

超 铀 元 素

〔苏〕 B. И. 戈尔丹斯基 著
C. M. 波利卡诺夫



科 学 出 版 社

超 铀 元 素

[苏] B. И. 戈尔丹斯基 著
C. M. 波利卡诺夫
盛正直 译

科 学 出 版 社

1984

内 容 简 介

И. 戈尔丹斯基和 С. М. 波利卡诺夫合著的一本
或英文版曾先后多次修订，深受读者的欢迎。中
布雷德利所译的英文本翻译的，并补充了译者
元素的新材料。

了超铀元素及有关的科学知识。首先概述了核物
重介绍了各超铀元素的发现史，制取方法，性质
超铀元素在周期表中的位置，讨论了超重元素问
系元素的前景。

等以上文化水平的读者阅读。

Гольданский С. М. Поликанов

ТЯЖЕЛЕЕ УРАНА

Наука, Москва 1969

超 铀 元 素

[苏] В. И. 戈尔德斯基 著
С. М. 波利卡诺夫

盛正直 译

责任编辑 王玉生 姚平录

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1984 年 4 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1984 年 4 月第一次印刷 印张：6

印数 0001—2,850 字数：115,000

统一书号：13031·2502

本社书号：3435·13-3

定价：0.76 元

前 言

本书是戈尔丹斯基的《周期系中的新元素》(1953年、1956年和1964年先后出了三版)一书的修订本。按照现在的书名,我们删去了有关周期表中人造元素的全部内容,而对超铀元素的性质以及合成和检验方法作了改写和补充。

最近几年,人们对超铀元素的兴趣增加了,这在很大程度上是由于杜布纳联合核子研究所作出的引人注目的发现而引起的。合成了以库尔恰托夫命名的104号元素,并证明了该元素具有超铀系元素的性质。更准确地确定了102号元素的性质,因而产生了一个重新考虑其发现史的问题。还制取了其他超铀元素的一些新同位素,对杜布纳发现的效应,即激发态(同核异能态)的自发裂变也作了研究。所有这些,都是对周期表中最重元素研究工作作出的重大贡献。

在利用高通量反应堆和地下核爆炸制取新同位素的过程中,取得了某些意想不到的很有意义的观测结果。

很重超铀元素的理论预言产生了这类元素的最佳合成方案;有关合成114号元素(类铅)和甚至126号元素的个别同位素的文章已经出现。

最新的研究导致了能加速任何元素,甚至铀和超铀元素的加速器的设计,这种加速器可用来产生复杂核之间的任何

类型的反应。

所有这些,使得本书是非常适时的。

象原先的版本一样,本书主要对新元素的分离和检验方法作一般性的通俗描述,同时也为对新元素特别感兴趣的读者介绍一些比较详细的资料。

英文版前言

本书俄文版出版到现在,已近三年了,在这段时间内,出现了各种有关超铀元素最新研究结果的文章,其中最值得注意的是关于在杜布纳和贝克利合成 105 号元素的消息。另外还有关于 104 号元素(𨭎)和 103 号元素(𨭉)的最新资料。我们在裂变势垒的壳层效应方面的知识也扩展了。有希望发现相对稳定超重元素的预测,激励了在自然界探索这类元素的工作,促进了重离子加速技术的迅速发展。在今后几年内,我们可能会看到某些十分重要的发现。

新的研究结果在可靠性方面是不同的,因此某些关于超重元素性质的文章引起了热烈的争论,这是毫不奇怪的。但是其价值在于它们能推进这一课题的发展。

我们打算给最新的报道作全面的评述,而只是简要地补充一些段落,来反映我们认为是最重要的内容。

到目前为止,美国和苏联在超铀元素的合成、研究和应用方面作出了显著的贡献,因此我们特别高兴地看到,本书在我国出版以后现在又译成英文与美国读者见面了。

B. И. 戈尔丹斯基

C. M. 波利卡诺夫

目 录

引言	1
原子结构	4
原子的电子壳层和元素的化学性质	9
核结构	18
核模型	23
放射性衰变	34
放射系	47
核裂变	54
记录超铀元素同位素放射性衰变的方法	58
93 号元素——镎	63
94 号元素——钚	69
95 号元素——镅	81
96 号元素——钚	86
97 号元素——锔	89
98 号元素——锿	93
重离子加速器	100
记录超铀元素同位素放射性衰变的快速方法	106
99 号和 100 号元素——镱和镥	107
101 号元素——钿	112

