

核 化 学

理 论 与 应 用

[美] G.R. 肖 邦 著
[瑞典] J. 赖 德 伯 格



原子能出版社

核 化 学

理 论 与 应 用

[美] G.R. 肖 邦 著
[瑞典] J. 赖德伯格 著
仲 吉 译

原 子 能 出 版 社

Nuclear Chemistry
Theory and Applications
G.R.Choppin & J.Rydberg
Pergamon Press, 1980

核 化 学

理 论 与 应 用

[美] G.R.肖邦 [瑞典] J.赖德伯格 著

仲 吉 译

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

国防科工委印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 · 新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16 · 印张31.5 · 字数773千字

1988年11月北京第一版 · 1988年11月北京第一次印刷

印数 1-800

统一书号: 15175.771 定价: 11.00元

ISBN 7-5022-0071-1 /O·9

内 容 简 介

核化学知识目前已成为许多科学技术领域必不可少的研究工具，这些领域包括：环境科学、化学和工艺学（示踪法、活化分析、工业控制计量等）、医学（放射性药剂、核医学、放射免疫检定等）、地质学以及考古学（放射性年代测定）。

本书虽然是为大专院校化学和化工系学生编写的一本教科书，但是因为作者采取核化学的最广泛的含义，所以内容十分丰富。其基本理论部分涉及核物理、放射化学、同位素化学、辐射化学等学科。在核化学应用方面，除包括核燃料循环全过程如铀的回收、同位素分离、燃料元件中的反应、燃料元件后处理、废物处理和堆材料辐照效应外，还有放射性同位素生产、辐照处理和食品辐照保藏，以及辐射防护和遥控技术方面的内容。

本书可供化学、化工、环境科学、医学、地质学、考古学等领域需了解核化学知识的科技人员，以及大专院校有关专业师生参考。

前 言

“核化学”这一术语并没有一个公认的定义。在本教科书中，我们取核化学的最广泛的含义，把它看作是源于物理学、生物学和化学的一门中间学科。其基本方面包括：(i)核反应和能级；(ii)放射性衰变的类型和动力学；(iii)放射性元素的形成和性质；(iv)各同位素对化学和物理性质的影响；(v)物质的核辐射效应。(i)、(ii)两个方面的研究，就其目的和实际情况来说，往往与核物理中的研究无法区别，尽管对核化学家来说化学技术可能起主要的作用。(iii)、(iv)方面可划入放射化学和同位素化学类，而(v)则归类于辐射化学。

核化学的应用方面，除包括核燃料循环的所有方面如铀的回收、同位素分离、燃料元件中的反应、燃料元件后处理、废物处理和反应堆材料的辐照效应外，还涉及放射性同位素的生产、辐照处理和食品辐照保藏等。辐射防护问题和遥控技术是另外一些重要的领域。

核化学知识在许多科学技术领域的研究、发展和控制方面都是必不可少的工具。这些领域包括：化学和工艺学(示踪法、活化分析、工业控制计量等)，医学(放射性药剂、核医学、放射免疫检定等)，地质学，以及考古学(放射性年代测定)。

在欧洲和美国讲授核化学课程，历来都是主要根据Haissinsky(1964)，Friedlander、Kennedy和Miller(1964)，Lieser(1969)，Harvey(1969)以及Mckay(1971)等人编写的几本内容广泛的极好的教科书，另外还有一些篇幅较小的书，例如Carswell(1967)、本书作者(Choppin, 1961；Rydberg, 1966)以及其他人的书。自从这些书写成之后，核科学和工艺学已取得显著的进展，并且对大多数国家来说已成为重要的科学领域，这就产生了更新教科书的需要。我们希望本书在一定程度上能满足这种需要。本书与以前的书的不同之处，在于更加强调化学家在核能领域内的作用。另外，与以前的教科书相比，我们更全面地阐述了辐射危险和防护问题。欧洲的核化学课程似乎比较强调放射化学，而在美国则倾向于把重点放在核物理方面。我们试图在本教科书中除介绍工艺问题外把这两个方面概括起来。

我们希望本教科书既可用于大学高年级学生的课程，又可用于研究生课程。为了实现这个双重目标，我们打算写得简明些，概括多方面的课程，但在基本概念和实用课题的细节方面仍有适当的深度和完整性。数学则尽量简化。本书的重点是以少数说明性的例子来介绍原理，而不是罗列各个领域内的大量事例；汇集这些事例的文章并不难找到(例如在国际原子能机构的会议文集中就有)。尽管教师可以从本书中选择他认为对他所教的某一课程最重要的章节，我们还是推荐了适用于短期课程的简化内容：在每章的目录中，我们认为对这种课程可以省略的章节都记有星号。不管是短期课程还是全书内容，作者都教过。根据讲课的重点和课程的长短，除了书中标出可省略的章节之外，完全可能再删除一些内容。例如着重放射化学的课程可略去第6和第9章；着重核物理方面的短期课程则应保留这两章而可略去第16和第20章。

