

УДК 535.338

СВЕРХТЯЖЕЛЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

А.С. Яценко

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
Новосибирск, Россия*

В статье представлены основные этапы развития учений об элементах с большим зарядом ядра и их место в периодической таблице.

Ключевые слова: Периодическая таблица элементов, атом, тяжелые элементы.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-25-30

Тяжелое есть составленное
из множества легких частей.

Платон А.

Мы живем в постоянном поиске ответов на сложные вопросы. Одним из таких вопросов является следующий: какой самый тяжелый элемент существует в природе? Взгляд на таблицу Менделеева не дает однозначного ответа, так как последние элементы – искусственные. Многие исследователи пытались найти новые элементы в глубине Земли, на поверхности Луны или в космических лучах и телах. Однако их поиски не увенчались успехом.

В VII–V веках до н. э. жители древности определяли и характеризовали первоматерии. Атомистическое учение об элементах было принято в VI–IV веках до н. э. В V–III веках до н. э. существовало правило «семь металлов древности» – золото, серебро, ртуть, медь, олово, свинец, железо. С годами число найденных элементов увеличивалось [1, 2]. В 1815 г. англичанин У. Проут доказал первичность водорода, а остальные элементы по массе кратны ему. В 1817 г. немецкий химик Л. Гмелин предложил понятие «тяжелые элементы» по массе тяжелее атома железа. Критериями этого положения были:

- относительная атомная масса > 50 г/см³;
- плотность, равная или больше плотности железа (≥ 8 г/см³);
- пороговая плотность 5 г/см³.

Исследователи того времени активно обсуждали это понятие. Наконец, состоявшийся в 1860 г. I Международный съезд химиков, подтвердил это понятие.

Дальнейшее развитие понятия атома проходило в следующем порядке. В 1869 г. Д. Менделеев [3] представил таблицу для 66 элементов, выявив периодичность в строении атомов. Позднее Дж. Томсон (1897) открыл в атоме электрон, а Э. Резерфорд (1911) – ядро. Оба они разработали свои модели атомов. Однако открытые в 1860 г. оптические спектры элементов не описывались в обеих моделях. Решить эту задачу взялся Н. Бор с помощью теории квантов [4], начало которой положил в 1900 г. М. Планк [5]. Каждая спектральная линия соответствует осциллятору с частотой, который может поглотить (испустить) целое число электронов.

В 1939–1955 годах таблица элементов усилиями американских физиков пополнилась редкоземельными тяжелыми элементами. Руководители этих работ Г. Сиборг и Э. Мак-Миллан в 1951 г. получили Нобелевские премии.

Первые трансурановые элементы были синтезированы в начале 40-х гг. XX века в лаборатории Лоуренса (США).

С повышением заряда ядра строение атома усложняется. Порядок заполнения таблицы с большим зарядом ядра впервые представил в 1955 г. американский физик Г. Сиборг [5] с помощью таблиц элементов Д. Менделеева и Ю. Томсена в виде лестницы для распределения электронных оболочек (рис. 1).

* Лантаниды
 ** Актиниды
 *** Суперактиниды

Рис. 1 – Удобная форма Периодической системы, указывающая предсказываемое положение новых элементов

Fig. 1 – A convenient form of the Periodic table, indicating the predicted position of new elements

В настоящее время в природе найдено 94 элемента. Остальные получены искусственно. Позднее аналогично элементы с $Z = 104$ и выше стали называть сверхтяжелыми. Основным критерий поиска таких элементов – масса ядра.

Со дня открытия Периодического закона прошло 150 лет, но до сих пор появляются попытки уточнить или усовершенствовать ее. Многообразие вариантов вызвано стремлением разных авторов найти удовлетворительное решение некоторых спорных моментов в самой структуре Периодической таблицы химических элементов, существующих до сих пор. За последние 60 лет специалисты в области химии и физики разработали и выполнили эксперименты со сверхтяжелыми элементами $Z = 104$ –118, заполняющими VII период в таблице. Все ядра этих элементов получены в сложных ядерных реакциях и экспериментальных условиях [6–12]. Мишень – долгоживущий изотоп основного элемента, бомбардировка – ускоренным пучком стабильных изотопов высокой интенсивности. Частичные данные о сверхтяжелых атомах сведены в табл. 1, 2 из работ [7–12]. Получены скудные, но очень ценные результаты.

