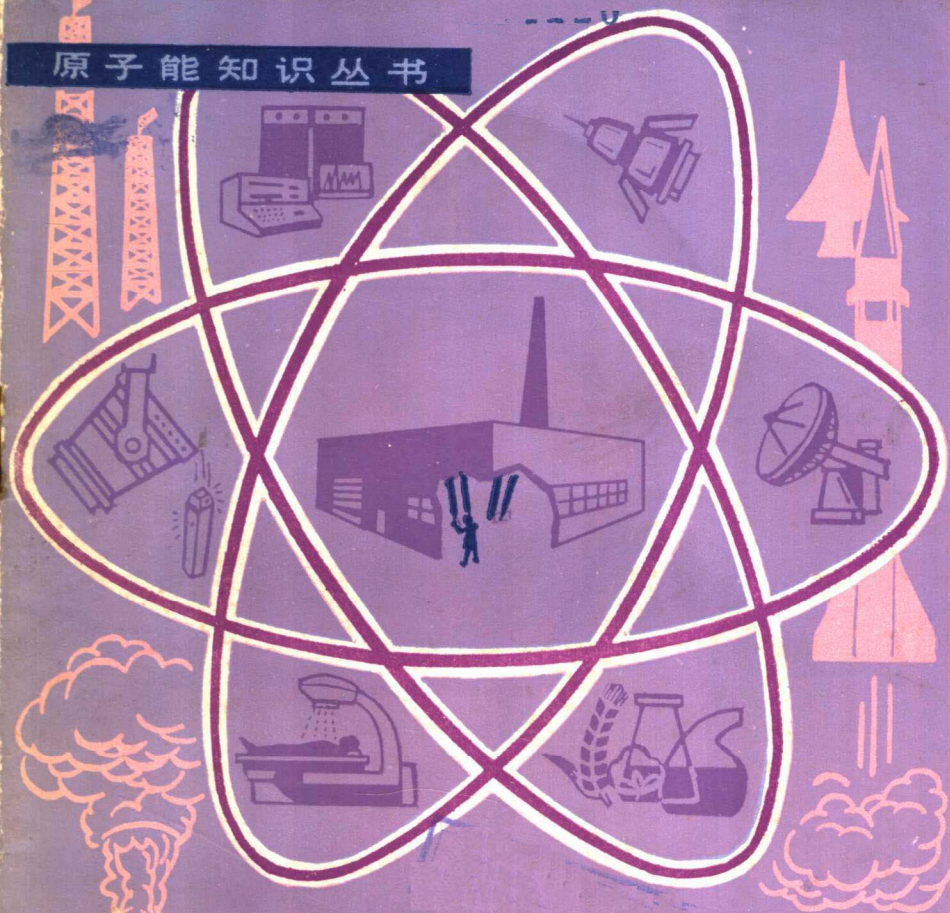
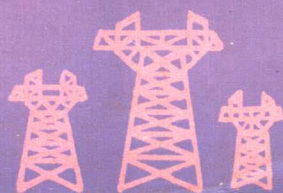


原子能知识丛书



合成超铀元素



原子能知识丛书

合成超铀元素

〔美〕厄尔·K·海德 著

谢 力 译

席德立 校

原子能出版社

合成超铀元素

【美】厄尔·K·海德 著

谢 力 译

席德立 校

原子能出版社出版

（北京 2108 信箱）

张家口地区印刷厂印刷

（张家口建国大街 8 号）

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $1^{3/8}$ · 字数 28 千字

1980年11月第一版·1980年11月第一次印刷

印数 001—2000 · 统一书号：15175 · 246

定价：0.18元

出 版 说 明

一提到原子能，就要和不可捉摸的放射性联系在一起，一些人往往望而生畏，敬而远之，这说明原子科学领域对于许多人来说还是陌生的。其实原子能既不可怕，也不神秘，它在我们的生活中正在起着愈来愈大的作用。

为了介绍原子能的基本知识和应用情况，我们有选择地翻译出版美国当代原子能学者和专家编写的原子能知识丛书 (Understanding the Atom Series)。这套丛书取材广泛，内容丰富，语言生动，深入浅出，具有中等文化水平的读者，花一些气力，读懂它是不成问题的。

