

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЩЕГО СОБРАНИЯ ЧЛЕНОВ РАН  
“ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ТАБЛИЦА –  
УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЯЗЫК ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ”

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ТАБЛИЦА ЧЕРЕЗ 150 ЛЕТ

© 2020 г. Ю. Ц. Оганесян

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

E-mail: oganessian@jinr.ru

Поступила в редакцию 20.01.2020 г.

После доработки 20.01.2020 г.

Принята к публикации 31.01.2020 г.

К началу 2019 г., провозглашённого ООН и ЮНЕСКО Международным годом Периодической таблицы химических элементов, 7-й период таблицы был уже заполнен новыми, самыми тяжёлыми элементами. Согласно предсказаниям теории, изотопы сверхтяжёлых элементов, обладающие повышенной стабильностью, образуют на карте нуклидов большую зону в виде острова с вершиной, расположенной вблизи “магических” чисел протонов  $Z = 114$  и нейтронов  $N = 184$ . Новые элементы с атомными номерами от 114 до 118 были синтезированы в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрва Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ) в Дубне в 2000–2012 гг. в реакциях слияния ядер мишени – тяжёлых изотопов актиноидов ( $Z = 94–98$ ) – с бомбардирующими ионами кальция-48. Из полученных экспериментальных результатов следует, что могут существовать ядра/элементы с атомными номерами более 118 и массами более 300 а.е.м. Для исследования ядерной и электронной структур новых элементов, а также их химических свойств, равно как и синтеза элементов начала 8-го периода Периодической таблицы, в Дубне создан новый экспериментальный комплекс Фабрика сверхтяжёлых элементов (Фабрика СТЭ), где уже состоялся пуск нового ускорителя DC-280 и в ближайшее время начнутся эксперименты. Вводная и заключительная части моего выступления на научной сессии Общего собрания членов РАН относились к открытию периодического закона, опубликованного Д.И. Менделеевым 150 лет назад. Действие этого закона в свойствах тяжелейших элементов представляет и сегодня одну из актуальных и интересных задач естествознания.

**Ключевые слова:** Периодическая таблица Д.И. Менделеева, сверхтяжёлые элементы, “остров” стабильности, Фабрика сверхтяжёлых элементов, спонтанное деление.

DOI: 10.31857/S086958732004009X

ПРОЛОГ

Предание гласит, что всё началось с письма, которое сэр Мартин Поляков, профессор Ноттингемского университета (Великобритания) и иностранный член РАН, направил 28 июля 2016 г.



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

президенту Международного союза чистой и прикладной химии (ИЮПАК) члену-корреспонденту РАН Наталии Павловне Тарасовой:

“Уважаемая Наталия, надеюсь, что Вы в порядке.

Как я понимаю, 2019 год станет 150-й годовщиной публикации Менделеевым Периодической таблицы. Было бы интересно знать, можно ли поднять вопрос о том, чтобы объявить 2019 год Международным годом Периодической таблицы. Чувствую, что это предложение может получить большую поддержку. Как Вы думаете?

С наилучшими пожеланиями,  
Мартин Поляков”.

Н.П. Тарасова поставила этот вопрос на заседании Исполнительного комитета ИЮПАК, который, как ей показалось, со здоровым скептицизмом поддержал идею Международного года

Периодической таблицы и предложил России воплотить её в жизнь через ЮНЕСКО. Начиная с этого момента вся деятельность по данному вопросу, проводимая Международным союзом чистой и прикладной химии в течение 18 месяцев, легла на плечи президента ИЮПАК и её коллег.

Российская академия наук и российские химики с большим воодушевлением взялись за дело: написали обращение Менделеевского съезда (2016) и Российского химического общества к мировой научной общественности, президент РАН академик В.Е. Фортов направил письмо министру иностранных дел России С.В. Лаврову, РАН обратилась в ИЮПАК, Н.П. Тарасова написала письмо Генеральному директору ЮНЕСКО и пр. К этому времени подошло другое событие, непосредственно связанное с Периодической таблицей химических элементов. После включения в 2012 г. в таблицу 114-го и 116-го элементов ИЮПАК принял название и утвердил символы ещё четырёх химических элементов, в их числе двух самых тяжёлых. Это случилось 28 ноября 2016 г. Все четыре элемента со своими названиями и символами заполнили и замкнули 7-й ряд Периодической таблицы Д.И. Менделеева. На инаугурации новых химических элементов, состоявшейся 2 марта 2017 г. в Доме учёных РАН, три директора сотрудничающих лабораторий – академик РАН Виктор Матвеев (ОИЯИ, Дубна, Россия), профессор Томас Мейсон (Ок-Риджская национальная лаборатория, Ок-Ридж, США) и профессор Вильям Гольдштейн (Ливерморская национальная лаборатория, Ливермор, США) – направили совместное письмо в ЮНЕСКО в поддержку юбилейного года Периодической таблицы. И это далеко не полный перечень шагов, предпринятых научным сообществом в преддверии 2018 г.