102 号元素	114
103 号元素——铟	120
104 号元素——铪	123
105 号元素	127
超铀元素在周期系中的位置	127
超铀同位素的放射性和元素的极限	140
中子与超铀同位素的反应	159
合成超铀系元素同位素的前景	163
附录 106号 和 107 号元素	183

引 言

门捷列夫在 1869 年建立周期表的时候，只有 63 个元素是已知的，它们在周期表中排列的位置清楚地反映了它们的化学性质，但表中留下了空位，由尚未发现的元素充填。经过半个多世纪的探索，又发现了 25 个元素。

原子结构的研究终于发现了原子核，为物理学的一个新分支——核物理奠定了基础。核物理不仅揭示了周期表的基础，而且打开了通向元素人工嬗变的大门。

关于周期表的已知边界，即 1789 年发现的 92 号元素铀的后面，当然是有很多猜测的。经过将近三十年的顽强努力，终于制得了铀后面的 12 个新元素(超铀元素)，它们的化学性质和核性质是本书详细研究的对象。

从各种不同的观点来看，超铀核素的核性质都具有重要的意义。首先是裂变现象(一个核分裂成质量大致相等的两个碎片)，这是在铀和超铀元素中发现的一种性质。这种性质由于它的实际应用而引起了人们的极大注意。当然，它对于我们了解核结构也是很重要的。

超铀元素其他放射性衰变形式的发现展示了同样吸引人的前景。通过对放出的粒子能谱的精密测量，得到了很有价值的资料。超铀元素的这种资料可用来阐明它们的结构。例

如,重核呈旋转椭球的形状,它们构成一个形变核的区域(另一个这样的区域位于质量数 150 和 190^④之间)。

从化学的观点来看,超铀元素也是具有很大意义的,因为直到今天,周期系中包括这些元素的未完成的第七周期结构还不清楚。

第四和第五周期各包含 18 个元素(图 1),而第六周期有 32 个元素,这是因为镧(57 号元素,属第三族)和铪(72 号元素,属第四族)之间有 14 个与镧相似的稀土元素。在第七周期中,89 号元素锕是镧的类似物,锕后面是钍、镤和铀。这三个元素是开始一个象稀土那样的由 14 个元素组成的新系呢,还是它们与 Hf、Ta 和 W 相似,以致第七周期象第五周期那样只有 18 个元素呢,这在超铀元素被发现之前是难以确定的。

这三个元素存在几种价态,这与稀土相似;但最稳定的价态是 Th(IV), Pa(V) 和 U(VI),这又似乎说明这些元素应分别属于第四、第五和第六族,因而第七周期似乎应只包含 18 个元素。可是,93 号到 103 号元素的发现表明后一种看法是错误的。后面我们将看到,这些新元素与 Re 到 At(75 号—85 号)不相似,而与稀土相似。

锕后面的元素在化学行为方面彼此相似,构成一个系,与稀土一样,这个系也包含 14 个元素(89 号到 103 号)。这些元素被称为锕系。

④ 原文为 196,据俄文版改。——译者

[illegible][illegible]

图 1 元素周期系

最近发现了 104 号元素(鏷), 它的化学性质与铀系元素很不同, 而与 72 号元素(铪)相似。

原 子 结 构

从古代哲学家第一个朴素的原子论假说到化学上原子和分子论的胜利, 前后经历了两千多年的时间。然而, 在卡尔斯鲁厄国际化学会议(1860 年)接受了原子-分子概念以后很长一段时间, 原子的结构还仍然是一个谜。门捷列夫周期系的发现使之向前迈进了一大步, 全世界热烈地纪念了这一发现的一百周年。

门捷列夫证实了元素的性质与原子量具有周期性的关系, 并揭示了世界上所有的原子都是相关联的。这就使人们有了研究原子结构的线索, 最终导致了原子核的发现。

门捷列夫本人感到, 无疑应将原子看作是复合体, 他曾写道: “很容易提出, 但目前还无法证实如下的观点: 简单物体的原子是由某些甚至更小的部分结合而成的复合体, 因此我们所说的原子是不可分的, 仅仅是就普通的化学力而言的; 正象粒子(即现代意义上的分子)是不可分的, 是就通常条件下的物理力而言的一样……。性质和重量之间的周期关系似乎证实了这一观点。”^①

电的不连续结构的发现在原子结构研究中曾起了重要的

① D. I. Mendeleev, Selected Works [in Russian, Vol. 2, Moscow(1934), p. 111.].