在科学技术急速发展的今天，书中引用的有些材料稍嫌过时，但是这些材料对于理解基本概念还是有价值的。

目 录

一、天然元素及其转变的困难	(1)
天然元素的起源	(1)
炼金术士的梦想	(2)
原子核的基本知识	(3)
核变化的巨大能量势垒	(5)
中子使元素的转变化难为易	(7)
二、镭和钋的发现	(8)
错误的开端导致伟大的发现	(8)
重新探索93号元素	(9)
钋的发现	(10)
军用钋的生产	(12)
“发现”合成元素的必要步骤	(13)
三、进一步的发现	(14)
十一种超铀元素的概述	(14)
超铀元素的进一步合成	(22)
四、超铀元素的重要性	(22)
在化学上	(22)
在物理上	(26)
在国防和工业上	(26)
五、美国生产超钋元素的计划	(30)
附录一 超铀元素同位素一览表	(35)
附录二 超铀元素寿命最长的同位素	(39)

一、天然元素及其转变的困难

天然元素的起源

化学元素常常被认为是构成自然界的砖瓦。我们物质世界中的一切——地球表面的岩石和矿物，河流和海洋中的水，大气层中的各种气体，植物的枝叶和动物的肉体，都是由不多的一些化学元素构成的。大致可以肯定，我们太阳系中所发现的元素，是在古老星体内部发生一系列核爆炸时产生的，其中最近的一次爆炸距今至少有一百亿年以上。

在最后这次宇宙合成时，产生了许多不稳定元素。这些元素的原子核经过自发和连续的变化——我们称之为放射性衰变——变成了我们日常生活中所熟悉的稳定元素。在周期表靠前的82种元素中，有两个元素因为在自然界没有稳定的形式而未能被发现。这两个元素是原子序数为43的锝和原子序数为61的钷。铅（原子序数为82）后面的元素，因为它们的原子核含有大量质子，具有明显的核不稳定性；但自从最近一次合成元素的宇宙爆炸以来，这些元素都被保留了下来，这真是一桩值得庆幸的宇宙意外事件。重元素铀和钍（原子序数分别为92和90）是不稳定的，但它们的自发放射性衰变速率极为缓慢，因此，当时形成的重元素并没有都转变为较轻的元素。在放射性衰变过程中，铀和钍生成别的放射性元素，如镭和钋等。虽然这些生成的放射性元素不能留存下来，但同时通过铀和钍的衰变在不断补充。因此，在天然铀矿（如沥青铀矿）中，我们能够求出它们的平衡含量。

这本小册子将介绍近代科学史上伟大的基本成就之一：在实验室里制造了十一种新的元素，扩展了已知的化学元素表。这些元素中的每一个元素的首次合成，都是令人激动的巨大成就，都是化学和物理学上先前各种发现的延伸。作为实现化学元素合成所必不可少的前提，先期的一些里程碑有：

- 1869年 建立元素周期表，
- 1896年 发现放射性现象，
- 1911年 提出原子的核模型，
- 1929年 发明回旋加速器，
- 1932年 发现中子，
- 1934年 发现人工放射性。

这些重大的发现，激励科学家们进行一系列的实验。这些实验大约起始于1938年，用实验室的中子源、加速器和核反应堆实现了核转变反应，使人类第一次造出了化学元素。应该说，实验室里发生的过程与一百亿年前形成我们自然界里的元素所发生的那些过程是相似的。

炼金术士的梦想

在古代，人们就梦想能把一种元素转变成另一种元素，尤其是把贱金属转变成金、银等贵金属。中世纪的炼金术士作出了巨大的努力从事各种化学实验。现在我们知道，他们的努力是徒劳的，因为他们掌握的化学方法无法影响决定每



炼金术士

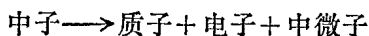
一元素特性的原子核。在进一步讨论这个问题之前，我们先简单介绍一下有关原子和原子核的基本知识。

