

译文

周期表——通向人造元素的崎岖道路*

G. T. 西博格**

原编者按 本文是伯克利加州大学的 G. T. 西博格教授根据普利斯特利奖受奖演说而写的, 演说是四月二日在檀香山美国化学会/日本化学会联合召开的化学大会上发表的。西博格是1951年诺贝尔化学奖得奖人(与 E. M. McMillan 一起)和1976年美国化学会主席, 为表彰他在化学方面的卓著贡献, 授与他代表美国化学会最高奖励的这种奖章。

化学元素周期表, 作为一个指导性原理, 从差不多正好在110年以前形成以来, 一直是发现很多元素的关键。有时, 误用它也曾使研究者在发现新元素的错误道路上暂时徘徊; 然而, 即使这些崎岖的道路, 也最后引导到正确的方向。我将叙述的是, 周期表在发现人造元素, 特别是超铀元素方面已经起的和将可能起的作用。

自然, 这一故事是从1869年3月6日开始的。当时德米特里·依万诺维奇·门捷列夫(D. I. Mendeleev)及其同事尼古拉·门舒特金(N. Menshutkin)在圣彼得堡(现在的列宁格勒)俄国化学学会发表了一篇论文, 他们将化学元素按其原子量顺序排列时, 则显示出元素化学性质的周期性。这事本身并不新颖。因为其它国家有几个化学家也已观察到当时已知元素的某些规律性。其中最突出的是德国人 Johan W. Dobereiner 的‘三素族’(1829), 法国人 A. E. Béguyer de Chancourtois 的‘碲螺旋’ telluric screw(1862)和英国人 John A. R. Newlands 的‘八音律’(1864)。

不大为人所知道的是, 十九世纪一些美国的化学家也提出了关于元素周期分类的各种形式, 其中1845年有 Oliver W. Gibbs 和1854年有 Josiah P. Cooke Jr.。然而, 对于大家公认的门捷列夫是周期表创始人唯一能提出真正挑战的是德国人 Lothar Meyer 的工作, 他在1870年独立地得到了几乎与门捷列夫相同的通则。

普遍接受门捷列夫优先的理由是很简单的: 他不仅指出了当时已知元素的性质有周期性, 他还有勇气和想像力表明他的分类方法构成了自然界的一个基本定律, 而且在他的周期表中还存留的一些缺陷也是由于测量原子量的较大误差, 或者简单地是由于某些元素尚未被发现所致。诚然, 这以后几年, 在门捷列夫关于空缺元素的预见被实验证实之前, 对于他首

* 译自 Chem. Eng. News, 57(16), 46(1979)。

** Dr. Glenn T. Seaborg, 伯克利加州大学。

先发现周期系的声明是没有完全被接受的。

1871年，门捷列夫发表了周期表（见附表），并包括了对1869年最初版的改进，预测了原子量分别为44、68和72元素的存在和性质。这三个元素分别对应于我们现在所知的铕、镓和锗。这三个元素是1875年到1886年这段期间在自然界中发现的。在随后的若干年内对门捷列夫“定律”又给出了很多其它实验证据。

1871年门捷列夫的周期表，预见了三个当时未知的元素

	第 I 族	第 II 族	第 III 族	第 IV 族	第 V 族	第 VI 族	第 VII 族	第 VIII 族 过渡至第 I 族
	H = 1							
典型元素	Li = 7	Be = 9.4	B = 11	C = 12	N = 14	O = 16	F = 19	
第一周期	第一列 Na = 23	Mg = 24	Al = 27.3	Si = 28	P = 31	S = 32	Cl = 35.5	
	第二列 K = 39	Ca = 40	- = 44	Ti = 50?	V = 51	Cr = 52	Mn = 55	Fe = 56, Co = 59, Ni = 59, Cu = 63
第二周期	第三列 (Cu = 63)	Zn = 65	- = 68	- = 72	As = 75	Se = 78	Br = 80	
	第四列 Rb = 85	Sr = 87	(?Yt=88?)	Zr = 90	Nb = 94	Mo = 96	- = 100	Ru=104, Rh=104, Pd = 104, Ag=108
第三周期	第五列 (Ag = 108)	Cd = 112	In = 113	Sn = 118	Sb = 122	Te = 128?	J = 127	
	第六列 Cs = 133	Ba = 137	- = 137	Ce = 138?	—	—	—	—
第四周期	第七列 —	—	—	—	—	—	—	—
	第八列 —	—	—	—	Ta = 182	W = 184	—	Os=199?, Ir=198? Pt=197?, Au=197
第五周期	第九列 (Au = 197)	Hg = 200	Tl = 204	Pb = 207	Bi = 208	—	—	—
	第十列 —	—	—	Th = 232	—	U = 240	—	—
高价成盐氧化物	R ₂ O	R ₂ O ₂ 或 RO	R ₂ O ₃	R ₂ O ₄ 或 RO ₂	R ₂ O ₅	R ₂ O ₆ 或 RO ₃	R ₂ O ₇	R ₂ O ₈ 或 RO ₄
高价氢化物			(RH ₃ ?)	RH ₄	RH ₃	RH ₂	RH	—

