

元素周期表的创立及其三次重要拓展

——纪念门捷列夫周期表发表 150 周年

蔡善钰[†]

(中国原子能科学研究院同位素研究所 北京 102413)

2019-09-24 收到

[†] email: caishanyu2010@163.com

DOI: 10.7693/wl20191001

The creation and three important expansions of periodic table of elements

——commemorating the 150th anniversary of Mendeleev's periodic table

CAI Shan-Yu[†]

(Isotope Department, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

摘要 今年是门捷列夫周期表发表 150 周年。文章简要回顾了“元素周期律”发现和“元素周期表”创立这一历史事件。着重阐述了元素周期表的三次重要拓展：“天然放射性元素”的发现；“人工放射性元素”（人造元素）的合成和“超重元素”的合成。现今周期表中元素总量已从 63 种增加到 118 种。文章最后还探讨了“超重核稳定岛”的预言和元素周期表的边界。

关键词 元素周期表, 天然放射性元素, 人造元素, 超重元素, 超重核稳定岛

Abstract This year marks the 150th anniversary of the first publication of the periodic table of elements by Mendeleev. Here, the historical events about the discovery of the "Periodic Law" and the creation of "Periodic Table of Elements" are briefly reviewed. Three important expansions of the periodic table are specifically described: the discovery of "Natural Occurring Radioactive Elements", the synthesis of "Man-Made Elements", and the synthesis of "Superheavy Elements". The current periodic table has 118 confirmed elements in which only contained 63 elements in 1869. Furthermore, the prediction of the "Island of Stability" for superheavy elements and the edge of the periodic table are discussed.

Keywords periodic table of elements, natural occurring radioactive elements, man-made elements, superheavy elements, island of stability for superheavy elements

元素周期律是宇宙最基本的规律之一。元素周期律的发现已成为科学发展史上的一座重要里程碑。门捷列夫创立的元素周期表至今几乎挂在了世界上每间化学实验室或报告厅的墙上。恩格斯曾经对元素周期律作出如下评价：“门捷列夫不自觉地应用黑格尔的量转化为质的规律，完成

了科学上的一个勋业。”

150 年来，元素周期表仍然保持着最广泛、最持久、最深入的影响。它是现代科学中最富成果的思想之一。在历史的长河中，它并没有被现代物理学所淘汰或彻底改变，而是逐渐适应和更加成熟。

Reihe	Gruppe I. R ⁰	Gruppe II. —	Gruppe III. R ⁰ ^a	Gruppe IV. RH ^a R ⁰ ^a	Gruppe V. RH ^a R ⁰ ^a	Gruppe VI. RH ^a R ⁰ ^a	Gruppe VII. RH ^a R ⁰ ^a	Gruppe VIII. — R ⁰ ^a
1	H=1							
2	Li=7	Be=9,4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27,3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35,5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=86	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ba=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108.
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	— — — —
9	(—)	—	—	—	—	—	—	— — — —
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	— — — —
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	— — — —

图1 1869年门捷列夫创立的元素周期表

型——螺旋图。他在圆柱面上按原子量大小沿着与轴线方向呈45度角的螺旋形曲线上配置元素。1865年英国化学家纽莱兹(A. R. Newlands)又提出了“八音律”。他按原子量递增程序将已知元素作了类似的部分二维排列。发现从任意一种元素算起,每数到第8种元素时,就会出现性质与第1种元素相似的情况,犹如八度音阶那样。

1 元素周期表的创立——“元素周期律”的发现

千变万化、千姿百态的物质使世界变得琳琅满目、绚丽多彩。世上万物究竟由什么组成?这个问题从远古时代起使人们感到困惑。随着生产的发展,社会的进步,元素陆续被发现,如18世纪初,已知晓14种元素;18世纪末,识别出33种元素;到19世纪中叶鉴定了60种元素。人们这时才逐渐地认识到:尽管大千世界纷繁无比,却由为数不多的化学元素结合而成。

1.1 元素分类的早期探索

元素的质量不尽相同,性质各有差异,它们的存在和变化是杂乱无章的?还是有序可循的?一些科学家开始着手进行元素的整理和分类研究。1789年法国化学家拉瓦锡(A. Lavoisier)列出了一张当时已知的33种元素的图表,开创了元素分类的先河。这样的图表属于“一维”表示法。