作用。电通过电解质的现象为存在不连续的基本电荷的观点提供了基础,这种电荷起着电的原子的作用,因为发现任何一种一价的电解质电解时,产生 1 摩尔质量原子(数值上与原子量相等的克数)都需输送 96500 库仑的电量。按照元素的原子结构理论,这意味着,存在着基本电荷(电的原子)。后来,关于真空放电的研究结果表明,带电的原子(与相应的电解质离子具有相同荷质比的离子)伴有带负电的粒子(电子),后者的质量约为氢原子质量的 $1/1840$ 。密立根发现电子电荷 e 为 4.77×10^{-10} 静电单位(厘米·克·秒制)。

原子作为一个整体是电中性的,只有在失去或获得电子时才变成带电,因此原子显然是包含某种具有正电荷的粒子。很长时间没有获得关于这种粒子的任何资料,在汤姆孙的第一个原子模型中,原子被描述为整个体积内均匀地充满了正电荷。

1911 年卢瑟福在检验由天然放射性物质放出的 α 射线穿透纸或铝时发现,有时 α 射线改变很大的方向,好象受到一个很大的力作用。他得出结论,一个原子的所有正电荷和几乎全部的质量都集中在它的核上,核的直径只有整个原子直径的万分之一左右。这样,强烈的 α 射线散射现象就很容易解释了,这是由于 α 射线接近核时产生了巨大的电斥力的缘故。

卢瑟福的发现导致了原子行星模型的产生,在行星模型中,带正电的原子核和带负电的轨道电子分别相应于太阳和行星。最初是基于用各种方法(例如,在放电管中稀薄的气体

被电激发放出荧光) 激发的各种原子的光谱线来研究原子结构的。

行星模型的第一个任务是解释由原子氢产生的比较简单的光谱线序列; 但这里产生了严重的困难, 因为电动力学定律(它在十九世纪有了巨大的发展)表明, 围绕带正电的核旋转的电子将连续地辐射能量而越来越接近于核。

1913 年, 玻尔找到了这个问题的解决方法。玻尔假定, 一个原子有某些确定的轨道, 电子在轨道上运动时不产生辐射, 只有在电子从一个轨道跳向另一个轨道时才产生辐射。相应的量子能量是 $\Delta E = E_1 - E_2 = 2\pi\hbar\nu$, 这里 E_1 和 E_2 是电子在初始轨道和最终轨道上的能量, 而 $\hbar$ 是普朗克常数 (1.05×10^{-27} 尔格·秒), ν 是频率。

玻尔理论能够对容许的轨道进行计算。若最靠近核的那个轨道的半径为 r_0 , 则第二个轨道的半径即为 $2^2 r_0 = 4r_0$, 第三个轨道为 $3^2 r_0 = 9r_0$, 等等。第 n 个轨道的半径是 $n^2 r_0$, 这里, 轨道数被称为第一量子数或主量子数。

观测到的氢光谱线与玻尔理论的计算值非常一致, 但要解释更重原子的光谱, 就需要更为复杂的理论。

X 射线谱在后来的原子结构研究中曾起过特别重要的作用。这种谱线是在一种物质被高速电子轰击时产生的。这种轰击能把电子、甚至是最靠近核的电子打出来。电子从外面的轨道落入空位, 同时放出 X 射线。按照所涉及的轨道不同, 有不同的 X 射线系列。向最靠近核的轨道跃迁, 产生 K 系, 而向第二个轨道跃迁, 则产生 L 系, 等等(图 2)。每一系列都有

