

0615

10:3

放射化学基础

第3版

[德] C. 克勒尔 著
朱永贍 焦荣洲 徐景明 译
王秋萍 杨大助
朱永贍 校

原子能出版社

内 容 简 介

本书是一本内容丰富、新颖，叙述简明扼要，综合性强的放射化学教科书。它全面评述了放射化学领域的最新发展，其中包括核反应堆化学和人造元素化学。对放射化学的基础，作了合乎逻辑的和由浅入深的解释。在论述了核理论和放射化学理论之后，着重介绍了放射性核素和核能的生产，以及放射性核素在医学和其他领域中的应用。

本书在第2版的基础上，增加了夸克模型、新重元素的发现、与核聚变有关的化学、放射性与环境、辐射的生物效应等方面的最新内容。每章后面附有习题。

本书是放射化学、化学、核医学等专业的大学生、研究生，以及核工业领域的科学技术人员的有用参考书。

译者的话

这本中文版《放射化学基础》是从德国 C. 克勒尔 (Cornelius Keller) 教授的“Radiochemie 3 Auflage”德文打印稿译出的, 德文版“Grundlagen der Radiochemie”1993 年初出版后, 又对译稿进行了校对。克勒尔博士从 1971 年起任德国卡尔斯鲁厄大学教授, 现任德国卡尔斯鲁厄核研究中心技术和环境进修学院主任。他于 1981 年出版的“Radiochemie”第 2 版已被译成英、俄、葡等多种文字。

克勒尔教授曾于 1981, 1987 和 1991 年先后三次到我国访问和讲学, 与我国放射化学界有较多的友好交往。他希望经过修订的“Grundlagen der Radiochemie”第 3 版能有中文译本。在他的建议下, 我们完成了本书的翻译, 并经作者同意交原子能出版社出版。我们相信本书将为我国的放射化学、化学、物理、生物和医药等专业的大学、研究生和教师以及核工业领域的科学技术人员, 以精炼的形式提供全面的和最新的放射化学知识。

本书第 1, 2 章由焦荣洲译, 第 3, 4, 5, 6, 8 章及 11.3, 11.4 节由朱永贍译, 第 7 章由杨大助译, 第 9, 10 章由徐景明译, 11.1, 11.2 节和第 12 章由王秋萍译。由朱永贍教授审订全书。

对中国核工业总公司科技司和原子能出版社支持出版本书及原子能出版社潘金娣、韩国光、乐俊楚的认真审阅表示衷心的感谢。

受译者水平所限, 译文肯定会有缺点、错误, 欢迎批评指正。

译者

1992 年 7 月

中文版序

德文《放射化学》的前两版受到科学工作者,大学教师,特别是大学生们的欢迎。它已被译成俄文、葡萄牙文和英文并受到高度赞扬。如“Endeavour”上的评论说:此书可作为一本非常有用的教科书推荐给高年级大学生和研究生。H. J. M. Bowen 教授在“Chemistry in Britain”上评论说:我向教师和学生推荐此书,它是当前能得到的最好的一本书。鉴于这些好评,本书第3版还将被译成日文。

我于1981,1987和1991年在中国的讲学中了解到,中国的科学工作者和大学生对现代放射化学及其在科学研究、医药和工程技术中的应用有着浓厚的兴趣。特别令我高兴的是,我去年作为德国卡尔斯鲁厄核研究中心的技术和环境进修学院派往北京的客座科学家,和清华大学核能技术设计研究院的朱永贍教授商定了把我的第3版《放射化学》译成中文的计划。我衷心感谢根据约定进行的合作,并同意委托原子能出版社出版本书。希望本书在中国也将受到广大读者的欢迎。

放射化学研究的最新成果,特别是它在核技术和核医学领域应用的最新成果,是非常吸引人的学习对象。以对新元素的单个原子进行鉴定并研究其化学反应的单原子化学为例就足以说明这点。

