долю других 9 стран-учредителей, – Чехословакии, Польши, Румынии, Болгарии, Греции, Вьетнама, Египта, Кубы и Монголии. Первым директором института стал профессор Д.И.Блохинцев, создавший в подмосковном Обнинске Физико-энергетический институт АН СССР и первую в мире атомную электростанцию.

В первые же годы работы ОИЯИ были достигнуты успехи в понимании кварковой структуры адронов, хромодинамики («цветность» кварков), нейтринных осцилляций и др. Это был передний край физики микромира.

Была создана лаборатория ядерных реакций под руководством академика Г.Н.Флёрова, а затем – академика Ю.Ц.Оганесяна. Уже в 1957 году в этой лаборатории был достигнут успех – был синтезирован один из изотопов нобелия, 102-го элемента. За прошедшие 60 лет в лаборатории было открыто свыше 200 радиоактивных изотопов трансурановых элементов, созданы уникальные установки для определения их физических и химических характеристик. Теоретические разработки ученых лаборатории получили всемирное признание.

Сегодня ОИЯИ – это комплекс из 7 крупных лабораторий, в которых работают более 1200 научных сотрудников, в том числе действительные члены и члены-корреспонденты Национальных академий наук, доктора и кандидаты наук, около 2000 техников и инженеров. Экспериментальная база – прежде всего, 5 исследовательских реакторов и 3 ускорителя. Заканчивается строительство единственного в мире ионного ускорителя-коллайдера.

Сегодня (на 1января 2023 года) 13 государств финансируют ОИЯИ и их ученые работают в нем. Это – Азербайджан, Армения, Белоруссия, Вьетнам, Греция, Египет, Казахстан, Куба, Молдавия, Монголия, Российская Федерация, Словакия и Узбекистан. Директором института два года назад выбран российский физик, 45-летний академик Григорий Владимирович Трубников. Дубна уже давно получила статус наукограда.

Высокий научный потенциал, которым обладает ОИЯИ, его экспериментальная база позволяют надеяться на дальнейшее раскрытие тайн атомного ядра. А синтез трансурановых элементов, которых нет в природе, – свидетельство могущества человеческой мысли, не боящейся дерзкого вмешательства в действия законов природы, управляющих нашим миром.