А 20 декабря 2017 г. с интересной и необычной формулировкой – *“признавая важность глобального расширения знаний о том, как химия способствует устойчивому развитию в области энергетики, образования, сельского хозяйства и здоровья,”* – Генеральная Ассамблея ООН, затем и ЮНЕСКО провозгласили 2019-й Международным годом Периодической таблицы химических элементов – ГУРТ-2019.

### НОВЫЕ ОБИТАТЕЛИ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТАБЛИЦЫ

В 1928 г. Георгий Антонович Гамов, наш соотечественник, выпускник Ленинградского государственного университета, уже известный к тому времени советский физик, предложил первую теоретическую модель атомного ядра в виде капли заряженной жидкости с плотностью, на 15 порядков превышающей плотность воды [1]. В новой науке, ядерной физике, этой работе суждено

было сыграть большую роль. На основе капельной модели ядра Гамов создал теорию альфа-распада (1928) [2], Карл Фридрих фон Вайцзеккер предложил свою знаменитую формулу для расчёта энергии связи ядер (1935) [3], а Нильс Бор и Джон А. Уилер создали теорию ядерного деления (1939) [4]<sup>1</sup>.

Согласно Бору и Уилеру, тяжёлое ядро предохраняет от разделения на две части потенциальный барьер. Высота барьера деления ядра урана составляет 6 МэВ. Поэтому если в ядро внести энергию более чем 6 МэВ (например, энергию захвата ядром нейтрона), оно моментально разделится на две части. В этом процессе выделяется энергия около 200 МэВ, что используется в атомных электростанциях. Однако ядро урана может разделиться самопроизвольно (спонтанно) без вноса в ядро дополнительной энергии. Для этого, как было впервые измерено Г.Н. Флёровым и К.А. Петржаком (1940) [6], потребуется огромное время –  $10^{16}$  лет! По мере удаления от урана в область более тяжёлых ядер высота барьера деления быстро уменьшается, что приводит к резкому увеличению вероятности спонтанного деления. При исчезновении барьера ядро будет испытывать спонтанное деление за время около  $10^{-19}$  с. В теории Бора и Уилера подобная критическая ситуация наступает при подходе к элементам с атомным номером 100. По сути, это и есть предел существования ядер.

Ещё 60 лет назад такое макроскопическое, и в этом смысле классическое, описание процесса деления не вызывало сомнений. Особенно после синтеза первых искусственных элементов тяжелее урана, прекрасно подтверждающего капельную теорию деления: от урана ( $Z = 92$ ) до калифорния ( $Z = 98$ ) период полураспада относительно спонтанного деления уменьшился в  $10^{14}$  раз [7]! Сомнения в прогнозах капельной модели деления возникли позже, после открытия в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрова ОИЯИ спонтанно делящихся изомеров (1962) [8]. Оказалось, что внутренняя структура ядра, наблюдаемая в основных состояниях, сохраняется и в сильно деформированных конфигурациях на пути к делению, продолжая играть важную роль в вероятности спонтанного деления тяжёлых ядер. Теперь уже более сложное описание коллективного движения в новой микроскопической теории давало одновременно также и новые предсказания границы масс ядер. Результаты оказались весьма неожиданными. Согласно прогнозам, резкое падение стабильности трансурановых нуклидов относительно спонтанного деления должно смениться резким подъёмом в области сверхтяжёлых

<sup>1</sup> В то же время в нашей стране теорию ядерного деления независимо развивал Я.И. Френкель [5].



**Рис. 1.** Периоды полураспада ядер с  $Z \geq 96$  относительно спонтанного деления. Чёрные кружки — экспериментальные значения для актиноидов и изотопов 104-го элемента. Открытые кружки — один из вариантов предсказаний для ядер с  $Z \geq 106$  и  $N \geq 150$ . С правой стороны: периоды спонтанного деления изотопов 114-го элемента, рассчитанные в макромикроскопической модели ядра