全世界已经有约500座核电站,在越来越多的国家里将要有闭合的核燃料循环,这使得核技术达到了一个高的水平。将来还要实现包括特殊氘技术的核聚变技术。建在英国卡勒姆(Culham)的JET (Joint European Torus, 欧洲联合核聚变实验装置)于1991年底首次证明了氢同位素的受控聚变是可能的。在医学领域发明

了中子和 π 介子辐照法治疗癌症和利用放射性标记抗体的免疫闪烁扫描法。此外,两次核反应堆事故——美国哈里斯堡的三里岛事故(1979年)和苏联的切尔诺贝利事故(1986年),特别是释放出更多放射性的后者,表明在核设施安全方面还有许多工作要做。这里同样需要放射化学家作出他们的贡献。

本书德文第3版收入了所有这些方面的新材料。有的章节不得不重写。添加了新的两章,一章论述放射性同位素的制备和应用,另一章论述环境放射化学,其中包括了辐射对生物体系的作用。

我希望不仅具有一般兴趣的读者,而且有明确目的应用放射性的专家都能从本书中得到他们需要的材料。还希望本书有助于使他们进一步理解到从事放射性物质工作可以做到与从事其他有潜在危险性物质工作有同样的安全性。



Prof. Dr. C. Keller

1992年5月

德文版序

《放射化学基础》第3版是对1981年第2版作了全面更新扩大的版本。特点是加入了最近10年来的新发现,如第1章的夸克理论,第2章的放射性衰变新类型,第7章的直到 $Z=109$ 的新元素和第9章的核聚变有关化学问题。

本书对当代放射性物质的应用给予了很大注意,特别是核医学中的放射性药物学。大大扩充了第8章并新增加了第10章“放射性核素和标记化合物制备”。同研究、应用放射性物质各领域紧密相关的是人们接受的辐射剂量及由之产生的辐射效应。切尔诺贝利核反应堆事故后格外引起重视的这些问题在新增的3.4节“剂量和剂量率”和第12章“放射性与环境,辐射的生物效应”中进行了讨论,并收入了国际放射防护委员会1990年的最新建议。

本书适用于从完全中学高年级化学/物理/生物提高课的学生到大学主修或副修放射化学与核化学专业的学生。已参加工作的放射化学工作者也可用本书做进修材料。显然,对不同的读者各章的重要性是不同的。如第4章对从事放射性测量工作的人员较之对放射性药物工作者更为重要。本书的宗旨是为对各主题感兴趣的多数读者提供专门的经过选择的知识。

在第1版和第2版中遵循的这种宗旨已被证明是正确的。这不仅反映在肯定的评论里,还表现在本书被译成俄、葡、英文上。值得提出的是英译本(Radiochemistry, Ellis Harwood Ltd., 1988)出版后的评论:“本书可作为一本非常有用的教科书予以推荐”(Endeavour, 12(4)1988);“它是现时能得到的最好的一本书”(Chemistry in Britain, 1988)。第3版已计划译成包括中文在内的多种译本,作者期望也能得到同样好的评价。

作者感谢技术与环境进修中心(FTU)和卡尔斯鲁厄核研究中心的同事们在给予提示、提出改进建议、纠正错误等方面作出的贡献。对莫比尤斯博士(Dr. S. Möbius)、比克尔博士(Dr. M. Bickel)和格凯斯博士(Dr. H. Geckeis)参与本书工作,及达克(E. Dahlke)、福克斯(I. Fuchs)和布莱克泰尔(S. Brechtel)等女士誊清手稿特别表示谢意。