1817年德国化学家多勃雷纳(J. Dobereiner)根据相似性把许多已知元素排成“三素组”。他注意到中间元素的性质介于第一个元素和第三个元素之间;并证明中间元素的原子量接近于第一个成员和第三个成员的原子量的平均数。类似情况一共找到了五组。1862年法国地质学家夏库特瓦(de Chancourtois)制作了元素组织体系的早期模

1.2 元素周期律的伟大发现

俄罗斯化学家门捷列夫在前人探索的基础上,根据自己积累的实践经验,对已有大量实验数据进行了分析、鉴别、归纳、综合,把当时已发现的63种元素按一定次序排列成一张图表时,偶然发现了一条重要的规律:元素按原子质量由小到大排列时,其物理性质和化学性质呈现出周期性的变化。换言之,元素的性质是其原子质量的周期函数。门捷列夫把这一规律称作“元素周期律”,并于1869年2月7日正式公布了这张图表,即为流传至今并得到不断充实、更加完善、继续拓展的“化学元素周期表”(图1)。该表揭示了元素之间的内在联系,构筑了元素自然分类的完整体系。

1.3 对未知元素的正确预言

当初,在这张周期表中留下了一些空位。门捷列夫以周期律为依据,预言了21号(类硼)、31号(类铝)和32号(类硅)元素的物理和化学性质。不久,它们先后被找到,并分别命名为Sc(钪),Ga(镓)和Ge(锗),令人信服地证实了周期律的正确性。因此迅速被化学家所接受。

1.4 周期律经受住严峻挑战

1894—1898年间惰性气体 Ar, Kr, Ne, Xe

被接连发现。1900年又从放射性矿物中鉴别出镭射气——Rn，使元素周期律理论受到了严峻的挑战。因为周期表上找不到他们的位置。门捷列夫以其睿智，巧妙地提出在周期表里可以开辟一条“走廊”（引进一个附加的纵列），增添一个“零族”，从而进一步改善了周期表，也构成了一次新的认识飞跃，使周期律理论得到了巩固。在周期律的指导和启迪下寻找新元素的工作克服了盲目性，增加了自觉性。

这里需要提一下，元素周期律的发现是19世纪科学家取得的重大突破。之后，原子模型的建立和量子理论的解释才深刻揭示了元素周期律的本质：元素性质的周期性取决于核外电子层结构的周期性，即与最外层电子的排布密切相关。

2 元素周期表的第一次拓展——“天然放射性元素”的发现

2.1 铀和钍的放射性发现

铀和钍分别于1789年和1828年在自然界矿物中发现。门捷列夫把他们排列在周期表最下和最后的位置，铀是原子量最重的一个元素。1895年伦琴发现X射线后，紧接着，贝克勒尔(H. A. Becquerel)在1896年发现铀及其化合物能使包裹在黑纸里的照相底片感光；还能将周围空气电离使验电器放电。这种神秘的永不消失的“铀射线”引起年轻女学者玛丽·居里(M. Curie)的浓厚兴趣，她发现钍及其化合物也能发出这种看不见的射线，并把这种现象正确命名为“放射性”（该词来源拉丁文radius，意为光线）。把具有放射特征的元素称为“放射性元素”。

2.2 新元素钋和镭的发现

强烈的好奇心驱使玛丽·居里继续检查了很多含铀和含钍的矿物，结果观察到一个惊人的事实：沥青铀矿、铜铀云母的放射性要比矿物中铀和钍含量所预计的强得多，于是果断地假定：这类矿物中一定含有放射性更强的物质，一种未知

的新元素！

这一重要的判断促使皮埃尔·居里(P. Curie)放下手头的晶体研究，与他的妻子共同从事分离新元素的工作。他们把组成沥青铀矿的各种元素按照化学组分逐一分开，然后用测量放射性的方法进行跟踪。经过几次淘汰后，搜索范围逐步缩小。发现这种“反常的放射性”主要浓集在两种组分里。一个在铋组分里，化学性质与铋十分相似，1898年7月居里夫妇定名为“钋”。另一个在钡组分里，化学性质与钡十分相似，1898年12月定名为“镭”。