原子核的基本知识

原子核含有中子和质子，由一种在极短的距离之内非常强的特殊的力把它们结合在一起。质子是带单位正电荷的重粒子，它就是结构最简单的元素——氢的原子核。中子是质量与质子相近的电中性粒子。原子核中的质子数目决定了这种原子的化学性质（即元素的原子序数，也就是该元素在元素周期表中的位置）。

要改变原子核的组成，就需要改变其中中子和质子的数目。通过所谓的放射性现象，原子核的组成就能自发地改变。

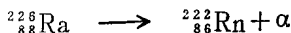
β衰变 例如，原子核里的中子与质子之比，有时对于作用于粒子之间的特殊力来说，高于最适宜的值。在这种情况下，原子核为趋于更加稳定的状态，将通过通常被称为β衰变的放射性过程使一个中子转变为质子，过程可由下式表示：



为了保持电中性，反应中生出个电子（带单位负电荷的轻粒子），也称为β粒子。这个电子以很高的动能从原子核中发射出来。同时，还放出一个既无重量、又不带电的粒子，称为中微子。

α衰变 第二种放射性过程称为α衰变。在这种放射性过程中，原子核自发地放出一种核子团。这种核子团叫做α粒子，是结合在一起的两个中子和两个质子。原子核失去两个质子（带有两个单位电荷）后原子序数减少了2，这样，

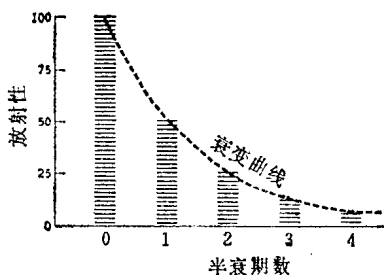
就由一种元素变成了另一种元素。现在来看一下镭放出 α 粒子时的放射性衰变：



上式简洁地说明了镭（原子序数为88）原子核（有226个核子*），衰变为氡（原子序数为86）原子核（有222个核子）和一个 α 粒子（两个中子和两个质子的核子团）。

半衰期 α 衰变和 β 衰变的过程都是自发核转变（通常称为放射现象）的例子。这些衰变过程的速率相差极大。一种核素可能在几分之一秒内完全衰变为另一种核素，也有些核素（例如铀-238）很可能经过几十亿年只衰变掉一部分。各种核素（即具有特定数目的中子和质子的各种原子核）都具有各自的衰变速率。（参见下面的典型衰变曲线图。）放射性物质的衰变速率与该