C. 克勒尔
卡尔斯鲁厄, 1993

目 录

译者的话	(VI)
中文版序	(IX)
德文版序	(XI)
第 1 章 核子学	(1)
1.1 原子核的构成	(1)
1.1.1 核子	(1)
1.1.2 核素	(2)
1.1.3 核素的稳定性	(5)
1.1.4 放射性物质	(7)
1.2 原子核的性质	(8)
1.2.1 电荷和半径	(8)
1.2.2 原子核质量和核结合能	(12)
1.2.3 角动量、宇称、磁矩和电矩	(18)
1.3 原子核的模型和形状	(20)
1.4 基本粒子	(25)
1.4.1 基本粒子的夸克模型	(30)
1.4.2 基本粒子物理和标准模型	(32)
习题	(35)
第 2 章 放射性	(37)
2.1 放射性衰变规律	(37)
2.1.1 放射性衰变的时间规律	(37)
2.1.2 放射性衰变平衡的建立	(42)
2.1.3 双分支衰变	(45)
2.1.4 放射性衰变的计算实例	(47)
2.2 放射性衰变的类型	(48)
2.2.1 α 衰变	(50)
2.2.2 β 衰变	(52)
2.2.3 发射 γ 量子	(59)

2.2.4	自发裂变	(64)
2.2.5	质子衰变	(68)
2.2.6	发射中等重量粒子的衰变	(68)
2.2.7	重粒子的缓发发射	(69)
习题	(73)
第3章	核辐射与物质的相互作用	(74)
3.1	α 辐射的作用	(74)
3.2	β 辐射的作用	(76)
3.3	γ 辐射的作用	(79)
3.4	剂量和剂量率	(82)
习题	(86)
第4章	核辐射的测量	(87)
4.1	电离探测器	(90)
4.1.1	电离室	(90)
4.1.2	正比计数器	(91)
4.1.3	GM 计数器	(92)
4.1.4	半导体计数器	(95)
4.2	闪烁探测器	(98)
4.3	照相检测法	(102)
4.4	核径迹探测器	(102)
4.5	云雾室和气泡室	(103)
4.6	热释光	(104)
4.7	剂量测量	(104)
4.8	符合和反符合测量	(105)
4.9	中子的测量	(106)
4.10	用统计涨落来限定测量精密度	(108)
习题	(110)
第5章	核反应	(111)
5.1	核反应的反应截面和激发函数	(112)
5.2	带电粒子引起的核反应	(114)
5.3	中子引起的核反应	(116)

5.4	散射过程	(117)
5.5	核裂变	(119)
5.5.1	核裂变的机理	(120)
5.5.2	裂变产物	(121)
5.5.3	核裂变的能量平衡	(123)
5.6	核反应产额计算	(125)
	习题	(129)
第6章 原子核与电子壳层间的相互作用		(130)
6.1	化学键对半衰期的影响	(131)
6.2	化学键对放射性衰变后辐射发射的影响	(133)
6.3	穆斯堡尔效应	(134)
	习题	(138)
第7章 放射性元素		(140)
7.1	天然放射性元素	(140)
7.2	人造放射性元素	(142)
7.2.1	镅	(143)
7.2.2	钷	(144)
7.2.3	超铀元素	(144)
7.2.3.1	用反应堆制备超铀元素	(147)
7.2.3.2	在核爆炸中产生超铀元素	(152)
7.2.3.3	用重离子轰击制备超铀元素	(152)
7.2.3.4	超铀元素的性质与操作	(157)
7.2.4	超重元素的探索	(169)
7.3	非经典原子	(173)
7.3.1	强子原子和 μ 子原子	(173)
7.3.2	正电子素原子和 μ 子素原子	(176)
	习题	(178)
第8章 核转变后的化学反应		(180)
8.1	α, β 和 γ 发射后的反冲能	(181)
8.2	反冲反应	(185)
8.3	反冲反应的实际应用	(188)