随着时间的推移，由于元素性质及其原子结构和核结构知识的迅速增长，对周期表已作调整。此外，在十九世纪末和二十世纪初新发现的元素要求门捷列夫周期表作某些改动。最重要的变化有，另加了一竖行(或族)，即现在称之为惰性气体的元素，以及一系列元素——稀土或镧系元素——取代了单个元素的位置(放在钡和铪之间)。

在二十世纪第一个十年末，总元素数已增加到85个，并且在这之后很快建立了原子序数的概念，这是周期表中元素排列顺序的依据。之后二十五年，又发现了三个新元素，使得在铀(92号元素，最重的元素)以前只剩下原子序数为43、61、85和87号的四个空缺元素了。之后，这些周期表中的空位被下面一些元素名称填上了：43号元素 masurium，61号元素 illinium，85号元素 alabamine 和87号元素 virginium。可是，这些“发现”是错误的。由二十世纪三十年代对原子核的认识水平就能指出，这些空缺元素都是放射性的，半衰期很短，在地球上不可能以可观的浓度存在。

由第二次世界大战以前所见的周期表可见，当时科学家们开始试图制备铀以后的元素，还包括43号元素锝(Tc)、61号元素钷(Pm)、85号元素砹(At)和87号元素钫(Fr)，虽然实际上它们是后来才命名的，并且某些元素还是后来才第一次合成或发现的。

关于最重的一些元素在周期表中位置曾有多次变化，最后才公认因电子在内壳层(5f)添加而产生的另一系列元素一定存在于重元素区的某处。这一新的元素族将类似于14个成员的稀土或镧系元素(化学上与镧类似的元素)，后者是因为添加4f内层电子的结果。

然而直到第二次世界大战时，仍相信三个最重的元素(钷、镱、铀)是分别和铈、钽和钨相关的。因此，预期下面一个元素(93号元素)化学性质会类似于铯。类似地，第94到100号元素会一个个按次序排到周期表中。

第一个试图制备铀后元素的是 Enrico Fermi, Emilio G. Segré 及其合作者，1934年他们在意大利利用中子轰击铀。他们实际上发现了一些有趣的放射性产物。这些中子轰击铀得到的放射性产物是随后几年 Otto Hahn, Lise Meitner 和 Fritz S. Strassmann 在德国和很多其它科学家进行化学研究的对象。根据不完全的痕量研究，部分这些放射性物质似乎具有类似于预期原子序数可能是94或96的‘超铀元素’的性质——类似于可能是钷和钼的元素性质，后者在当时的周期表中是直接排在94和96号元素的上方的。

随后的工作，特别是1938年末 Hahn 和 Strassmann 及其合作者发现了核裂变，指出上面的解释是不正确的。随后的工作表明这些中子轰击铀的产物实际上是较轻元素的放射性同位素，即是钡、镧、碘、碲或铯等裂变产物元素。