物质衰变时的量成正比。这样便可得到一条对数衰变曲线，这条曲线可用“半衰期”，即物质衰变一半所需的时间来表征。本书所介绍



典型的衰变曲线图

的各种合成元素的核素都有放射性，对于各种核素来说，半衰期是一个很重要的性质。

人工核转变 除了自发衰变外，还可用人工的办法把中子或质子加到原子核内，改变原子核内部的组成。现在已经

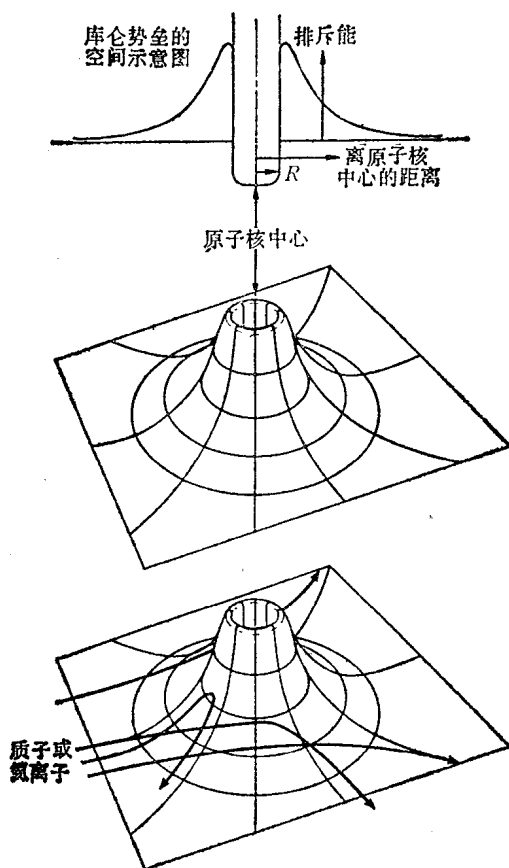
* 核子是原子核的成分，也就是质子或中子。

知道不少实验方法，可使原子核增加一个或数个中子或质子。最常用于核转变的核子团是氘离子和氦离子。氘离子是一个中子和一个质子结合在一起的核子团；氦离子则是由两个中子和两个质子结合而成，也就是 α 粒子。也可用更加复杂的核子团进行人工核转变，例如用硼-11的原子核（五个质子和六个中子的核子团）和碳-12的原子核（六个质子和六个中子的核子团）。

核变化的巨大能量势垒

把质子加到原子核中，使一种化学元素转变为另一种化学元素，这并不是一件容易的事情。我们可以试用一束质子流或一束更复杂的粒子流去轰击靶子，靶子中含有我们想要改变的元素。然而，质子是带电的粒子，它与靶中的原子核（或质子）彼此互相排斥。因此，这些质子（轰击粒子）或更复杂的轰击粒子，必须具有足够的动能来克服核内质子的电斥力。这种势垒可用库仑定律描述。该定律指出，同性电荷粒子间的斥力与两者电荷的乘积成正比，与它们之间距离的平方成反比。由于原子核非常小，例如铀原子核的半径约为 10^{-12} 厘米（一厘米的一万亿分之一），轰击粒子要与靶子接触，必须达到很近的距离，这时反平方定律将使库仑斥力增大到惊人的数值。库仑势垒的说明见下图。

下面我们看一下这种势垒究竟有多大。在原子物理学中能量单位一般用电子伏特表示。库仑势垒则要以兆电子伏特计（常用MeV表示）。在铀原子核的情况下，质子或氘的接近势垒（库仑阈能）为12兆电子伏特，氦核的接近势垒（库仑阈能）为23兆电子伏特。为了便于了解这些数值的大小，再介绍一下我们生活经验里的一些能量的数值。



库仑势垒

库仑势垒有保护原子核免受核转变的作用。上图表示原子核中心附近的势垒。当一个带电的轰击粒子，例如质子或 α 粒子（氦原子核），接近原子核时，该粒子的动能必须相当于由库仑定律确定的排斥势能。如果轰击粒子的动能足以使它接近原子核表面（图中距离为 R 的地方），则近核引力会使排斥势能陡然降低。这种能量立即变成动能，为核内所有的组分所均分，或通过电磁辐射（ γ 辐射）而消失。这样，使质子或 α 粒子得以保留在原子核里。中图表示三维空间的势垒。下图表示具有克服库仑势垒能量的质子或氦离子接近原子核的路径。铀原子核半径 R 为 10^{-12} 厘米。势垒高度：对质子而言为12兆电子伏特，对氦离子则为23兆电子伏特。

一列以时速为100英里行进的火车，具有巨大的动能，但在这列高速火车上，钢铁里的铁原子的能量才只有0.006电子伏特。以每秒3000英尺的初速度飞行的一颗子弹，也具有很大的能量，但是子弹里的铅原子所具有的能量，只有1电子伏特。最猛烈的化学炸药爆炸时也仅使爆炸产物的原子增加几个电子伏特的能量。从这些例子中我们可以知道，宏观世界发生的事件所需要的最大能量，与带电粒子克服原子核的电斥力所需的能量相比，还不到后者的百万分之一。

这些基本事实可以说明发明回旋加速器这类加速器对物理学的重要性。建造这些加速器就是为了大大提高轰击粒子的动能，使它们可以穿越靶原子的核并引起核反应。

中子使元素的转变化难为易

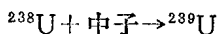
1932年查德威克发现了中子。之后不久，人们就知道用钋和镭放出的 α 射线与轻元素反应可作为中子源，并且还发现，中子引起核转变的效果要好得多。由于中子不带电，所以不受库仑势垒的影响，即使它的速度很低，也能穿进在它所经过的路径上的原子的核内。中子一旦进入原子核内部，便受到很强的核力作用而束缚在核内。原子核吸收中子后质量增加一个单位，而质子数不变。但往往中子和质子的比值的变化，会使原子核不稳定，这个中子会通过 β 衰变反应（我们在前面已讨论过）而转变为质子。这样，最终的结果是，原来的元素变成了一个新的元素，亦即在周期表中往后挪了一格。