8.3.1	新化合物的制备	(188)
8.3.2	用反冲原子直接标记	(188)
8.4	生物化学中的反冲效应	(192)
	习题	(195)
第9章	核能的生产与利用	(196)
9.1	同位素电池	(196)
9.2	聚变反应堆	(199)
9.2.1	核聚变基本原理	(199)
9.2.2	聚变堆的构造	(202)
9.2.3	聚变堆的燃料循环	(206)
9.2.4	利用惯性约束的核聚变	(208)
9.3	核反应堆	(209)
9.3.1	核反应堆的中子平衡	(210)
9.3.2	核反应堆的构造	(214)
9.3.3	反应堆类型	(217)
9.3.4	转化过程和增殖过程	(222)
9.3.5	能耗	(223)
9.4	核反应堆技术中的化学;核燃料循环	(225)
9.4.1	核电站的燃料供给	(225)
9.4.2	核电站的乏燃料处置	(228)
9.4.2.1	后处理	(229)
9.4.2.2	放射性废物的处理和永久贮存	(231)
9.4.2.3	乏燃料的直接永久贮存	(233)
9.4.3	核能现状	(234)
	习题	(236)
第10章	放射性核素与标记化合物的生产	(238)
10.1	重要的放射性核素的生产	(238)
10.1.1	氟	(239)
10.1.2	放射性碳同位素	(241)
10.1.3	氟-18	(245)
10.1.4	磷-32和硫-35	(246)
10.1.5	铷-81和氩-81m	(248)

10.1.6	用来制备得-99m 的钼-99	(249)
10.1.7	放射性碘同位素	(249)
10.1.8	超铀核素	(253)
10.2	放射性核素发生器	(256)
10.2.1	^{99}Mo - $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 发生器	(258)
10.2.2	^{81}Rb - $^{81}\text{Kr}^{\text{m}}$ 发生器	(260)
10.2.3	“钍母牛”	(261)
10.3	用放射性核素对化合物进行标记	(262)
	习题	(268)
第 11 章	放射性核素的应用	(269)
11.1	放射化学的工作方法	(270)
11.2	放射性核素在化学中的应用	(273)
11.2.1	放射性示踪法	(273)
11.2.2	放射化学法测定年代	(276)
11.2.2.1	地质样品年代的确定	(276)
11.2.2.2	放射性碳法	(277)
11.2.3	放射化学分析法	(281)
11.2.3.1	依据天然放射性的分析法	(282)
11.2.3.2	稀释分析法	(282)
11.2.3.3	活化分析法	(285)
11.3	放射性核素在医学中的应用	(290)
11.3.1	用放射性核素诊断	(291)
11.3.2	用辐射和放射性核素进行治疗	(298)
11.4	放射性核素在技术中的应用	(301)
	习题	(304)
第 12 章	放射性与环境, 辐射的生物效应	(306)
12.1	环境中的放射性物质以及由此产生的辐射分布	(309)
12.1.1	天然放射性物质	(309)
12.1.2	天然射线照射	(311)
12.2	宇宙起因的放射性核素	(313)
12.3	人造放射性核素和辐射源	(314)
12.3.1	核技术中的放射性物质	(314)

12.3.2	辐照与技术	(317)
12.3.3	核武器试验引起的放射性	(317)
12.3.4	医疗应用造成的射线照射	(318)
12.4	放射性核素的放射生态学及放射性药物学	(319)
12.4.1	铯-90 的行为	(319)
12.4.2	放射性碘同位素	(320)
12.4.3	铯-137 的行为	(322)
12.4.4	钚	(323)
12.5	电离辐射对生物体系的作用	(327)
	习题	(339)
	习题答案	(339)
	参考文献	(340)
	附录 1 物理常数	(349)
	附录 2 十进位单位词头	(350)
	索引	(351)