1940年在伯克利加州大学，Edwin M. McMillan 和 Philip H. Abelson 合成和鉴定(也就是发现)了原子序数高于92的一个元素镎。过后不久，1940年末，在伯克利加州大学 McMillan, Joseph W. Kennedy, Arthur C. Wahl 和我发现了钷。用镎(原子序数93号)和钷(原子序数94号)进行的痕量化学试验表明它们的化学性质与铀很相似，而与铯和钷毫不相像；第二次世界大战以前的周期表使 Fermi 和 Hahn 及其同事走错了路，但是最后的结果却是核裂变这个不朽的发现。

在这之后几年内，曾考虑铀、镎和钷是周期表内的一类‘兄弟’，但是还没有明确肯定它们是一‘族’的关系。曾考虑95号和96号元素的化学性质应当与它们更相似，于是就设想这些元素和下面的元素形成一个‘铀系’组(uranide)元素(化学上与铀相似)。

因而1944年的周期表意味着95号和96号元素的化学性质应当与镎和钷很相似。这些假设被证明是错误的，以此为据而设计的发现95号和96号元素的实验失败了。尚未发现的95号和96号元素显然又一次拒绝了1944年周期表为它们安排的位置。

于是，在1944年，我产生了这样的想法，或许所有比镧重的已知元素在周期表中的位置都放错了。这一新的理论是，比镧重的这些元素可能组成一个类似于‘稀土’或‘镧系’元素的第二系列。镧系相互间在化学上是很相似的，通常是在周期表主表下面单列一行。这意味着所有这些较重的元素真正在镧之后——在周期表中直接在镧之后——就像已知的‘镧系元素’随镧而在钡和铈之间那样。

于是，修订过的周期表将最重的元素作为第二‘稀土’系列出。在1945年12月10日出版的‘化学工程新闻’上的周期表里^[1]，这些最重的元素(包括尚未发现的元素)以‘镧系’元素的名称与已知的镧系稀土系相伴而列。

这一新概念意味着，95号和96号元素某些性质应与镧相同，某些性质与它们的稀土‘姐妹’钷和钷相同，特别是在难氧化到Ⅲ价以上的价态这一点上。按这一新概念设计了实验，95号和96号元素很快就在战时的芝加哥大学冶金实验室发现了——它们被合成和化学上鉴定出来了。

纯属偶然，95号和96号元素的发现是1945年11月11日在一次全国性的无线电广播节目

周期表过去四十年的演变

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	(43)	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57-71 La-Lu	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)	86 Rn
(87)	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	(93)	(94)	(95)	(96)	(97)	(98)	(99)	(100)				

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	(61)	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
----------	----------	----------	----------	------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

↑第二次世界大战前的周期表，错误地预计了超铀元素的位置

1944年，已将两个新超铀元素放到“锕系元素”组中→

注：在每张周期表中，当时尚未发现元素的原子序数放在括号中。

55 Cs	56 Ba	57-71 La-Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92-106 U-(106)				

92 U	93 Np	94 Pu	(95)	(96)	(106)
---------	----------	----------	------	------	-------

↓1945年的周期表，修订了锕系重元素的位置

1 H 1.008																	2 He 4.003	
3 Li 6.940	4 Be 9.02											5 B 10.82	6 C 12.010	7 N 14.008	8 O 16.000	9 F 19.00	10 Ne 20.183	
11 Na 22.997	12 Mg 24.32	13 Al 26.97											13 Al 26.97	14 Si 28.06	15 P 30.98	16 S 32.06	17 Cl 35.453	18 Ar 39.944
19 K 39.096	20 Ca 40.08	21 Sc 45.10	22 Ti 47.90	23 V 50.95	24 Cr 52.01	25 Mn 54.93	26 Fe 55.85	27 Co 58.94	28 Ni 58.69	29 Cu 63.57	30 Zn 65.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.60	33 As 74.01	34 Se 78.96	35 Br 79.916	36 Kr 83.7	
37 Rb 85.48	38 Sr 87.63	39 Y 88.92	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.95	43 Tc	44 Ru 101.7	45 Rh 102.91	46 Pd 106.7	47 Ag 107.868	48 Cd 112.41	49 In 114.70	50 Sn 118.70	51 Sb 121.76	52 Te 127.61	53 I 126.92	54 Xe 131.3	
55 Cs 132.91	56 Ba 137.36	57-71 La-Lu	72 Hf 178.6	73 Ta 180.88	74 W 183.84	75 Re 186.21	76 Os 190.2	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 197.0	80 Hg 200.59	81 Tl 204.39	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po	85 At	86 Rn 222	
87	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95	96									