在三十年代，对这类反应进行了深入的研究，制造并鉴定了许多已知元素的放射性核素。

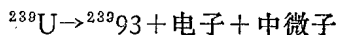
二、镓和钷的发现

错误的开端导致伟大的发现

科学家研究中子辐照铀（当时已知的最重元素）的效应，是很自然的事，因为根据过去的经验，辐照的结果似乎应当生成一种原子序数为93的新元素。人工合成自然界里不存在的元素，这是多么令人振奋、令人神往的前景！本世纪三十年代中期，伟大的意大利物理学家恩里科·费米和他的同事们在罗马用铀进行了一系列实验。他们期望铀能俘获一个中子，并按下列反应生成一种新的铀同位素：



不但如此，他们还企望这种新的同位素经过放射性衰变会变成93号元素的同位素，其反应式如下：



铀样品受慢中子轰击时，确实产生了上述的结果，但是在这些实验中却未能正确地鉴定93号元素。原因是，费米等人在用中子轰击铀的时候，无意中使铀元素里含量稀少的同位素铀-235发生了核裂变。铀-235裂变时生成两个中等质量的放射性元素。每一次裂变的核分裂方式都略有不同。一批裂变的铀原子核能产生很多的裂变产物，包括许许多多中等质量元素的多种放射性同位素。这些放射性裂变产物的复杂混合物，掩盖了93号新元素的辐射。费米和他的同事们并不知道发生了核裂变，因为在当时没有一个物理学家能够想到竟然会发生这样一种强烈的核物质重新组合的现象。当然，这就

引起了很大的混乱。例如几年之后，用化学分析方法分离出了一些裂变产物，当时错误地宣称它们是在周期表里位于铀后的新元素，甚至原子序数高达96的元素也曾见诸报道。直到1938年，德国化学家奥托·哈恩和弗里茨·斯特拉斯曼所做的关键性实验证实了核裂变的存在，上述这些解释才被公认为是错误的。

这样一来，合成超铀元素的初次尝试却导致科学史上最惊人、最重要的发现之一——原子核的裂变。

重新探索93号元素

1938年发现核裂变现象后，世界各地的核物理学家都抓紧进行实验，借以获得有关这种令人惊奇的现象的新资料。在加利福尼亚州的伯克利，物理学家E.M.麦克米伦想到，如果测量铀裂变所产生的高能碎片在物质中的射程，也许会有用处。他的实验方法非常有意思，因为它表明重要的实验



埃德温·M·麦克米伦，这是1940年他和菲利普·H·艾贝尔森发现93号元素镎后不久所照的相片。

并不一定非用高精尖的仪器不可。他拿了一些普通的卷烟纸，将它们叠成一本小书。在最上面的一张纸上，薄薄地放了一层氧化铀，然后将整叠纸片放在由回旋加速器的靶体所产生的中子流里照射。裂变碎片打进卷烟纸片里，深度不一。随后，把这些纸片分开，用盖革计数管测量每张烟纸的放射性强度。就是这么简单的实验！实验结果与预期的大致符合。但是，还看到了一种意料之外的更加重要的现象：放有氧化铀薄层的第一张烟纸也含有放射性，这种放射性

只留在这张纸上，而且放射性的类型也与其他纸上的不同。

究竟为什么会发生这种现象呢？麦克米伦回到了费米原来的想法。可以设想，假如有些中子被铀吸收而并不引起裂变，那么就会生成新的铀的重同位素，后者进一步衰变就会生成93号元素的同位素，这种同位素是不会飞离氧化铀靶体的。

这时候，华盛顿卡内基研究院的艾贝尔森来到伯克利，并同麦克米伦一起深入地研究这种新的放射性，希望能够确定这就是93号元素。麦克米伦和艾贝尔森在仔细地重新考虑了这个最重的元素在周期表里的位置之后，取得了成功。从而得出了这样的结论：他们所研究的93号元素，其化学性质可能与铀相似。