宣布钋和镭的发现仅仅是初步的，因为当时科学家们难以设想仅有放射性而肉眼却看不到的物质实体。为了进一步确证，必须把新元素分离出来。开始他们曾乐观地估计，这两种放射性元素在沥青铀矿里的含量不超过百分之一（实际上还不到百万分之一），可以想象要把这样微量的物质分离出来，需要付出多么艰巨的劳动！经过无数次研磨、溶解、过滤、结晶等繁杂的提取手段，他们处理了2吨多沥青铀矿残渣，日以继夜地工作了整整4年，至1902年才制得0.1 g纯镭（氯化镭）。通过对镭的相对原子质量测定和发射光谱测量，得到了被分离出来的新元素的确凿证据（对浓聚钋作了同样努力，由于钋的半衰期仅为138.4天，衰变很快，积累量更少），镭和钋的存在终于被人们承认了。

居里夫妇因研究天然放射性现象作出了杰出贡献，与发现放射性的贝克勒尔共享1903年诺贝尔物理学家；又由于分离镭的成功，居里夫人再获1911年诺贝尔化学奖。

2.3 其他天然放射性元素的发现

1899年德比尔纳(A. L. Debierne)从铀矿石中提取出“钷”。前已提及，在1900年从放射性矿物中鉴别出镭射气——氡。1917年哈恩(O. Hahn)和梅特纳(L. Meitner)也从铀矿石残渣中提取出“镤”。1939年彼丽(M. M. Perey)和1940年科尔森(D. R. Corson)等先后发现了“钷”和“碲”。这样，总计发现了9种天然放射元素(84—92号)，使

周期表进一步得到充实, 更使周期表添彩增辉。

后来又发现在自然界中存在3大天然放射系: 钍系($4n$ 系), 铀系($4n+2$ 系)和锕系($4n+3$ 系), 起始的母体核素分别是 ^{232}Th , ^{238}U 和 ^{235}U , 具有足够长的半衰期(大于地球的年龄 4.5×10^9 年), 因而在自然界中能找到它们多代子体核素的踪迹。上述3种核素均以生成稳定的铅同位数 ^{208}Pb , ^{206}Pb 和 ^{207}Pb 而告终。

2.4 放射性发现的重大意义

“放射性”和“放射性元素”的发现震撼了当时的科学界, 引起了人类对宇宙认识和知识更新的一场伟大变革。众多化学家和物理学家透过放射性辐射这一信息, 开始向原子核内部的微观世界探索, 他们利用钋和镭的辐射, 展开了广泛的实验, 取得了一系列激动人心的重大发现: 1919年卢瑟福(E. Rutherford)利用钋源的 α 粒子轰击氮 $^{14}\text{N}(\alpha, \text{p})^{17}\text{O}$, 发现了质子, 第一次实现了人工核转变; 1932年查特威克(J. Chadwick)利用钋源的 α 粒子轰击铍靶 $^9\text{Be}(\alpha, \text{n})^{12}\text{C}$, 发现了中子; 1934年约里奥·居里夫妇(J. Curie & I. Curie)利用钋源的 α 粒子轰击铝箔 $^{27}\text{Al}(\alpha, \text{n})^{30}\text{P}$, 首先发现了人工放射性; 1938年哈恩(O. Hahn)和斯特拉斯曼(F. Strassmann)使用 $^{222}\text{Rn}-\text{Be}$ 中子源照射铀获得了钡、镧和铯等周期表里的中间元素。梅特纳(L. Meitner)和她的外甥弗里希(O. R. Frisch)对实验结果作出了正确解释, 提出了铀核发生“裂变”的概念。紧接着“链式反应”的实现, 终于打开了人类利用原子能的宝库。

3 元素周期表的第二次拓展——“人工放射性元素”的合成

“人工放射性元素”为早期称呼, 后简称“合成元素”, 俗称“人造元素”。

3.1 铀前人造元素的发现

到1925年时, 元素周期表还留下四个空位:

43号(Tc)、61号(Pm)、85号(At)和87号(Fr)。它们一度被认为是自然界中的“失踪元素”。1932年回旋加速器的发明和1942年原子反应堆的建成, 开辟了人工合成元素的新时代。Tc(锝)是第一个被发现的在自然界不存在的人造元素, 是佩里埃(C. Perrier)和塞格雷(E. Segre)在1937年利用氘核轰击钼靶获得的。At(砹)是科尔森(D. R. Corson)、麦肯齐(K. R. MacKenzie)等于1940年在加速器上用30 MeV的氦离子轰击铋靶产生的, 后来发现在3种天然放射系中都有其同位素存在。Pm(钷)是1945年由马林斯基(J. A. Marinsky)等人在实施美国二次世界大战的“钚计划”时, 在铀的裂变产物中发现的。Fr(钫)则是长期被忽略的天然锕系家属中的一个成员。这样铀前人造元素实际上只有锝和钷。

3.2 超铀元素镎和钚的发现

第一个超铀元素——93号是在进行核裂变过程研究的部分实验时发现的。1940年伯克利的麦克米伦(E. McMillan)在回旋加速器上试图对中子诱发铀裂变产生的两个反冲碎片的能量进行测量, 发现半衰期为2.3天具有 β 放射性的核素 ^{239}U , 其子体可能是93号元素的同位素(^{239}Np)。随后阿伯尔森(P. H. Abelson)用化学手段经过分离和鉴定得到了确证。1940年12月, 西博格(G. T. Seaborg)、肯尼迪(J. W. Kennedy)和华尔(A. C. Wahl)继续麦克米伦的工作, 试图合成94号元素。他们用氘核轰击铀(^{238}U)和随后产生的衰变获得了质量数为238的94号元素(^{238}Pu)。因为92号元素(U)已用天王星命名, 故93号元素(Np)和94号元素(Pu)分别用天王星外的海王星和冥王星命名是完全顺理成章的。

3.3 西博格提出的“锕系概念”

按照周期表排列, 已知的4种天然放射性元素: Ac, Th, Pa, U依次排列在第七周期的IIIB, IVB, VB, VIB族(B指副族)位置上。新合成93号Np和94号Pu十分自然地应依次排列在

VIIB族, VIIIB族的下面。然而, 示踪量的化学试验表明, Np的化学性质根本不像Re, Pu也根本不像Os, 而更像U。

1944年西博格总结了合成超铀元素过程中所经历的失败与成功两方面经验, 提出了著名的“锕系概念”(actinide concept)。认为可能是这些元素在周期表中发生了错位。并正确地断言: 天然存在的重天然放射性元素和人工合成的超铀元素构成了一个新的内过渡系(5f系), 称作“锕系”, 它们类似于稀土系列的“镧系”(4f系)。这个重稀土系应退回到钷开始, 也应该有14种元素, 并以锕作为原型(早先提出以U作为原型)。并在“镧系”下面增设了“锕系”。按照新概念设计的实验, 顺利合成了95号Am, 96号Cm, 化学性质分别相似于Eu, Gd, 将它们依顺序安排在随后位置上十分合适; 1961年103号元素镅的顺利合成, 对锕系的寻找终于画上了圆满的句号。

104号元素和105号元素的化学性质研究表明, 104号类似于IVB族元素(Zr, Hf), 105号类似于VB元素族(Ta, Nb), 不属于锕系元素。表明103号镅确实是锕系的最后一个成员, 从而最后肯定了“锕系概念”(后来称为“锕系理论”)。

3.4 西博格修订的周期表

1945年12月西博格在美国《化学工程新闻》上发表了修订的元素周期表, 将93号镅和94号钷列入了与镧系相似的第二系列——锕系中(图2)。锕系理论的最大贡献是完善并发展了现代元素周期表体系, 具有重大的前沿研究价值。不仅为新元素合成指明了正确方向, 且成功导致了后续锕系元素及锕系后元素合成的接连发现和正确鉴定。

由于西博格在超铀元素领域的杰出贡献, 他和麦克米伦(钷的发现者)分享了1951年诺贝尔化学奖。后来吉奥索等人发现的106号元素被IUPAC冠以西博格的名字, 称为“seaborgium”, 化学符号为Sg(𨭆)。