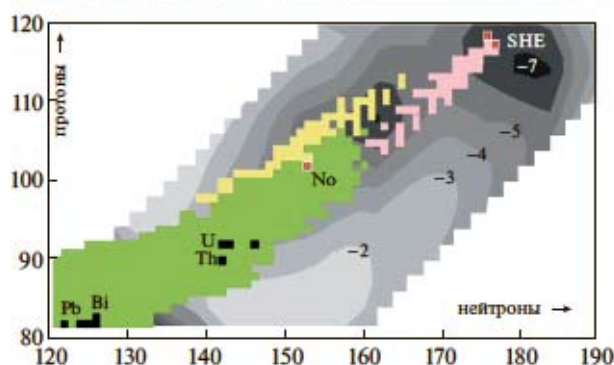
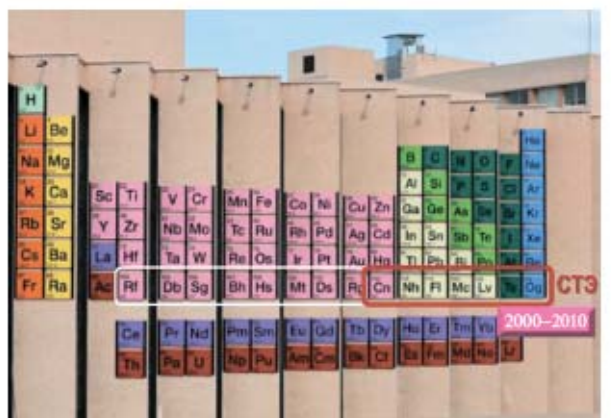
элементов при подходе к “магическим” ядрам с числом протонов  $Z = 114$  и нейтронов  $N = 184$ . Эти нуклиды, обладающие большим избытком нейтронов, более связаны. Они отделены от известной области ядер. Их достаточно много. На карте ядер они представляют собой подобие некоего “острова” весьма тяжёлых (сверхтяжёлых) элементов, у которых могут быть очень долгоживущие изотопы. В научных статьях и докладах начала 1970-х годов можно найти различные иллюстрации, подобные той, что представлена на рис. 1.

Многие лаборатории мира буквально ринулись на поиски этих долгоживущих тяжеловесов. Но, к сожалению, все экстенсивные попытки найти их в природе, космических лучах и даже путём искусственного синтеза сверхтяжёлых элементов, предпринятые в течение 15 лет (1970–1985), не дали результатов. Оставляя пока вопрос о вероятности образования ядер с массой около 300 а.е.м. в процессах природного ядерного синтеза, отметим, что время жизни сверхтяжёлых долгожителей заметно меньше возраста Солнечной системы ( $4.5 \times 10^9$  лет) и они не дожили до наших дней. Что же касается искусственного синтеза, то все методы синтеза двадцати известных к тому времени искусственных элементов тяжелее урана, к сожалению, не пригодны для этих целей. Они “не дотягивают” до “острова” стабильности прежде всего из-за дефицита нейтронов в системе сливающихся ядер.

После 1985 г. мы кардинально изменили подход к синтезу сверхтяжёлых элементов. Для того чтобы добраться до “острова” и увидеть резкий подъём стабильности, предсказанный теорией, пришлось существенно усложнить эксперимент. Теперь вместо использования стабильных ядер в качестве материала мишени были выбраны тяжёлые изотопы трансурановых элементов (такие, как плутоний-244 или кюрий-248), полученные в высокопоточном ядерном реакторе. Мишени из этих материалов подвергались бомбардировке ускоренными ионами кальция-48, исключительно редкого и дорогого изотопа природного кальция. Содержание кальция-48 в естественной смеси по отношению к основному изотопу кальцию-40 составляет всего 0.2%. Преимущества этой реакции прямо следуют из сравнения результатов экспериментов по синтезу 113-го элемента Nh, проведённого в RIKEN (Япония) и 114-го элемента Fl — в ОИЯИ (Дубна). Элемент Nh был синтезирован при слиянии ядер висмута-209 и цинка-70 [9]. Составная система после слияния двух атомных ядер содержит 113 протонов и 165 нейтронов. В этой реакции в течение девяти лет были получены три атома 113-го элемента. Элемент Fl ( $Z = 114$ ), полученный в Дубне в реакции плутоний-244 + кальций-48, имел в составном ядре 114 протонов и 178 нейтронов [10] — на 13 нейтронов больше, чем в предыдущем случае. Эти 13 нейтронов, как следует из дальнейшего, и сыграли решающую роль.

Высадка на берег “острова” в северо-западной его части была действительно впечатляющей. Вероятность образования тяжёлого изотопа 114-го элемента оказалась примерно в 500 раз выше, чем 113-го элемента, полученного в RIKEN. Ещё более сильное отличие наблюдалось в свойствах ядер, в частности, во временах жизни, измеряемых обычно периодами полураспада. Повышение числа нейтронов на 8 единиц в ядрах, синтезированных с ионами кальция-48, увеличило их период полураспада примерно в 100 тысяч раз! Оба фактора — рост вероятности образования ядер и их стабильности — демонстрируют сильный эффект “магической” структуры  $N = 184$ , даже несмотря на то, что синтезированный изотоп 114-го элемента содержит всего 175 нейтронов.