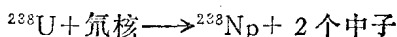
这些研究者用天文学上行星的名字来命名他们所合成的超铀元素。铀（Uranium）意为天王星（Uranus）。天王星外面的行星是海王星（Neptune），所以麦克米伦和艾贝尔森将93号元素取名为镎（Neptunium，符号为Np）。

他们发现的镎的同位素，其半衰期为2.2天，当时只能制备出肉眼看不见的极少的数量。

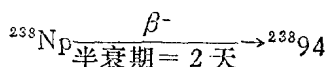
镎的发现

镎的发现，使科学家们相信再造出另一种新的元素是大有希望的。于是，他们便立即把注意力转移到这种新元素的合成上来。1941年初，G.T.西博格、麦克米伦、J.W.肯尼迪和A.C.沃尔首次确认了94号元素的一个同位素的存在。他们利用E.O.劳伦斯所建造的60英寸回旋加速器，产生能量为16兆电子伏特的氦核，来轰击氧化铀样品。然后，采用麦克米伦和艾贝尔森过去建立的放射化学分离方法，分离出一

份纯的93号元素，并发现其中有一种半衰期为2天的新的放射性同位素。这就是镎-238，其核反应式如下：



这种同位素放射出 β 粒子（负电子），生成一种质量数为238、原子序数为94的同位素：



镎-238衰变时不断生成一种发射 α 粒子的新的放射性同位素。根据这种母-子关系可以确定，这一发射 α 粒子的物质是94号元素的一种同位素。由子体的 α 放射性强度与母体的 β 放射性强度之比，可确定 $^{238}_{94}$ 的半衰期约为50年。化学实验表明，这个新元素的放化性质不同于镎、铀、钍或用氦核轰击铀可能生成的任何元素。

不久以后，这些发现者把这个新元素取名为钷（plutonium，符号为Pu），意为冥王星（Pluto）。

在证实了钷-238之后，紧接着肯尼迪、西博格、E. 西格雷和沃尔等人又鉴定出另一种重要的同位素钷-239。钷-239——第一个被发现的93号元素的同位素——通过放出 β 粒子，亦即通过一个中子转变成一个质子和一个电子，进行放射性衰变。科学家们已认识到，这种变化必然会生成质量数为239的94号元素。但最初，由于可得到的钷样品量极少，而钷-239的衰变速率又很慢，所以不可能观察到钷-239的辐射。后来，利用伯克利的60英寸回旋加速器产生的强中子束轰击铀制得了较多的钷-239样品，这个问题便得到了解决。用化学方法分离出钷-239后，观察到钷-239衰变时生成

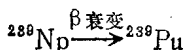
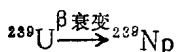
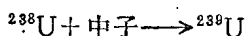
一种新的 α 放射体。根据 α 放射性的强度，可以算出这个同位素的半衰期约为30000年。（与现在公认的铀-239的半衰期24360年相近。）

有人曾预言，用慢中子照射同位素铀-239时，铀-239会像铀-235一样有很高的核裂变几率。铀-239的发现者立即测定了这种性质，证明这一预言果然是正确的，铀-239的裂变几率甚至比铀-235还大。

军用铀的生产

铀-239可裂变这一事实立即引起人们极大的重视，因为裂变放出的核能可用于军事目的。由此制定了战时的“铀计划”，该计划的目标是生产公斤量级的铀，研制一种由铀核裂变提供巨大能量的新武器。1945年8月在日本长崎上空爆炸的原子弹，就是一颗铀弹。

铀的大规模生产要求研究能在工业上实现的生产方法。这就需要设计一些大型的核反应堆，反应堆内可装成吨的铀燃料，铀-235发生核裂变时，提供足够的中子，以维持链式反应；同时通过下列反应使铀-238转变成铀-239：



另外，还必须设计化学后处理流程，以便从好几吨辐照过的铀燃料中分离和纯化含量极低的铀。由于裂变产物具有很高的放射性，因此这种工艺过程必须在厚实的混凝土屏蔽后面遥控操作。