锕系元素	57 La 138.92	58 Ce 140.13	59 Pr 140.92	60 Nd 144.27	61	62 Sm 150.43	63 Eu 152.0	64 Gd 156.9	65 Tb 159.2	66 Dy 162.46	67 Ho 163.5	68 Er 167.2	69 Tm 169.4	70 Yb 173.04	71 Lu 174.99
------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	----	--------------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------

钍系元素	89 Ac	90 Th 232.12	91 Pa 231	92 U 238.07	93 Np 237	94 Pu	95	96							
------	----------	--------------------	-----------------	-------------------	-----------------	----------	----	----	--	--	--	--	--	--	--

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	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
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Ha	106	(107)	(108)	(109)	(110)	(111)	(112)	(113)	(114)	(115)	(116)	(117)	(118)

镧系元素

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

锕系元素

90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

↑ 现代周期表, 填充到第 118 号元素

↓ 未来设想的周期表, 扩充至第 168 号元素

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	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
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Ha	106	(107)	(108)	(109)	(110)	(111)	(112)	(113)	(114)	(115)	(116)	(117)	(118)
			(119)	(120)	(121)	(122)	(123)	(124)	(125)	(126)	(127)	(128)	(129)	(130)	(131)	(132)	(133)

镧系元素

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

锕系元素

90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

超锕系元素

(122)	(123)	(124)	(125)	(126)	(127)	(128)	(129)	(130)	(131)	(132)	(133)
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------



1945年一次无线电广播节目中，Glenn T. Seaborg 透露了95号和96号元素的发现。图为Seaborg 与参加电台答问的孩子Sheila Conlan (中) 和 Robert Burke (右) 的合影。

中，与孩子们在电台上答问时非正式透露的，我在节目中是宾客（见所附照片）。接着的一个星期五，关于这一发现的情报得到解密，并可以在西北大学召开的美国化学会会议上报告了。与我一起参加电台答问节目的有 Sheila Conlan 和 Patrick Conlan, Robert Burke, Harvey Fishman 和 Richard Williams。当 Richard 问我在战时研究超铀元素的过程中是否发现了什么新元素时，我透露了95号和96号元素的发现。显然第二天在美国有很多孩子把这件事告诉了他们的老师，但是我从收到的这些年轻人的部分来信中判断，这件事他们没有都能成功地使他们的老师相信。

这一新概念的理解不但导致发现镅和锔（95和96号元素），也导致1949和1950年合成和鉴定镎和钷（97和98号元素），1952和1953年发现镱和镱（99和100号元素），1955年发现钷（101号元素），1958年发现镱（102号元素）。1961年发现了103号元素镱之后，标志锕系元素达到了它的末端。

由于锕以后到103号镱的所有元素都属于锕系，这样，元素钷、镱和铀就从第二次世界大战前的周期表上它们原占有的位置移开而放在这个过渡家族之中。104号、105号和106号元素取代了早先由钷、镱和铀占有的位置。

Rutherfordium(104)、hahnium(105)和106号元素（至今未定名）是在十三年以后为 Albert Ghiorso 及其同事在伯克利合成与鉴定的（现在看来清楚的是，苏联杜布纳研究所 G. N. Flerov 及其同事有关上述元素发现权的主张并没有得到证明）。我们可以深信不疑地将直至118号这些尚未发现的元素放在周期表中预期的位置上。