После первых результатов по исследованию изотопов 114-го и 116-го элементов в реакциях с ионами кальция-48 (2000–2002) последующие эксперименты по синтезу других элементов с атомными номерами 115, 117 и 118 были проведены по той же методике с мишенями из америция-243, берклия-249 и калифорния-249 соответственно [11–13]. За 15 лет работы (около 100 тыс. часов облучения мишеней пучком ионов кальция-48) были синтезированы 52 новых изотопа [14] от 104-го до 118-го элементов (рис. 2, а). На карте нуклидов они простираются до ядер массой 294 а.е.м.



**Рис. 2. а.** Таблица Д.И. Менделеева (площадь 150 м<sup>2</sup>) на фасаде химического факультета университета в городе Мурсия (Испания, 2017). В красной рамке показаны элементы, полученные в реакциях с пучком ионов кальция-48

**Рис. 2. б.** Область конца карты нуклидов: показаны изотопы от свинца до элемента 118. Красными квадратами обозначены самые тяжёлые ядра: с массой 252 а.е.м. (No, 1962) и 294 а.е.м. (Og, 2004), полученные впервые в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрва ОИЯИ. Жёлтым цветом показана область ядер, полученных в реакциях с использованием мишеней из свинца и висмута. Розовое поле – область ядер, синтезированных в реакциях с пучком ионов кальция-48. Фон – карта потенциальной энергии ядер в зависимости от содержания протонов и нейтронов, полученная в расчётах макро-микроскопической модели. Цифры и цвет указывают амплитуду структурной поправки (в МэВ) к жидко-капельной энергии ядра

(рис. 2, б). Это предельно тяжёлое ядро было получено в виде двух изобар: как чётно-чётный изотоп 118-го элемента с периодом полураспада около 0.5 миллисекунды и как нечётно-нечётный изотоп 117-го элемента с периодом полураспада около 50 миллисекунды. Оба периода полураспада в ядерном масштабе – огромные времена! Учитывая, что после образования нового ядра за время  $10^{-14}$ – $10^{-13}$  секунды вокруг него выстраивается вся электронная система атома, то подобный вывод можно сделать и о существовании элементов. Из данных экспериментов следует, что мы не дошли до предела масс ядер. Определённо, ядра мо-

гут иметь массу более 300 а.е.м., а количество элементов может быть свыше 118.

Заключая краткий экскурс в мир сверхтяжёлых, можно отметить, что, уйдя от висмута, последнего стабильного элемента, в область больших масс и зарядов, мы наблюдаем удивительную живучесть атомных ядер. В области предельных кулоновских сил дополнительные связи протонов и нейтронов структурного свойства создают в тяжёлом ядре барьер деления и делают тем самым возможным существование сверхтяжёлых элементов.

Эксперименты проводились на ускорителе У-400 в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрва ОИЯИ в сотрудничестве с Всероссийским научно-исследовательским институтом экспериментальной физики (ВНИИЭФ, г. Саров), Научно-исследовательским институтом атомных реакторов (НИИАР, г. Димитровград), а также с Ливерморской и Ок-Риджской национальными лабораториями (США), взявшими на себя труд по наработке мишенного материала и участвовавшими в ряде экспериментов.