很多谱线。例如在 K 系中，由第二个轨道向第一个轨道跃迁时得到 K_{α} 线，由第三个轨道向第一个轨道跃迁时得到 K_{β} 线，等等。

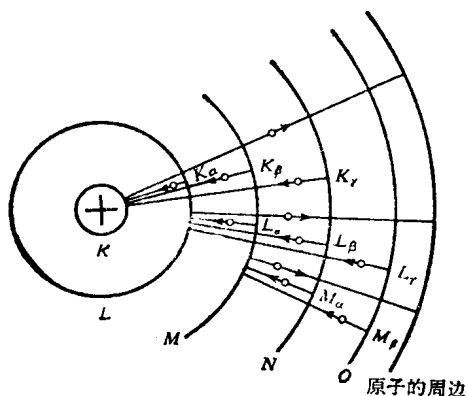


图 2 由电子跃迁而产生原子谱线(原子的行星模型)

每一个系列中，最高频率或极限频率相应于俘获自由电子。核电荷 Z 与 K 系的最高频率之间存在一个简单的关系： $\nu_{K\text{最大}} = R(Z-1)^2$ ，这里 R 为常数。因此，可以由 X 射线系的最高频率来推算 Z 。

1913 年到 1914 年，英国物理学家莫塞莱对各种元素的 X 射线谱作了广泛的研究，得出了各种元素的 Z 。他发现核的正电荷(因而也是中性原子的电子数)等于元素在周期系中的序数。从而最终肯定了这些序数，并揭示了原子序数 Z 作为核的正电荷数和原子的电子数的物理意义。

门捷列夫的洞察力使他能正确地安排元素在周期系中的

位置，甚至将较轻的元素排在较重元素的后面；钴和镍就是一个很好的例子。它们有很类似的化学性质，与铁一起构成第八族的第一个三元素组。钴的原子量比镍大，但门捷列夫根据性质上的不大差别将镍排在钴的后面。四十多年后根据 Z 的直接测定证实了这一点，原来钴的 Z 为 27，而镍的 Z 为 28。

1869 年建立周期系的时候，已知的元素只有 63 个。1875—1886 年期间又发现了三个元素：镓、钷和锗，门捷列夫对它们的化学性质曾作精确的预言。十九世纪末发现了五个惰性气体：He, Ne, Ar, Kr 和 Xe。大约在同一时期，居里夫妇和其他一些人发现了五个放射性元素：Ra, Po, Ac, Pa 和 Rn（第六个惰性气体）。另外，在 1869 年以后还发现了许多新的稀土元素——镧系元素，它们的性质极为相似。

Z 与 X 射线波长的关系解释了周期系中元素位置的各种不确定性。根据莫塞莱的结果，可以完全肯定，由氢到铀应有 92 个元素，因此 Z 为 43, 61, 72, 75, 85 和 87 的元素尚待发现。不过尽管还存在这些空位，但各周期应包含的元素数目已经清楚了：第一周期两个（氢和氦），第二和第三周期各 8 个，第四和第五周期各 18 个，第六周期 32 个。

X 射线谱表明，能量随 Z 而无例外地增加，而周期系却意味着化学性质的周期性变化。

后来的研究表明，这一差异是由于存在电子壳层而引起的。原来，原子的里面部分（它决定 X 射线的能量）有同样的内部结构，而外面部分（它决定化学性质）各原子彼此不同。

因此化学性质的周期性变化可以理解为是由于原子外面部分结构的周期性变化引起的。周期律不仅包含了与行星模型有关的原子的极重要资料，而且也反映了电子壳层引起的比较小的效应。

原子的电子壳层和元素的化学性质

玻尔理论在原子物理的发展中曾起过重要的作用，但由于这个理论越来越错综复杂而失去了明确性，而且还产生了某些内在的矛盾。

本世纪二十年代创立的量子力学解决了这些矛盾，并建立了一个严密的原子结构理论。设想存在一些确定的电子轨道，这种近似是太粗糙了；还不如说存在某些包含电子的壳层更好一些。

每个电子壳层以主量子数 n 来表征，主量子数规定壳层。主量子数代表最初玻尔理论的轨道。 n 越大，壳层离核越远，电子结合得越弱。

原子间的化学键涉及最外层(或次最外层)电子，因此价态主要受外壳层控制。周期律在某种程度上反应了这一点。随着 Z 的增加，一个壳层被填满，下一个壳层开始被充填；于是新壳层具有 1, 2, 3……个电子的元素，重新出现多一个壳层但外层电子数相同的元素的化学性质。

因此，壳层的数目(或最外壳层数)等于元素所在的周期数。 n 与周期数的这一关系还可用来确定每个壳层能够容纳