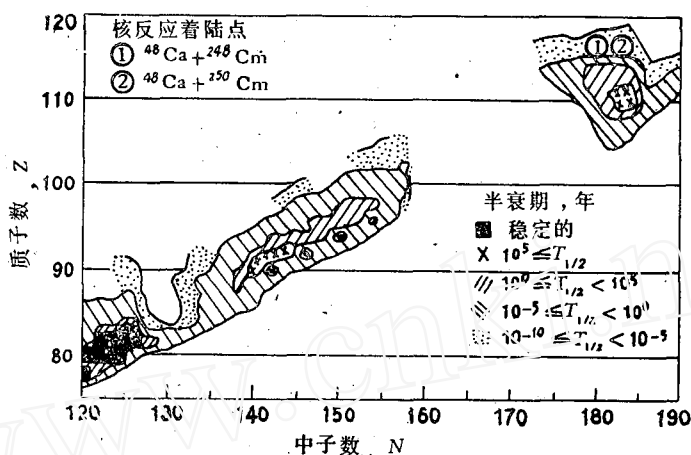
周期表中锕系以后的元素可称为‘锕系后元素’(transactinides)。这些元素从原子序数为104号的元素开始，并且原则上讲，其延续是无限的。尽管目前肯定地被发现的只有三个这样的元素——104号、105号和106号，但这却提供了发现一大批元素的某些前景。106号以后的元素将被合成与鉴定，或者更高原子序数的元素也将被合成。它们可由重离子轰击重核而合成。前面几个锕系后元素得到它们在现代周期表主表上的位置。

研究了104号元素的化学性质可以确信，正如周期表中其位置所要求的那样，它确和钷类似^[21]。对105号元素没有进行什么权威性的化学研究工作，对106号元素也没开展化学研究。这些研究之所以非常困难是因为104号元素的最长寿命同位素(²⁶¹104)的半衰期仅约1分钟，相应于105号元素的²⁶²105半衰期约40秒，相应于106号元素的²⁶³106半衰期约为1秒。

基于这些最简单的推测，可以预期106号以后那些元素的半衰期将变得更短并且随着原子序数的增加而愈来愈短，这甚至对于每种元素半衰期最长的同位素也同样正确。如果此降

低率顺着原子序数不断增大的方向外推，我们可以预料 110 号元素寿命最长的同位素其半衰期为 10^{-10} 秒数量级，115 号元素的则为 10^{-20} 秒等等，而且从 106 号元素开始自发裂变占主导地位了。预言表明，产生新核的反应其产额随着 106 号元素以后原子序数的递增而急剧下降，这就使得情况变坏。实测的 106 号元素的产额降低到每小时一个原子的水平。

这些见解曾给合成更重的超铀元素带来多少有些阴暗的前景，但是近年来，另外的一些因素也在起作用。这些因素使下述远景更为乐观：即合成和鉴定或者甚至在自然界发现那些远超出周期表上限以外的元素（称之为‘超重’元素）。1972 年 S. G. Thompson 和 C. F. Tsang^[3] 曾写了一篇极好的关于超重元素的评论文章。



重元素的拓扑图(等高线地图)，表示出已知元素的稳定性半岛以及在 $Z=114$ 和 $N=184$ 附近预计的稳定岛，其周围是不稳定的或自发裂变海洋。熔合反应 $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$ 和 $^{48}\text{Ca} + ^{250}\text{Cm}$ 是可能达到稳定岛的二种可能途径。

基于有关满壳层(幻数)和它的核稳定性的见解，复杂的理论计算将外推值引到远超铀的区域。这些计算提出了对自发裂变有很大阻力的 $Z=114$ 和 $N=184$ 的闭合核子壳层的存在，而自发裂变的衰变是造成最重元素不稳定的主要原因。早期的看法曾建议有一个同已知 $N=126$ 壳层类似的 $Z=126$ 的闭合壳层，有些计算则提出 $N=228$ 时的闭合壳层。虽然 $Z=164$ 和 $N=318$ 可以代表更多的假想的稳定性点，但是，其所相应的点外推得太远，所以从它出发的任何预测就更为不可靠。

使得现实的合成和鉴定超重核的前景更有希望的一个事实是，计算表明双幻数核 $^{298}114$ 不是唯一的长寿命的核素，而是在‘自发裂变的海洋’中一个更大的‘稳定岛’的中心。

更近一些的计算中曾提出 $Z=114$ 时的壳效应不很大。尽管这样的计算肯定 $N=184$ 这个闭合壳层的存在，它推论对 $N < 184$ 区域来说其稳定性更小。从而稳定岛在 $N < 184$ 区域有一个急剧下降至“不稳定海洋”中的陡坡——一个相似于 Yosemite 国立公园的半圆丘结构，而不像在旧金山湾地区的我喜爱的 Diablo 山那样较为平缓的山坡。