### ТЯЖЕЛЕЙШИЕ АТОМЫ И ХИМИЯ СВЕРХТЯЖЁЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

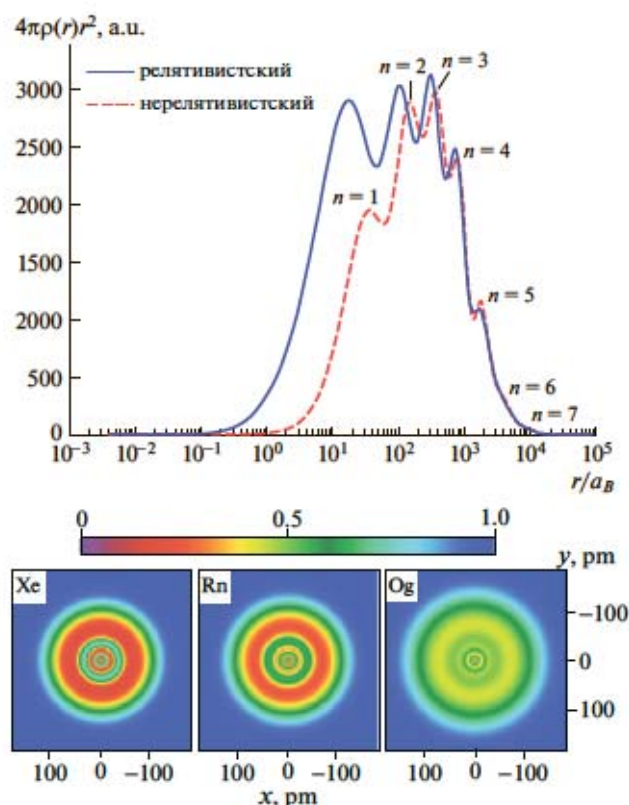
На фотографии (см. рис. 2, а)<sup>2</sup> изображена самая большая (150 м<sup>2</sup>) Периодическая таблица химических элементов, встроенная в фасад химического факультета Университета Мурсии (Испания)<sup>3</sup>. На ней красной рамкой выделены сверхтяжёлые элементы от 112-го до 118-го, полученные в реакциях с кальцием-48, когда в качестве материала мишени использовались тяжёлые изотопы от урана (Z = 92) до калифорния (Z = 98) соответственно<sup>4</sup>.

В белой рамке находятся дочерние нуклиды – продукты альфа-распада ядер из красной рамки. Они заполняют практически все оставшиеся клетки 7-го периода, вплоть до резерфордия (Z = 104). Дочерние ядра, берущие начало от нейтронно-избыточных материнских изотопов сверхтяжёлых элементов, тоже обогащены нейтронами, что значительно повышает их период полураспада и открывает широкие возможности для исследования химических свойств трансакт-

<sup>2</sup> Журнал “Вестник РАН” с цветными изображениями размещается в открытом доступе на сайте <https://sciencejournals.ru/journal/vestnik/>. Для доступа к полным текстам журнала не требуется регистрации.

<sup>3</sup> С 2019 г. самая большая Периодическая таблица химических элементов (660 м<sup>2</sup>) находится в Государственном университете им. Эдит Коуэн (ECU) в г. Перт, Австралия.

<sup>4</sup> К сожалению, калифорний – самый тяжёлый элемент, который может быть получен в ядерном реакторе в количестве, необходимом для изготовления мишени. Для синтеза 119-го элемента и более тяжёлых придётся увеличивать массу и заряд бомбардирующих ионов.



**Рис. 3. а.** Расчётная плотность электронов 118-го элемента (Og) в зависимости от радиуса (логарифмическая шкала) в двух вариантах расчёта: релятивистском (синяя кривая) и нерелятивистском (красный пунктир) приближениях. Цифрами на графике указаны электронные оболочки (периоды). Видно сильное сжатие внутренних электронных оболочек, в то время как средний радиус внешних (валентных) электронов мало меняется

**Рис. 3. б.** Пространственные распределения (функции локализации) электронов 118-го элемента (Og), полученные в работе [20]. Хорошо видно размытие внешних электронов в сравнении с его гомологами — радоном и ксеноном

тиноидов. Подобные исследования элементов, особенно конца 7-го периода, представляют большой интерес. Их химическое поведение может отличаться от более лёгких гомологов из-за релятивистского возрастания массы электронов с ростом заряда ядра. В более лёгких элементах релятивистский эффект проявляется в свойствах благородных металлов: золото — мягкий металл жёлтого цвета — не окисляется, ртуть тоже металл, но жидкий при комнатной температуре. Благородные металлы способны взаимодействовать друг с другом и создавать соединения типа ртуть/золото (амальгама ртути и золота). С увеличением атомного номера элемента и приближением скорости электронов к скорости света эффект будет быстро возрастать, вследствие чего химическое поведение сверхтяжёлых элементов,

например, 112-го элемента (Cn), может отличаться от своего лёгкого гомолога — ртути (Hg). В первом эксперименте, проведённом в Дубне (2007), исследовалась именно эта пара гомологов [15]. Измерялась адсорбция Cn и Hg на поверхности золота (Au) при различной температуре на предмет наблюдения различия в образовании соединений [Au–Hg] и [Au–Cn]. Наблюдаемое смещение пика адсорбции в область более низких температур было первым прямым экспериментальным наблюдением релятивистского эффекта в трансактиноидах. В целом 112-й элемент продемонстрировал свою принадлежность 12-й группе Периодической таблицы Менделеева. Но из результатов этого эксперимента и проведённых недавно расчётов [16] были выявлены также отличия физико-химических свойств Cn и Hg, в частности, в температурах их фазовых переходов. Как известно, температура плавления ртути составляет  $-38.8^{\circ}\text{C}$ , температура кипения  $-353.7^{\circ}\text{C}$ , в то время как расчётные значения для Cn заметно отличаются:  $10^{\circ}\text{C}$  и  $67^{\circ}\text{C}$  соответственно. При комнатной температуре, с учётом погрешности измерений, 112-й элемент будет либо сильно летучей жидкостью, либо газообразным.