在每章的后面都有习题和参考书目。在这些习题中，我们试图选择一些对前面讲过的内容有代表性的问题。如果只编写少数综合习题，许多学生会感到比较难于求解，我们倾向于给出一些仅涉及较少课文的习题。

每章的参考书目包括最近的出版物、教科书和论文，这些参考书可引导学生在该领域内进行更深入的探讨。其中不包括为课文所必需的引证资料，尽管直接推荐了文献中的一些图表。此外，在附录A中提出了一个包括丛书、杂志和参考表册的更普遍的书目。

在附录中我们还给出了一些我们认为不在一般核化学教科书范围之内而对本书的许多读者来说又很有用的资料。蒙W.Seelmann-Eggebert教授允许，我们在附录N中引用了同位素表。

本书采用SI单位制；为便于阅读老的文献或技术文献，有时也用导出单位（或cgs单位）。只在两个特殊情况中我们离开了上述原则：我们用每摩尔的克数表示分子量，以及在一般情况下用居里表示放射性。

许多朋友和同事在讨论问题、阅读手稿、检查习题、内容编排等方面给予我们帮助。为此，我们对Lehna Andersson、Karin Brodén、Hubert Eschrich、Ingela Hagström、Kurt Lidén、Jan-Olov Liljenzin、Siv Johnson、Ulla Olofsson、Gunnar Skarnemark、Ingvor Svantesson、Stig Wingefors、Göran Persson、Heino Kipatsi、Nils-Göran Sjöstrand、Erik Hellstrand、Sue Eaker、Becca James、Patricia Baisden、Eva Jomar以及我们在查默斯工科大学和佛罗里达州立大学学习核化学课的学生表示感谢。本书编写多年，在此期间我们的妻子Britta和Ann给予充分谅解，对此我们是非常感激的。

瑞典哥德堡

美国佛罗里达州塔拉哈西

目 录

前言	I
1. 核科学的起源	1
2. 原子核和同位素	10
3. 核质量和稳定性	27
4. 放射性衰变	39
5. 宇宙辐射和基本粒子	62
6. 原子核结构	74
7. 核反应: I. 能量关系	98
8. 加速器和中子源	110
9. 核反应: II. 机制与模型	123
10. 放射性核素的生产	137
11. 热核反应和核起源	156
12. 天然存在的放射性元素及其消失的部分放射性	176
13. 合成元素	194
14. 核辐射的吸收	211
15. 辐射对物质的影响	239
16. 放射生物学和辐射危害	259
17. 核辐射的探测和测量	288
18. 放射性示踪剂的应用	318
19. 核链式反应	346
20. 辐照核燃料的处理	394
21. 核动力: 问题和前途	442
附录A 文献	455
附录B 化学平衡中的同位素效应	458
附录C 化学动力学中的同位素效应	462
附录D 委托浓缩和分离功	464
附录E 从实验室系到质心系的变换	466
附录F 供应浓缩稳定同位素和放射性同位素的厂商	467
附录G 关于圆形样品几何效率的计算	469
附录H 轻水堆废物中的裂变产物和锕系元素	471
附录I 核电站及其对核燃料循环服务的需要	481

附录J	核燃料循环费用	487
附录K	已建成和计划建设的后处理厂概况	488
附录L	一些与核有关的机构的通用缩写	489
附录M	习题答案	491
附录 I	元素周期表	封二
附录 II	量和单位	494
附录 III	基本常数	495
附录 IV	能量单位换算系数	496

第1章 核科学的起源

目 录

1.1 原子理论的由来	1
1.2 放射性元素	2
1.3 放射性衰变	3
1.4 同位素的发现	4
1.5 放射性衰变系	5
1.6 原子模型	6
1.7 小结	6
1.8 文献	8
1.8.1 近代普通读物	8
1.8.2 核化学经典著作	9

1.1 原子理论的由来

在公元前六世纪，希腊哲学家泰勒斯提出一种理论，认为宇宙万物都是由不同形态、不同浓度和不同结合方式的水所组成的。大约一百年后，恩培多克勒进一步发展了泰勒斯的想法，提出实际上有四种元素：土、空气、火和水。另一些希腊哲学家如留基伯和德谟克利特在公元前五世纪提出物质是由一些不可分割的实心小球组成，这些小球被称为原子，而原子在希腊文中的含义就是“不可打碎的”。好几个世纪以来，有关物质性质的另外一些理论也得到发展。这些关于物质性质的想法，直到十七、十八世纪归纳实验法提供了更为可靠的推测基础之前，却一直没有得到更进一步的发展。

在1661年，R·波义耳(1627—1691)在他《持怀疑论的 chemist》一书中写道，元素可定义为不能破碎成更简单的物质因而具有最终简单性的一种物质。按照他的观点，自然界所有的复杂物质都是由少数元素以各种组合方式构成的。在十八世纪后叶，A·拉沃依西尔在澄清了定量实验法的价值时，才开创了现代化学时代。他也编纂了一张包括31种物质的元素表。后来证明其中只有26种是真正的元素，其余5种是金属氧化物。