如果后来的考虑是正确的话，则合成与探测超重元素将变得更为困难，并且在年龄大大超过 10^5 年的地球上的物质和任何实物当中去找到超重元素将成为不可能。一篇近期的评论文章^[4] 叙述了包括近来的见解在内的关于超重元素的现状。

现代的高速计算机已使作为化学性质基础的电子结构的计算成为可能^[5]。计算表明，104号到112号元素的形成是由于逐渐充填 6d 电子亚壳层，正如所料，这就造成同铅(72)到汞(80)在化学性质上的相似性。113号到118号元素是逐渐充填 7p 亚壳层的结果，并可

预料它们与铊(81)到氡(86)这些元素相似。由此可见,上述计算是和现代的周期表相一致的。

计算指出,在119号和120号元素处,8s亚壳层将被填满,这样就相应地使一个成为碱金属,另一个成为碱土金属。其次,计算表明,在121号元素处添加了一个7d电子以后,就逐渐充填5g内壳层和6f亚壳层,总共有32个位置,这就是我命名为“超铀系”(superactinide)的那些元素,并于153号元素结束。接下去就是逐渐充填7d亚壳层(154号到162号元素)和8p亚壳层(163号到168号元素)。

实际上,更为仔细的计算已表明情况并非如此简单。计算表明,除如上面讨论以外的其它电子(8p和7d)早在121号元素处(或者甚至在104号元素处)就发生作用,这样使得情况进一步复杂化。由自旋-轨道分裂引起的这种和那种的紊乱现象导致所预言的化学性质不是逐个元素地与用现代或未来周期表所建议的化学性质相一致了。这里,当不正确地使用周期表时,对于有关未发现元素的化学性质,我们又一次有作出错误预言的危险^[5]。

例如,由于相对论效应,6个7p电子被预言要分成两个亚壳层——4个 $7p_{3/2}$ 电子和2个 $7p_{1/2}$ 电子,并具有能量的分别:已充满的 $7p_{1/2}$ 轨道其作用如闭合壳层,附加的 $7p_{3/2}$ 电子其作用如闭合壳层以外的电子。这样,115号元素(类铋)被预计有在 $7p_{1/2}$ 、 $7p_{3/2}$ 这样排列下的价电子,与同系物铋的稳定的Ⅲ价氧化态不同,具有必然的稳定的Ⅰ价氧化态。另外有人预言,由于相对论效应的结果,112号元素(类汞)和114号元素(类铅)将是非常惰性的液体或易挥发的气体。这些见解提高了“在试管中研究相对论”的信心。在超铀系以外,有一个运在可预期核的稳定性区域(这是仅有的可能去合成或寻找超重元素的区域)以外的区域,这些见解变为尤其有重要意义了。

初步的考虑表明,可以相当近似地预言稳定岛上的元素具有如下的化学性质。114号元素将是一个铅的同系物,即类铅,112号元素将是类汞,110号元素将是类铂,以此类推。如果126号元素处为一个稳定岛,则这个超铀系元素及其邻近的元素的化学性质同铀系和镭系元素相似。

用范围很宽的重离子轰击范围很宽的重核的办法试图去合成和鉴定超重元素至今还是不成功的^[4]。同样地,与114号元素为中心的稳定性岛有联系的,每个直接的或间接的在自然界中寻找超重元素踪迹的尝试都得到否定的结果,或者还不能做出明确的回答。

大量的尝试^[4]是通过重离子(原子序数 Z_1)和重靶核(原子序数 Z_2)的融合而产生复合超重核(原子序数 Z_1+Z_2)的方式来合成和探测超重元素。核融合时必需具有伴随高核裂变势垒的相对强的核壳层,其所以必需如此是由于两方面的理由:使得在核融合反应中生成的激态超重核避免由于去激过程中裂变造成的破坏,使得去激时保留下来的任何“冷”的超重核的寿命要长到可以探测其 α 粒子或者自发裂变的衰变的程度。

去激过程中,为了使复合核逃脱裂变引起破坏的几率最高,这些核产生时应具有可能最低的激发能。换句话说,合成时要求入射重粒子的轰击能量稍稍超过库仑位垒。遗憾的是,为了使两个参与核融合生成一个复合体系明显需要更多的能量。