Но это первый звонок. Дальнейшее увеличение заряда ядра будет более ощутимым. Поэтому спустя 100 лет после открытия Вильямом Рамзаем радона (1904) [17], последнего, до 2004 г., представителя семейства благородных газов 18-й группы таблицы, мы задаёмся вопросом: окажется ли 118-й элемент благородным газом? Релятивистский эффект наиболее сильно проявится на ближайших к ядру электронах, скорость которых максимальна [18–20], что приводит к сжатию внутренних орбит (рис. 3, а). Для внешних электронов “релятивистское сжатие” приводит к экранированию положительного заряда ядра. В этой ситуации необходимо учитывать (пока в виде малых поправок) взаимодействие внешних электронов друг с другом, которое мало в природных элементах и которым пренебрегают в нерелятивистских расчётах. Нетрудно предвидеть, что роль этих поправок будет быстро возрастать с увеличением атомного номера в сверхтяжёлых элементах. Сам расчёт поправок — по сути, задача многих тел — требует огромных вычислительных мощностей. Большие надежды здесь связаны с квантовым компьютером. А пока доступными средствами в различном приближении отрабатываются методы расчёта на известных атомах, которые затем используются для предельно тяжёлых систем. Релятивистский расчёт элементов 18-й группы показывает, что пространственное распределение внешних электронов 118-го элемента [21] существенно размыто по сравнению с радоном и тем более с ксеноном (рис. 3, б). Подобная картина воспроизводится в расчётах

Периодическая таблица,  
рассчитанная в релятивистском  
приближении

1																	18
1	2											13	14	15	16	17	2
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
11	12	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	br	kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	СТЭ (известные)				
Cs	Ba	La→	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl					
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr	Ra	Ac→	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og
119	120	121	122	123	Групповое отличие будет быстро исчезать с ростом Z												
Лантаноиды →		58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		
		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
Актиноиды →		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103		
		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		
Супер-актиноиды ⇄		122	123	... 155													

Рис. 4. Таблица Д.И. Менделеева с различными вариантами релятивистских расчётов. В синей рамке – сверхтяжёлые элементы, полученные в реакциях с пучком ионов кальция-48

В.М. Шабаева и его коллег [22], но указывается одновременно, что 118-й элемент на 94% будет благородным газом. Возможно, и не газом, а твёрдым телом при комнатной температуре [16, 23].

На примере 118-го элемента можно видеть, что в конце 7-го периода у элементов, именуемых сегодня сверхтяжёлыми, появляются отличные от лёгких гомологов признаки. Экспериментальные данные, к сожалению, весьма скудны прежде всего из-за малого количества сверхтяжёлых элементов и короткого времени их жизни. Одно из направлений будущих исследований нацелено на изучение атомной структуры и химических свойств уже синтезированных сверхтяжёлых элементов на новом оборудовании (см. далее).

Пока не видно принципиальных ограничений для синтеза 119-го и 120-го элементов – начала 8-го периода таблицы. Несмотря на то, что попытки их получения на старых установках в реакциях с ионами титана, хрома и даже железа, принятые в разных лабораториях, не увенчались успехом [24–26], это остаётся делом техники. Сложнее будет изучать их химические свойства из-за короткого периода полураспада, исчисляемого долями миллисекунды. Но здесь не ожидается сюрпризов. Большой скачок в химии будет иметь место при переходе от 118-го к 119-му элементу (от последней колонки таблицы к первой). По всей вероятности, 120-й элемент также в целом будет следовать своим лёгким гомологам второй группы. Отклонения начнутся, скорее всего, после 121-го элемента с различными сценариями дальнейшего продолжения таблицы (рис. 4). Элемент 122 либо откроет новую серию так называемых супер-актиноидов [27], включающую ещё

33 элемента вплоть до 155-го, либо 122-й элемент и все последующие продолжают 8-й период. Но в этом случае групповое различие элементов начнёт быстро исчезать (размываться). Пока же остаётся только гадать, как будет выглядеть химия атомных гигантов за пределами периодического закона.