3.5 多种形式元素周期表

自1869年首张元素周期表问世以来, 使该表发生较大变化的是西博格及其同事发现了一连串超铀元素, 开辟了锕系, 并重排了周期表。之后涌现出上百张不同形式、不同特点、不同用途的元素周期表。早期使用“短式”较多, 后来“长式”变得普遍, 还有诸如竖式、塔式、圆形、环形、扇形、螺旋形、弹簧形、量子形式和三维(立体)周期表也纷至踏来。为了设计一幅完美的、理想的元素周期表, 至今不少学者还在不断思索、推陈出新。

4 元素周期表的第三次拓展——“锕系后元素”(超重元素)的合成

4.1 “锕系后元素”合成的瓶颈

一般认为, $Z < 2$ 的原子核称“轻核”, $Z > 80$ 的原子核称“重核”, $Z > 104$ 的原子核称“超重核”。在合成“超镅元素”或称“锕系后元素”时遇到了瓶颈, 因为在高通量反应堆中照射钷(采用 ^{239}Pu 靶)经中子级联俘获生成的新元素只能到100号(镆), 其后元素 β 衰变不再发生; 另外, 要合成 $Z > 102$ 号元素也不能指望利用轻粒子引起的核反应, 因为目前不能生产可称量的 $Z > 100$ 号元素, 仅能生产到99号元素(制成 ^{254}Es 靶)。