这样,我们似乎进入了进退维谷的境地。如果轰击能量低,反应的核不能融合;如果轰击能量高得足以产生融合反应,则产生的核又不能保留下来。 Z 大于25的入射粒子不管具有什么样的轰击能量,看来不能和非常重的靶核融合形成一个复合体系,这就进一步加重了这种状况。

生成复合核 $^{206}116$ 的 $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm}$ 反应被广泛研究是因为具备若干有利的因素:入射的

^{48}Ca 足够轻, 估计能发生一些融合反应, 它的双壳层闭合 (高结合能) 降低了产物的激发能, 并且它的相对中子过剩使其接近于 $N=184$ 的闭合壳层 (这是必须取得的最好结果, 但遗憾的是, 即是在这条件下也不能完全达到)。很遗憾, 迄今这些试验也全给出了否定的结果。一个增大在融合反应中生成的超重核幸存几率的可能性便是使用富中子的靶, 如 ^{250}Cm 。中子愈富, 它就愈接近于期望的 $N=184$ 。遗憾的是, ^{250}Cm 能得到的量是很有限的, 并且要想满足一次实验的量, 要对过去或未来的地下核武器试验的熔渣进行极其昂贵的回收才能得到。

至今尚未广泛研究的合成和鉴定超重元素的另一种可能性^[4], 便是应用“深度非弹性转移”反应, 这里大量的能量和核子在入射粒子和靶之间进行转移。这种方案的成功显然依赖于应用最重的可以得到入射粒子和靶。在西德 Darmstadt 的重离子研究所 (GSL), 已经用铀离子作为入射粒子, 完成了 $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ 反应的实验。那里观察到了相当于净转移 8 个质子和 9 个中子的, 如 ^{255}Fm 那样重的产物。尽管距离到达稳定岛还有一段漫长的路, 有希望的是, 预期的裂变位垒将提高这个区域的产额。沿着应用如 ^{248}Cm (靶) + ^{244}Pu (入射粒子), 甚至 ^{249}Cf 或 ^{254}Es (靶可利用量只是很少的) + ^{244}Pu 反应这条路造下去, 有可能取得肯定的结果。

继续努力的方向是采用高强度重离子束流, 改进探测方法以及更加强调对短寿命的探测 (1 秒直到 10^{-9} 秒或者更短)。

如果我们强烈地意识到稳定岛的存在而又不能设法去达到它, 那将令人沮丧。化学家应该迎接挑战, 再一次考验周期表在预言新的化学元素化学性质方面的作用。他们希望再一次沿着通向人造元素的崎岖道路走下去。

参 考 文 献

- [1] G. T. Seaborg, Chem. Eng. News, **23**, 2190 (1945).
- [2] R. Silva et al., Inorg. Nucl. Chem. Lett., **6**(12), 871(1970).
- [3] S. G. Thompson & C. F. Tsang, Science, **178**, 1047(1972).
- [4] G. T. Seaborg et al., Science, **203**, 711(1979).
- [5] O. L. Keller Jr. & G. T. Seaborg, Ann. Rev. Nucl. Sci., 139(1977).

建议补充阅读文献

J. W. Van Spronsen, The Periodic System of Chemical Elements: A History of the First Hundred Years, Elsevier Publishing Co., Amsterdam, London, New York, 1969.

G. T. Seaborg, The Transuranium Elements, Yale University Press, 1958.

G. T. Seaborg, Transuranium Elements: Products of Modern Alchemy, Dowden, Hutchinson & Ross Inc., Stroudsburg, Pa., 1978. (Compilation of reprints of original papers.)

(徐鸿桂 祝 疆译)

编辑部按 关于 transactinides 和 superactinides 的译名, 还有下列主张: (1) 将 transactinides 译为“超锕系元素”, superactinides 译为“越锕系元素”或“第二锕系元素”; (2) 将 transactinides 译为“越锕系元素”, superactinides 译为“超锕系元素”; (3) 将二者皆译为“超锕系元素”。究竟如何翻译, 欢迎来信提出建议。