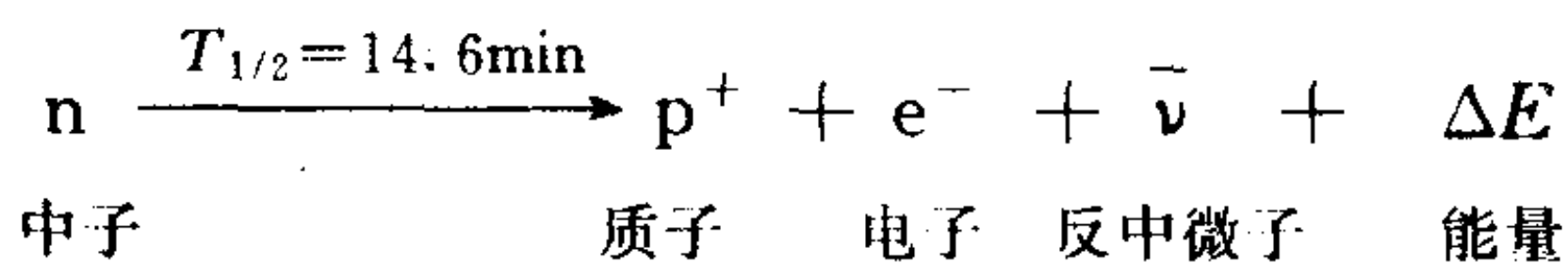
第1章 核子学

1.1 原子核的构成

根据丹麦原子物理学家玻尔(Niels Bohr)的经典理论,原子可看作为一个小球,它由一个极小的中心核和许多围绕它的电子壳层所组成,每一个壳层均包含若干电子。在中性原子中,原子核中带正电荷的质子数等于核电荷数或原子序数,它也等于围绕核的电子数。这些电子的结合能随着离原子核距离的增加而减小,因此外层电子有最低的结合能,由它们决定化学键和化学性质。

1.1.1 核子

原子核由质子(Z 个)和中子(N 个)构成。所以一个原子核有 $Z+N$ 个核子,它具有特征电荷 Z 。核内粒子与其相应的自由粒子之间是有区别的。例如,与束缚在原子核中的中子相比,自由中子是不稳定的(见1.4节),通过发射一个电子(β^- 衰变)转变为质子,半衰期 $T_{1/2}=14.6\text{min}$ 。



根据近代理论自由质子也是不稳定的,然而至今其衰变($T_{1/2} > 10^{30}\text{a}$)还没有得到证实。

同样,有 Z 个质子和 N 个中子的原子核的质量与 Z 个质子和 N 个中子质量之和并不相等,因为一个核子的质量比一个自由质子或一个自由中子的质量都小。这种质量差别是由核子结合成原子核所致(参看1.2.2节)。在各个核子之间的结合作用表现为 π 介子在核子之间的交换(强相互作用)。