### ФАБРИКА СВЕРХТЯЖЁЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

После открытия новых элементов, расположенных на “острове” стабильности, дальнейшее развитие исследований в этой области связано прежде всего с получением сверхтяжёлых нуклидов в значительно большем количестве. Спустя 10 лет после первых экспериментов по синтезу 114-го и 116-го элементов по результатам, полученным в опытах с пучком ионов кальция-48, а также в связи с общим прогрессом в смежных областях науки и техники стало ясно, что светимость экспериментов может быть существенно увеличена. Поэтому с 2012 г. мы сильно сократили экспериментальную программу на действующих установках и стали строить новую лабораторию – Фабрику сверхтяжёлых элементов, которая пока не имеет мировых аналогов. Она определяет и тем самым отражает технический уровень всех этапов работы по получению сверхтяжёлых элементов от создания мишеней из трансурановых элементов до доставки сверхтяжёлых нуклидов к экспериментальным физическим и химическим установкам. По достижению проектных параметров возможности Фабрики СТЭ будут превосходить современный уровень в 50–100 раз.



Рис. 5. а. Строение ускорительного комплекса Фабрика СТЭ

Рис. 5. б. Ускоритель тяжёлых ионов – циклотрон DC-280

Новый комплекс с инфраструктурой для работы с высокорadioактивными материалами расположен в отдельном строении (рис. 5, а). Там же находится новый сверхточный ускоритель тяжёлых ионов – циклотрон DC-280 [28], пуск которого состоялся в марте 2019 г. (рис. 5, б). Ускоритель доставляет пучки ионов в три экспериментальных зала, где размещаются сепарирующие каналы, химические и физические установки, а также другое экспериментальное оборудование. В настоящее время идёт наладка нового сепаратора и подготовка первого эксперимента.

### ЭПИЛОГ

За прошедшие 80 лет после открытия нептуния и плутония (1940) – первых искусственных элементов – Периодическая таблица пополнилась ещё 24 рукотворными элементами. Пять самых тяжёлых из них заняли своё место в таблице в последние семь лет. Искусственных элементов, как известно, в природе нет. А сверхтяжёлых элементов, скорее всего, не было и при зарождении Солнечной системы. Они получены в лабораториях в совершенно других условиях (реакциях), чем природные химические элементы. Однако

все известные сегодня 118 элементов располагаются в единой таблице в строгом соответствии с периодическим законом, открытым Дмитрием Ивановичем Менделеевым 150 лет назад.

Между тем Международный год Периодической таблицы – IYPT-2019, начавший своё шествие в ЮНЕСКО 29 января 2019 г., закончился в Токио (Япония) 5 декабря. Огромное количество статей в научных, научно-популярных и совсем не научных изданиях, удивительный всплеск очень интересных работ в области ядерной физики, химии, атомной физики, астрофизики, истории науки – все посвящённые 150-летию открытия Периодической таблицы химических элементов. Год был встречен с невероятным энтузиазмом не только научным миром, но и широкой общественностью. Форумы, конференции, симпозиумы, лекции, собрания научных обществ, академий наук многих стран – везде по-разному, но всегда одухотворенно и очень интересно.

Что-то объединяет людей. Быть может, также великие открытия и любовь к науке.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Считаю приятной обязанностью поблагодарить академика РАН А.Р. Хохлова за приглашение выступить на Общем собрании членов РАН с этим докладом и научного сотрудника нашей лаборатории Е.В. Чернышеву за помощь в подготовке статьи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gamov G.* Discussion on the structure of atomic nuclei // Proc. of the Royal Society A. 1929. № 123. P. 386–387.
2. *Gamov G.* Zur Quantentheorie des Atomkernes // Zeitschrift für Physik. 1928. V. 51. № 3/4. P. 204–212.
3. *Von Weizsäcker C.F.* Zur Theorie der Kernmassen // Zeitschrift für Physik. 1935. V. 96. P. 431.
4. *Bohr N., Wheeler J.A.* The Mechanism of Nuclear Fission // Phys. Rev. 1939. V. 56. P. 426–450.
5. *Френкель Я.И.* Электрокапиллярная теория расщепления тяжёлых ядер медленными нейтронами // ЖЭТФ. 1939. № 6. С. 641–653.
6. *Flerov G.N., Petrjak K.A.* Spontaneous Fission of Uranium // Phys. Rev. 1940. V. 58. P. 89.
7. *Seaborg G.T., Loveland W.D.* Transuranium Nuclei // Treatise on Heavy-Ion Science / Edited by D.A. Bromley. V. 4. P. 289. N.Y.: Plenum Press, 1985.
8. *Polikanov S.M., Druin A.V., Karnaukhov V.A. et al.* Spontaneous fission with an anomalously short period // Soviet Physics JETP-USSR. 1962. № 15(6). P. 1016–1021.
9. *Morita K., Morimoto K., Kaji D. et al.* Experiment on the Synthesis of Element 113 in the Reaction  $^{209}\text{Bi} (^{70}\text{Zn}, n)^{278}113$  // J. Phys. Soc. Jpn. 2004. V. 73. P. 2593–2596.