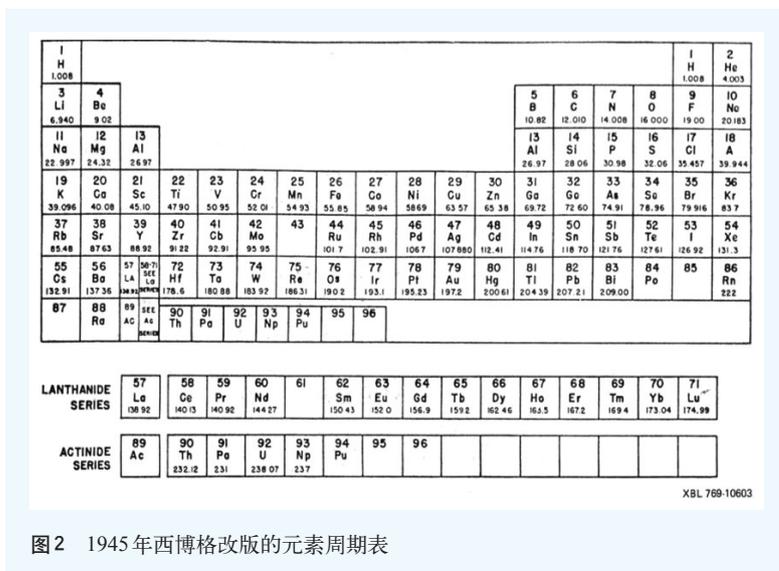


图2 1945年西博格改版的元素周期表

新世纪元素周期表

周期	族 IA																	VIII A						
1	1 H 1s ¹																	2 He 1s ²						
2	3 Li 2s ¹	4 Be 2s ²																	5 B 2s ² 2p ¹	6 C 2s ² 2p ²	7 N 2s ² 2p ³	8 O 2s ² 2p ⁴	9 F 2s ² 2p ⁵	10 Ne 2s ² 2p ⁶
3	11 Na 3s ¹	12 Mg 3s ²																	13 Al 3s ² 3p ¹	14 Si 3s ² 3p ²	15 P 3s ² 3p ³	16 S 3s ² 3p ⁴	17 Cl 3s ² 3p ⁵	18 Ar 3s ² 3p ⁶
4	19 K 4s ¹	20 Ca 4s ²	21 Sc 3d ¹ 4s ²	22 Ti 3d ² 4s ²	23 V 3d ³ 4s ²	24 Cr 3d ⁴ 4s ²	25 Mn 3d ⁵ 4s ²	26 Fe 3d ⁶ 4s ²	27 Co 3d ⁷ 4s ²	28 Ni 3d ⁸ 4s ²	29 Cu 3d ¹⁰ 4s ¹	30 Zn 3d ¹⁰ 4s ²	31 Ga 4s ² 4p ¹	32 Ge 4s ² 4p ²	33 As 4s ² 4p ³	34 Se 4s ² 4p ⁴	35 Br 4s ² 4p ⁵	36 Kr 4s ² 4p ⁶						
5	37 Rb 5s ¹	38 Sr 5s ²	39 Y 4d ¹ 5s ²	40 Zr 4d ² 5s ²	41 Nb 4d ⁴ 5s ¹	42 Mo 4d ⁵ 5s ¹	43 Tc 4d ⁵ 5s ²	44 Ru 4d ⁷ 5s ¹	45 Rh 4d ⁸ 5s ¹	46 Pd 4d ¹⁰	47 Ag 4d ¹⁰ 5s ¹	48 Cd 4d ¹⁰ 5s ²	49 In 5s ² 5p ¹	50 Sn 5s ² 5p ²	51 Sb 5s ² 5p ³	52 Te 5s ² 5p ⁴	53 I 5s ² 5p ⁵	54 Xe 5s ² 5p ⁶						
6	55 Cs 6s ¹	56 Ba 6s ²	57 La *	58 Ce 5d ¹ 6s ²	59 Pr 5d ¹ 6s ²	60 Nd 5d ² 6s ²	61 Pm 5d ⁴ 6s ²	62 Sm 5d ⁶ 6s ²	63 Eu 5d ⁶ 6s ²	64 Gd 5d ⁷ 6s ²	65 Tb 5d ⁹ 6s ²	66 Dy 5d ⁹ 6s ²	67 Ho 5d ¹⁰ 6s ²	68 Er 5d ¹⁰ 6s ²	69 Tm 5d ¹⁰ 6s ²	70 Yb 5d ¹⁰ 6s ²	71 Lu 5d ¹⁰ 6s ²							
7	87 Fr 7s ¹	88 Ra 7s ²	89 Ac **	90 Th 6d ² 7s ²	91 Pa 6d ³ 7s ²	92 U 6d ³ 7s ²	93 Np 6d ⁴ 7s ²	94 Pu 6d ⁶ 7s ²	95 Am 6d ⁷ 7s ²	96 Cm 6d ⁷ 7s ²	97 Bk 6d ⁷ 7s ²	98 Cf 6d ⁸ 7s ²	99 Es 7s ² 7p ¹	100 Fm 7s ² 7p ²	101 Md 7s ² 7p ³	102 No 7s ² 7p ⁴	103 Lr 7s ² 7p ⁵							
8	119 Uue	120 Ubn	121 Ubu	122 Ubb	123 Ubt	124 Ubq	125 Ubp	126 Ubh	127 Ubs	128 Ubo	129 Ube	130 Ubo	131 Ubo	132 Ubo	133 Ubo	134 Ubo	135 Ubo							

(蔡善钰设计 钟占强制作 陈英黔校订)

图3 作者设计的新世纪元素周期表

为了合成 $Z>102$ 元素，科学家们意识到必须使用较重的轰击粒子，以实现周期表上未知元素合成的“跳跃”。为此，1957年美国劳伦斯—伯克利国家实验室(LBNL)建立了重离子直线加速器(HILAC)。苏联杜布纳(Dubna)联合核子研究所(JINR)于1964年建成专用回旋加速器。德国在达姆施塔特(Darmstadt)现名为亥姆霍兹的重离子研究中心(GSI)，于1969年也建成重离子反应产物分离器(SHIP)。日本理化所(RIKEN)在2000年前后建成了直线加速器。中国科学院近代物理研究所的兰州重离子加速器(HIRFL)在1988年建成并出束。

4.2 “热熔合”合成104—106号元素

热熔合方法是用较轻的重离子作弹核(^{12}C —

^{22}Ne)，与钢系元素作靶核，生成复合核，由于激发能较高($\sim 50\text{ MeV}$)，蒸发 $4n$ (n 表示中子)以上才退激发。

从1950年代到1970年代，钢系后元素的合成研究是由伯克利的吉奥索(A. Ghiorso)小组和杜布纳联合核子研究所的弗廖洛夫(G. N. Flerov)小组竞相进行的。采用热熔合方法，合成了104—106号元素。其中104号元素Rf(钚)和106号元素Sg(镆)吉奥索小组持有发明权；105号元素Db(铷)的发明权由上述两个小组分享。