Эти элементы получены в известных лабораториях мира – Беркли, Ливермор (США), Дубна (Москва), Дармштадт (Германия). У каждой лаборатории – свой подход к их изучению. Все элементы утверждены Международными союзами физиков (IUPAP), председатель Н. Тарасова, и химиков (IUPAC), председатель Б. Маккелара.

Таблица 1 / Table 1

Частичные данные по сверхтяжелым элементам
Partial data on superheavy elements

Название	Символ	Z	Конфи- гурация	Терм	Реакция	Место	Год
Резерфордий	Rf	104	$5f^{14}6d^27s^2$		Pu + Ne	Беркли	1969
Дубний	Db	105	$5f^{14}6d^37s^2$		Am + Ne	Дубна Беркли	1976 1976
Сиборгий	Sg	106	$5f^{14}6d^47s^2$	$^5D_{0-4}$	Cf + O	Беркли	1974
Борий	Bh	107	$5f^{14}6d^57s^2$	$^6S_{5/2}$	Bi + Cr Bk + Ne	Дубна Дармштадт	1976 1981
Хассий	Hs	108	$5f^{14}6d^67s^2$	$^5D_{4-0}$	Pb + Fe	Дармштадт	1984
Мейтнерий	Mt	109	$5f^{14}6d^77s^2$	$^4F_{9/2-3/2}$	Bi + Fe	Дармштадт	1982
Дармштадий	Ds	110	$5f^{14}6d^87s^2$		Pb + Ni	Дармштадт	1994
Рентгений	Rg	111	$5f^{14}6d^97s^2$		Bi + Ni	Дармштадт	1996
Коперниций	Cn	112	$5f^{14}6d^{10}7s^2$		Pb + Zn	Дубна Дармштадт	2000 2000
Нихоний	Nh	113	$6d^{10}7p^1s^2$		Np + Ca	Дубна	2004
Флеровий	Fl	114	$6d^{10}7p^27s^2$		Pu + Ca	Дубна	2004
Московский	Mc	115	$6d^{10}7p^37s^2$		Am + Ca	Дубна	2003
Ливерморий	Lv	116	$6d^{10}7p^47s^2$		Cu + Ca	Дубна	2000
Теннессин	Tc	117	$6d^{10}7p^57s^2$	$^3P_{2-0}$	Bk + Ca	Дубна Ливермор	2000 2000
Оганессон	Og	118	$6d^{10}7p^67s^2$		Cf + Ca	Дубна	2006

Таблица 2 / Table 2

Частичные энергетические уровни новых элементов
Partial energy levels of new elements

Элемент	Конфигурация	Терм	E, см ⁻¹
Sg	$6d^4 7s^2$ $6d^3 7s^2 7p$	$^5D_{0-4}$ $^5I^0$	0, 4834, 7614, 9607, 103635 14717, 17043, 20628, 24138, 26271
Bh	$6d^5 7s^2$ $6d^4 7s^2 7p$	$^6S_{5/2}$ $^4P_{3/2-1/2}$ $^4G_{7/2-1/2}$ $^6S^0$ $^6D^0$	0 13062, 15659 13828, 14981, 16447 12792 17781, 19485, 22930, 25171, 26587
Hs	$6d^6 7s^2$ $6d^5 7s^2 7p$	$^5D_{4-0}$ $^5I^0$	0, 2102, 7400, 8270, 9285 13093, 15600, 29444
Mt	$6d^7 7s^2$ $6d^6 7s^2 7p$	$^4F_{9/2-3/2}$ $^6I^0$	0, 5047, 7996, 12628 21879, 24388, 24524, 25990

В ближайшее время эти союзы утвердят еще два элемента 119 и 120, которые откроют VIII период. Получение атомов новых элементов является весьма сложным, так как наблюдаются они очень редко – от единичных в минуту (Rf) до единичных в неделю (Og).

Крайне малое время жизни – микросекунды. Издавна было принято включать в названия вновь открытых элементов наименования стран, городов и авторов открытий. Например, 118 элемент назван оганессоном в честь сотрудника ОИЯИ г. Дубна.