在基本粒子构造的近代图象即夸克模型中,核子是由三个夸克组成的。

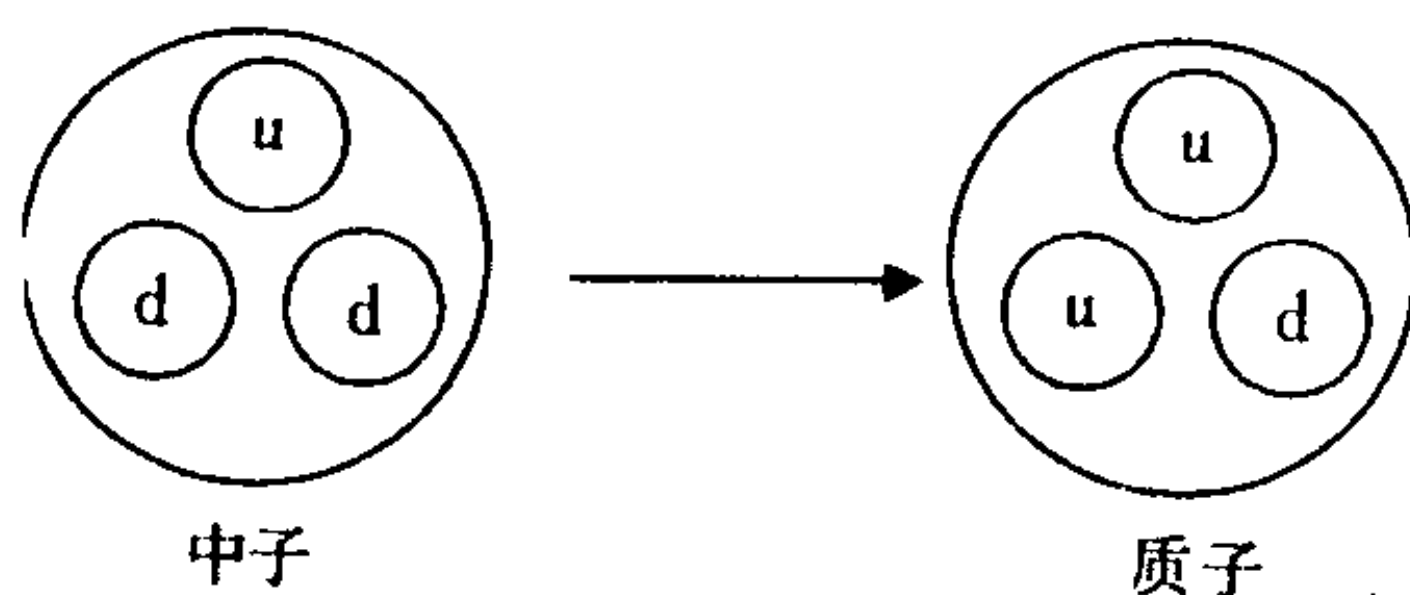
一个质子由两个 u 夸克(带 +2/3 电荷)和一个 d 夸克(带 -1/3 电荷)组成:

$$\begin{array}{ccccccc} u & + & u & + & d & = & p \\ (+2/3) & & (+2/3) & & (-1/3) & & (+1) \end{array}$$

一个中子由一个 u 夸克和两个 d 夸克组成:

$$\begin{array}{ccccccc} u & + & d & + & d & = & n \\ (+2/3) & & (-1/3) & & (-1/3) & & (0) \end{array}$$

因此一个中子衰变成为一个质子可以简单地认为是通过一个 d 夸克转变为一个 u 夸克来实现的。



核子数 A (在过去的文献中又叫质量数) 是质子数和中子数之和,

$$A = Z + N$$

它是一个整数,不应当把它与原子质量混同起来。

所以原子仅由三种基本粒子质子、中子和电子构成。其他的基本粒子以及它们的反粒子(参看 1.4 节)仅在核衰变一瞬间出现或作为同高能粒子相互作用时的产物即通过能量转变成质量出现。

与此相关,应当注意的是从激发态原子发出的量子在原子中是不存在的,它仅在发射时产生。

1.1.2 核素

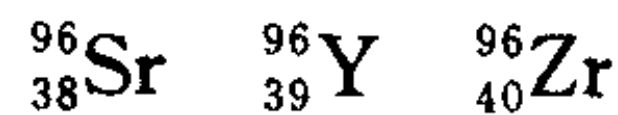
一种核素表示一类原子,它的核具有确定的质子数和中子数。具有相同质子数 Z 和相同中子数 N 的所有原子虽然它们的核可

能处于不同的能量状态,但它们都是同一种核素。核素可能是稳定的也可能是不稳定的即放射性的,人们用放射性核素来称呼不稳定的核素。

为了确切地表示核素,除了给定原子序数 Z 或元素符号外,还必须给定核子数 A 。例如,按国际惯例 ${}^{16}_8\text{O}$ (或 ${}^{16}\text{O}$)是氧-16, ${}^{235}_{92}\text{U}$ (或 ${}^{235}\text{U}$)是放射性核素铀-235。

具有偶数质子和偶数中子的原子核命名为偶偶核,而具有奇数质子和奇数中子的核命名为奇奇核;所以奇偶(或偶奇)核是具有奇数(或偶数)质子和偶数(或奇数)中子的核。为了系统化起见,核素可以按不同方式归类。