4.3 “冷熔合”合成107—113号元素

冷熔合(cold fusion)是用较重的重离子作弹核(^{54}Cr , ^{59}Fe 等)与 ^{208}Pb , ^{209}Bi 作靶核生成复合核，

由于激发能较低(20 MeV以下), 蒸发 $1n-2n$, 旋即退激发。

冷熔合原理是1974年奥格涅斯扬(Yuri. Oganessian)提出的, 由于冷熔合时激发能较低, 可减少来自裂变的竞争, 对预期生成的重元素能产生较高生成截面, 从而开辟了一条合成重元素的新路子。107—113号元素的成功合成是“冷熔合”的应用范例。其中6种元素(107—112号)由德国GSI小组合成。113号元素则由日本理化所森田浩介(Kosuke Morita)等(中国科学家也参与了相关工作)用“冷熔合”方法于2004年、2005年和2012年3次合成, 且 α 衰变链均终止于已知核素, 因而获得了命名权。

4.4 “热熔合”合成114—118号元素

20世纪90年代末, 由于重离子加速器的升级, 物理分离技术的创新, 射线探测技术的进步, 在实验室内合成超重元素的条件更加成熟。自1999年至2010年又采用“热熔合”方法, 用 ^{48}Ca 弹核轰击不同的锕系靶核: ^{244}Pu , ^{243}Am , ^{248}Cm , ^{249}Cf , ^{249}Bk , 合成了114—118号元素。这样, 周期表中第七周期留下的空位终于被全部填满。其中115号元素由Dubna奥格涅斯扬小组单独发现。114, 116, 117和118号元素则由Dubna和LLNL(美国劳伦斯—利弗莫尔国家实验室)合作发现。

关于114号和116号元素的命名, 2012年IUPAC已宣布分别定名为Fl(钅)和Lv(钅)。2016年11月30日IUPAC又核准并发布4种最新人造元素(113, 115, 117和118)的英文名称和元素符号。紧接着, 全国科学技术名词审定委员会在向社会各界广泛征集的基础上, 召开了新元素中文命名的专家讨论会, 于2017年5月宣布定名为Nh(钅)、Mc(钅)、Ts(钅)和Og(钅)。

5 “超重元素稳定岛”的预言及元素周期表的边界

5.1 “超重元素稳定岛”的预言

1965年迈耶(W. D. Myers)等人预言在重元素

铀以外有一个“超重元素岛”(Island of Super-heavy Elements)。随后斯特拉蒂斯基(V. M. Strutinsky)等人基于新发展的核结构理论和液滴模型的壳层修正, 于1966年进一步揭示在114号元素附近有一个核稳定岛。

由宏观—微观模型预言, 在114个质子和184个中子附近存在一个超重元素稳定岛。按照平均场理论预言, 在120个质子和172个中子或126个质子和184个中子附近存在超重元素稳定岛。目前理论上尽管尚未确定稳定岛的区域, 但都预言存在着超重元素稳定岛, 这就意味着可能存在一个寿命比较长的超重原子核的区域。

从以往合成的超重元素来看, 所合成的超重核距离稳定岛的中心还相差7个中子。然而从近年合成的超重核116—118来看, 随着核内中子数增加, 半衰期在增大, 这些迹象表明可能存在超重岛。虽然从目前来看, 用现有熔合反应进入超重岛中心是有困难的, 需要探寻新的途径。

5.2 关于元素周期表边界

新合成的超重元素半衰期大多比较短, 在秒级, 甚至毫秒或微秒级, 而且量又少, 合成超重元素的重要意义又何在呢? 科学家们认为可以探索原子核存在的极限, 以最终确定元素周期表的边界; 也是对“核的壳层模型”理论的再次检验。因此, 超重元素的合成实验和理论研究已成为当今核物理和核化学的前沿领域和研究热点。