10. *Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Lobanov Yu.V. et al.* Synthesis of Superheavy Nuclei in the  $^{48}\text{Ca}+^{244}\text{Pu}$  Reaction // *Phys. Rev. Lett.* 1999. V. 83. P. 3154–3157.
11. *Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Lobanov Yu.V. et al.* Experiments on the synthesis of element 115 in the reaction  $^{243}\text{Am}(^{48}\text{Ca},xn)^{291-x}\text{115}$  // *Phys. Rev. C.* 2004. V. 69. № 021601(R).
12. *Oganessian Yu. Ts., Abdullin F.Sh., Bailey P.D. et al.* Synthesis of a New Element with Atomic Number  $Z=117$  // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 104. № 142502.
13. *Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Lobanov Yu.V. et al.* Synthesis of the isotopes of elements 118 and 116 in the  $^{249}\text{Cf}$  and  $^{245}\text{Cm}+^{48}\text{Ca}$  fusion reactions // *Phys. Rev. C.* 2006. V. 74. № 044602.
14. *Oganessian Yu. Ts., Utyonkov V.K.* Super-heavy element research // *Rep. Prog. Phys.* 2015. V. 78. № 036301.
15. *Eichler R., Aksenov N.V., Belozеров A.V. et al.* Chemical characterization of element 112 // *Nature.* 2007. V. 447. P. 72–75.
16. *Mewes J.-M., Smits O.R., Kresse G. et al.* Copernicium: A Relativistic Noble Liquid // *Angew. Chem. Int. Ed.* 2019. V. 58. P.17964–17968.
17. *Ramsay W., Soddy F.* Further Experiments on the Production of Helium from Radium // *Proceedings of the Royal Society of London (1854–1905).* 1904. V. 73. P. 346–358.
18. *Pershina V.* Relativity in the electronic structure of the heaviest elements and its influence on periodicities in properties // *Radiochimica Acta.* 2019. V. 107. P. 833–864.
19. *Eliav E., Borschevsky A., Kaldor U.* Electronic Structure at the Edge of the Periodic Table // *Nuclear Physics News.* 2019. V. 29. P. 16–20.
20. *Lackenby B.G.C., Dzuba V.A., Flambaum V.V.* Atomic structure calculations of superheavy noble element oganesson ( $Z=118$ ) // *Phys. Rev. A.* 2018. V. 98. P. 042512.
21. *Jerabek P., Schuettrumpf B., Schwerdtfeger P., Nazarewicz W.* Electron and Nucleon Localization Functions of Oganesson: Approaching the Thomas-Fermi Limit // *Phys. Rev. Lett.* 2018. V. 120. P. 053001.
22. *Shabaev V.M., Tupitsyn I.I., Kaygorodov M.Y., Kozhedub Y.S.* Localisation of electron states of Oganesson atoms // *The 4<sup>th</sup> International Symposium on Superheavy Elements (SHE2019).* Hakone, Japan. Dec. 1–5, 2019.
23. *Giuliani S. A., Matheson Z., Nazarewicz W. et al.* Colloquium: Superheavy elements: Oganesson and beyond // *Rev. Mod. Phys.* 2019. V. 91. № 1. P.01100.
24. *Düllmann C.E.* Superheavy Element Research at TASCA at GSI // *Fission and Properties of Neutron-Rich Nuclei.* 2013. V. 44. P. 271–277.
25. *Hofmann S., Heinz S., Mann R. et al.* Review of even element super-heavy nuclei and search for element 120 // *Eur. Phys. J. A.* 2016. V. 52. P. 180.
26. *Oganessian Yu.Ts., Utyonkov V.K., Lobanov Yu.V. et al.* Attempt to produce element 120 in the  $^{244}\text{Pu}+^{58}\text{Fe}$  reaction // *Phys. Rev. C.* 2009. V. 79. P. 024603.
27. *Borschevsky A., Pershina V., Eliav E., Kaldor U.* *Ab initio* predictions of atomic properties of element 120 and its lighter group-2 homologues // *Phys. Rev. A.* 2013. V. 87. P. 022502.
28. *Gulbekian G.G., Dmitriev S.N., Itkis M.G. et al.* Start-Up of the DC-280 Cyclotron, the Basic Facility of the Factory of Superheavy Elements of the Laboratory of Nuclear Reactions at the Joint Institute for Nuclear Research // *Physics of Particles and Nuclei Letters.* 2019. V. 16(6). P. 866–875.