Атомные ядра этих элементов расположены в центре атомов и несут всю долю массы атома. В ряду этих элементов атомная масса лежит в области 267–294 а.е

Ядерная физика медленно и настойчиво двигает границы существования материи все дальше и дальше [12]. Успех в дальнейшем зависит от развития чувствительного приборостроения. В настоящее время самым сверхтяжелым элементом на Земле считается 118 элемент. Однако Вселенная состоит из многих элементов, которые в настоящее время не доступны. Успех в дальнейшем зависит от появления разработок приборов для защиты сверхтяжелых элементов. Теоретические расчеты предполагают существование более 287 новых элементов. Для их обнаружения нужны более точные экспериментальные методы и установки.

Пока открытым остается вопрос о размещении этих элементов в Периодической таблице. Предварительно они представлены в середине таблицы (рис. 2). Системный порядок элементов Периодической таблицы предполагает, что элементы с $Z = 104 - 112$ равномерно распределены. Элементы с $Z = 113 - 118$ – главная группа с элементами s- и p-оболочками. Однако окончательно скорее всего они войдут в третью строку под таблицей после строк с редкоземельными и трансурановыми элементами. Открытым остается вопрос: куда войдут остальные элементы?

72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

Рис. 2 – Место сверхтяжелых элементов в Периодической таблице

Fig. 2 – The place of superheavy elements in the Periodic table

Данная работа предназначена как методическое пособие широкому кругу читателей – студентам, аспирантам и научным инженерам, занимающимся вопросами атомной спектроскопии, физики плазмы и астрофизики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эрдеи-Груз Т. Основы строения материи: пер. с нем. – М.: Мир, 1976. – 486 с.
2. Диоген Лаэртский. О жизни, учениях и изречениях знаменитых философов. – М.: Мысль, 1979. – 620 с.
3. Менделеев Д.И. Сочинения. В 25 т. Т. 2. – М.: Химтеориздат, 1934. – 519 с.
4. Бор Н. Три статьи о спектрах и строении атома. – М.: Госиздат; Петроград: Мосполиграф, 1923. – 156 с.
5. Сиборг Г. Расширение пределов периодической системы // Сто лет Периодического закона химических элементов (1869–1969): докл. на пленар. заседаниях / X Юбилейный Менделеевский съезд. – М.: Наука, 1971. – С. 21–39.
6. Oganessian Yu. Super heavy elements: on the 150th anniversary of the discovery of the periodic table of elements // Nuclear Physics News. – 2019. – Vol. 29 (1). – P. 5–10. – DOI: 10.1080/10619127.2019.1571799.

7. **Dzuba V.** Ionization potentials and polarizabilities of superheavy elements from Db to Cn ($Z = 105\text{--}112$) // *Physical Review A*. – 2016. – Vol. 93 (3). – P. 032519. – DOI: 10.1103/PhysRevA.93.032519.
8. **Martin W.C., Sugar J.** Designations of $ds2p$ energy levels in neutral zirconium, hafnium, and rutherfordium ($Z=104$) // *Physical Review A*. – 1996. – Vol. 53 (3). – P. 1911–1914. – DOI: 10.1103/PhysRevA.53.1911.
9. **Першина В.** Электронная структура и химические свойства сверхтяжелых элементов // *Успехи химии*. – 2009. – Т. 78, № 12. – С. 1243–1262.
10. The excitation energies, ionization potentials and oscillator strengths of neutral and ionized species of Uub ($Z = 112$) and the homologue elements Zn, Cd and Hg / Y.J. Yu, J.G. Li, C.Z. Dong, X.B. Ding, S. Fritzsche, B. Fricke // *European Physical Journal D*. – 2007. – Vol. 44 (1). – P. 51–56. – DOI: 10.1140/epjd/e2007-00172-y.
11. Ionization potentials and radii of neutral and ionized species of elements 107 (bohrium) and 108 (hassium) from extended multiconfiguration Dirac-Fock calculations / E. Johnson, B. Fricke, T. Jacob, C.Z. Dong, S. Fritzsche, V. Pershina // *Journal of Chemical Physics*. – 2002. – Vol. 116(5). – P. 1862–1868. – DOI: 10.1063/1.1430256.
12. **Eichler R.** The periodic table of elements: superheavy in chemistry // *Nuclear Physics News*. – 2019. – Vol. 29 (1). – P. 11–15.

SUPERHEAVY ELEMENTS

Yatsenko A.S.

Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, Russia

The article presents the main stages in the development of the doctrine of elements with a large nuclear charge and their place in the periodic table.

Key words: Periodic table of elements, atom, heavy elements.

DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-25-30

REFERENCES

1. Erdey-Grúz T. *Osnovy stroeniya materii* [Fundamentals of the structure of matter]. Moscow, Mir Publ., 1976. 486 p. (In Russian).
2. Diogenes Laertes. *O zhizni, ucheniyakh i izrecheniyakh znamenitykh filosofov* [About the life, teachings and sayings of famous philosophers]. Moscow, Mysl' Publ., 1979. 620 p. (In Russian).
3. Mendeleev D.I. *Sochineniya*. V 25 t. T. 2 [Works. In 25 vols. Vol. 2]. Moscow, Khimteorizdat Publ., 1934. 519 p.
4. Bohr N. *Tri stat'i o spektrakh i stroenii atoma* [Three articles on the spectra and structure of the atom]. Moscow, Gosizdat Publ., Petrograd, Mospoligraf Publ., 1923. 156 p. (In Russian).
5. Seaborg G. [Expansion of the limits of the periodic system]. *Sto let Periodicheskogo zakona khimicheskikh elementov (1869–1969)* [One hundred years of the periodic law of chemical elements (1869–1969)]. X Anniversary Mendeleev Congress. Moscow, Nauka Publ., 1971, pp. 21–39. (In Russian).
6. Oganessian Yu. Super heavy elements: on the 150th anniversary of the discovery of the periodic table of elements. *Nuclear Physics News*, 2019, vol. 29 (1), pp. 5–10. DOI: 10.1080/10619127.2019.1571799.
7. Dzuba V. Ionization potentials and polarizabilities of superheavy elements from Db to Cn ($Z = 105\text{--}112$). *Physical Review A*, 2016, vol. 93 (3), p. 032519. DOI: 10.1103/PhysRevA.93.032519.
8. Martin W.C., Sugar J. Designations of $ds2p$ energy levels in neutral zirconium, hafnium, and rutherfordium ($Z=104$). *Physical Review A*, 1996, vol. 53 (3), pp. 1911–1914. DOI: 10.1103/PhysRevA.53.1911.

9. Pershina V. Elektronnaya struktura i khimicheskie svoistva sverkhlyazhelykh elementov [Electronic structure and chemical properties of superheavy elements]. *Uspekhi khimii* = *Russian Chemical Reviews*, 2009, vol. 78, no. 12, pp. 1243–1262. (In Russian).
10. Yu Y., Li J.G., Dong C.Z., Ding X.B., Fritzsche S., Fricke B. The excitation energies, ionization potentials and oscillator strengths of neutral and ionized species of Uub ($Z = 112$) and the homologue elements Zn, Cd and Hg. *European Physical Journal D*, 2007, vol. 44 (1), pp. 51–56. DOI: 10.1140/epjd/e2007-00172-y.
11. Johnson E., Fricke B., Jacob T., Dong C.Z., Fritzsche S., Pershina V. Ionization potentials and radii of neutral and ionized species of elements 107 (bohrium) and 108 (hassium) from extended multiconfiguration Dirac-Fock calculations. *Journal of Chemical Physics*, 2002, vol. 116 (5), pp. 1862–1868. – DOI: 10.1063/1.1430256.
12. Eichler R. The periodic table of elements: superheavy in chemistry. *Nuclear Physics News*, 2019, vol. 29 (1), pp. 11–15.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Яценко Алексей Степанович – родился в 1941 году, канд. техн. наук, ведущий инженер, институт автоматики и электрометрии СО РАН. Область научных интересов: спектроскопия атомов и ионов. Опубликовано 40 работ. (Адрес: 630058, Россия, Новосибирск, ул. Добровольческая, д. 2).

Yatsenko Aleksey Stepanovich (b. 1941) – PhD (Eng.), leading engineer, Institute of Automation and Electrometry SB RAS (Address: 2, Dobrovoltcheskaya St., Novosibirsk, 630058, Russia).

Статья поступила 27 июня 2022
Received June 27, 2022

To Reference:

Yatsenko A.S. Sverkhlyazhelye elementy [Superheavy elements]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii* = *Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2022, no. 3 (56), pp. 25–30. DOI: 10.17212/1727-2769-2022-3-25-30.