关于元素周期表的边界, 根据量子电动力学, 如果用点电荷($r=0$)来推测, 最重核元素的原子序数 Z 是137; 如果按电子有限大小($r \sim A^{1/3}$)来推测, 最重核的 Z 是172。超过该数后, 由于核电荷达到足够强大, 将会出现最内层的K层电子被原子核俘获, 引起整个电子层结构的崩溃, 这样具有更高 Z 的原子就不复存在。

然而高 Z 元素能否存在的极限不仅取决于核外电子层的稳定性, 还要取决于原子核本身的稳定性。根据德国法兰克福理论组的预言, 认为目前论述的质子数为114、中子数为184的双满壳的下一个双满壳可能是质子数为164、中子数为318。

这些事实表明, 周期表的边界还有待进一步探究。

6 结语

自150年前门捷列夫初创元素周期表时排列63种自然元素, 至30年后天然放射性元素的发现(历经40年)和人造元素的合成(跨越80年), 将早期周期表的边界从92号元素推进到118号。其中人造元素总计为28种(含280多种放射性同位素和34种同质异能素), 包括铀前元素2种, 超铀元素26种, 占元素总量的24%。

参考文献

- [1] Ghiorso A, Seaborg G T. A Half Century of Synthetic Elements, Proceeding of the Discovery of Elements Symposium. Belgium, Sept. 17—20, 1996
- [2] Hoffman D C, Ghiorso A. Seaborg G T. The Transuranium People. London: Imperial College Press, 2000
- [3] 蔡善钰. 同位素, 2008, 21(4): 241
- [4] 蔡善钰 著, 王方定、张焕乔、赵葵 主审. 人造元素. 上海科学普及出版社, 2006
- [5] 朱裕贞、顾达、黑恩成 编著. 现代基础化学(第三版). 化学工业出版社, 2017
- [6] Nature, 2019, 565: 535. DOI: 10.1038/d41586-019-00281-z
- [7] Szuromi P. Science, 2019, 363: 464. DOI: 10.1126/science.aaw6790
- [8] Oganessian Y. Discovery of the Island of Stability for SHE. The Eighth IPAC, May 19, 2017, Denmark

门捷列夫的元素周期律和西博格的钢系理论, 不仅为我们开辟了合成钢系及钢系后元素的道路, 而且正指引我们跨越“不稳定海峡”, 登上超重元素稳定岛。近年来一批超重核的合成更增添了科学家的信心, 可以确信: 一幅更加充实、更为壮观的未来元素周期表将呈现于本世纪(图3)! 蕴藏着巨大能量的超重核的陆续发现, 必将给人类带来更大惊喜!

致谢 承蒙张焕乔院士在百忙中审阅本文并提出了宝贵的修改建议, 特此深表谢忱。



Advanced Research Systems 低温超导设备制造专家
1.5K-800K全程低温超导解决方案

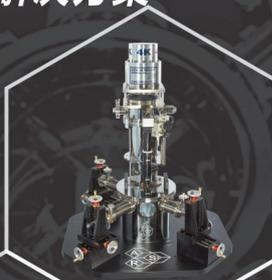
低温探针台

ARS生产的低温探针台, 是理想的低温测试平台。它提供稳定的变温环境(4K-800K), 可在不破坏材料或器件的情况下进行可重复的电学, 微波, 光电, 磁电, 磁光等测试。

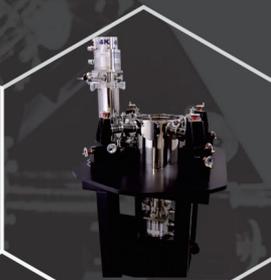
ARS可提供低温超导磁体探针台、低温电磁体探针台、低温超稳结构探针台、低温闭循环探针台及液氮/液氮探针台等多种探针台以满足客户不同应用需求。

ARS探针台根据客户需要装配直流探针臂、微波探针臂、光纤探针臂。并可选配超高真空结构, 真空度优于 10^{-9} Pa, 以及快速换样结构。

ARS可接受各种不同结构探针台定制。



超稳结构探针台



超导磁体探针台



低温闭循环探针台



电磁体探针台



DOWELLLAB
扫一扫关注官方微信
了解更多产品信息

天津多为莱博科技有限公司是ARS产品在我国的独家代理
网址: www.dowelllab.com 邮箱: sales@dowelllab.com
销售及服务热线: 022-26802283