同量异位核素或简称同量异位素。它们有相同的核子数($A = \text{常数}$)。所以以下三个核素

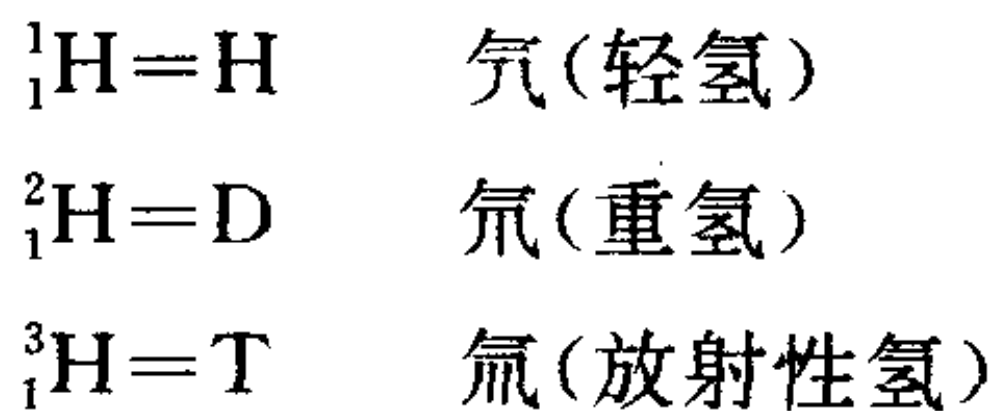


均属于具有相同核子数 $A = 96$ 的同量异位素。

同位素核素或简称同位素。它们具有相同的质子数($Z = \text{常数}$)。它们的区别在于有不同的中子数。所以一个元素的所有同位素均属同一个化学元素。这样一来,

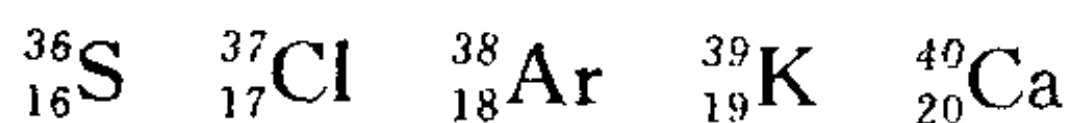


是元素铀($Z = 92$)的同位素,都具有元素符号 U 。仅三种氢同位素采用特有的名称和符号:



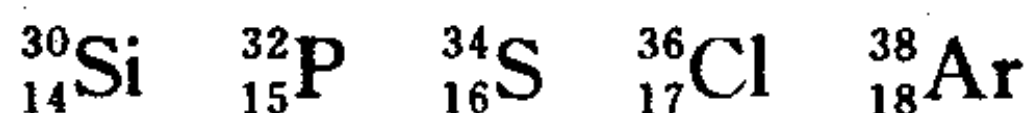
放射性同位素是某种元素的放射性的同位素。

同中子异位核素或简称同中子素。它们具有相同的中子数($N = \text{常数}$),



均属于有 20 个中子的同中子素。

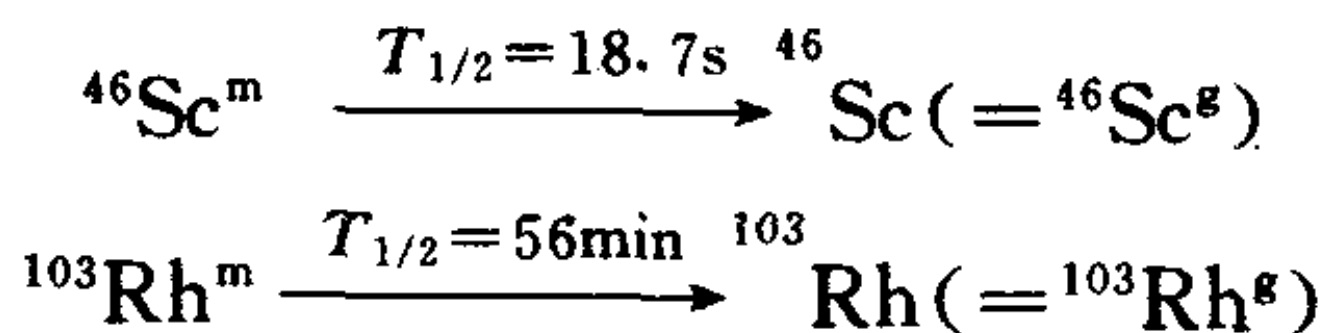
等超额中子核素($N-Z$ 相等的核)或简称等超额中子素。它们的中子数与质子数之差是个常数($A-2Z=N-Z=$ 常数)。这样,



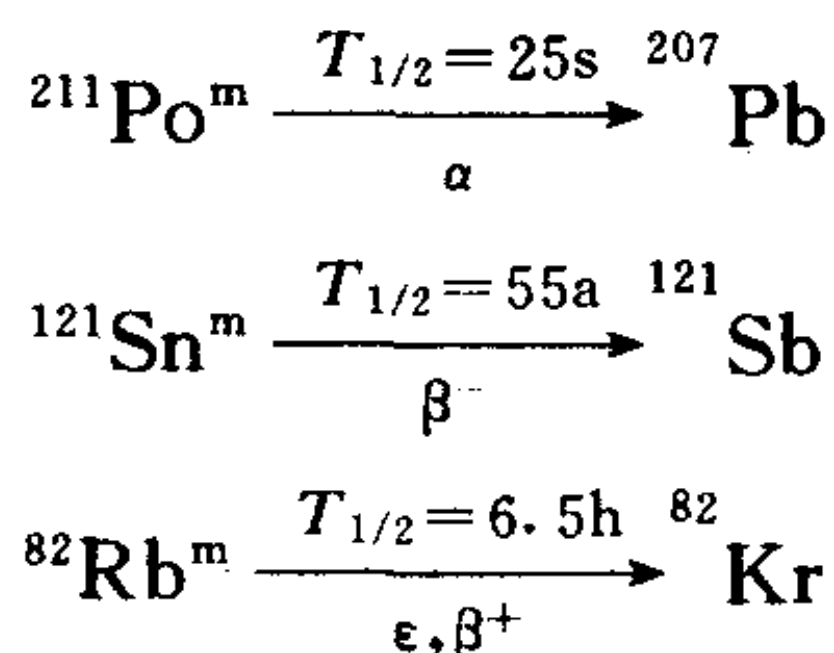
每一核素的中子数均比质子数多两个。

同质异能核素或简称同质异能素。它们的区别不在于它们的质子数,也不在于它们的中子数,而仅仅在于它们的核的结合能。所以同质异能核的性质与同一核素的不同能量状态有关,每一能量状态均有它自己的可测量的寿期。一个核素的最低能量状态是基态(参见 2.2.3 节)。高能状态的寿命是很短的(大约在微秒以下)*,所以常常称“激发态”。

一个处于高能状态的同质异能素和它的基态比较,力求给出它的过剩能量。在大多数情况下是通过发射电磁辐射(γ 辐射)来实现的,例如:



但是在若干情况下,处于高能状态的核素不是经发射 γ 量子到基态,而是通过 α 衰变或 β 衰变到别的核素:



人们还常常发现,某些处于亚稳态的核的衰变既通过同质异能跃迁也通过 α 或 β 衰变:

* 在化学符号上区别一定的同质异能素是必要的,通过添加字母 g (表示基态)或 m (表示高能亚稳态)和核子数来实现(例如 ${}^{46}\text{Sc}^g$ 区别于 ${}^{46}\text{Sc}^m$)。