基于对某些物质具有元素性质的认识和以定量实验法为根据的质量守恒定律的陈述，化学迅速发展到更加完善的原子理论表示法，这种表示法是由J·道尔顿(1766—1844)在十九世纪初提出的。经过A·M·安培(1775—1836)、A·阿伏加德罗(1776—1856)、J·J·伯齐利厄斯(1779—1840)和J·L·盖吕萨克(1778—1850)等化学家和物理学家的努力，新的元素得到鉴定，而更重要的是元素和化合物之间的区别变得清楚了。以气体的压力、温度、热导率、粘度等起因于运动原子的假定为依据的气体分子运动论的发展(R·克劳修斯1822—1888, L·波尔兹曼1844—1906)，使估计气体原子大小(10^{-9} — 10^{-10} m, J·洛史密特1865)

及其近似重量 (10^{-26} — 10^{-27} kg) 成为可能。由此可以算出每原子量单位的原子 (或分子) 数 (阿伏加德罗数)^①。由于M.法拉第 (1791—1867) 和D.门捷列夫 (1834—1907) 等其他科学家的的工作, 十九世纪成为人类探索物质性质进程中的一个富有成果的时期。

在十九世纪最后25年中, J.J.汤姆逊 (1856—1940) 和其他一些人的实验说明, 原子是不可分割的实体的想法不能解释许多现象, 这些现象使人想到原子中存在着电荷或电子。汤姆逊提出了一个“葡萄干布丁”模型; 按照这个模型, 负电子是嵌在一个正电荷球中。然而这个模型多有不当, 因而从未得到科学上的广泛承认。本世纪初H.贝可勒尔和E.卢瑟福的若干发现又在原子性质方面增添了新的混乱。

1.2 放射性元素

1895年W.伦琴发现当阴极射线 (即电子) 轰击抽空玻璃管的管壁时, 它引起管壁材料发射可见光 (发荧光), 同时也产生一种穿透力很强的辐射。那时给这种辐射起了个名字——X射线。一直对物质荧光谱感兴趣的H.贝可勒尔知道了这件事后, 立即决定研究某些盐在阳光下发出的荧光是否也有发射X射线的可能性。他把硫酸铀酰钾晶体放在用黑纸包裹的照象底板的上面, 然后把这些东西一起曝露在阳光下。在一些照相底板显影以后, 贝可勒尔由晶体位置下面出现的黑斑得出错误的结论: 晶体的荧光引起X射线的发射, X射线穿透黑纸使照相

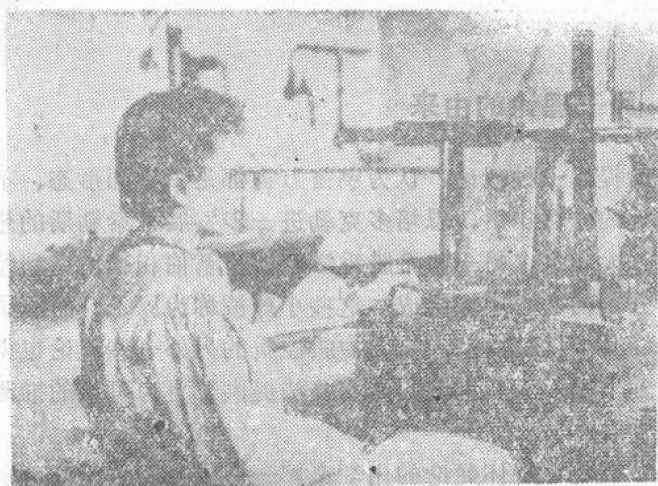


图1.1 玛丽·居里在巴黎她的实验室中用静电计测量由铀子体产物引起的电离

她1867年出生于华沙, 姓斯克罗多夫斯卡, 1909年在索邦成为教授。她与亨利·贝可勒尔以及她的丈夫皮埃尔·居里一起, “因共同研究亨利·贝可勒尔教授发现的辐射现象所取得的非凡成就”而荣获1903年诺贝尔物理学奖金。她还“因在发现元素镭和钋及分离镭而推动化学的发展, 以及研究这些不寻常的元素的性质及其化合物方面所取得的成就”荣获1911年诺贝尔化学奖金。(1905年前后的照片。)

底板变黑。然而贝可勒尔随即发现, 引起底板变黑的辐射不是“一种太阳能的变换”, 因为即使这些东西不曝露于光中, 照相底板仍然发生了变黑现象; 这种铀酰盐显然自发地产生了辐射。这种辐射最初称作贝可勒尔射线, 后来定名为放射性辐射 (或简称放射性)^②, 它与X射线类似, 也能引起空气的电离, 就象验电器放电时所观察到的现象一样。

玛丽·居里 (图1.1) 随后证明, 所有的铀化合物都产生电离辐射, 而与这种盐的化学组成无关。这就令人信服地证明辐射是元素铀的一种属性。她进一步观察到某些铀矿物, 如沥青铀矿, 比纯铀化合物产生了更强的电离辐射。她写道: “根据这一现象可以假定, 这些矿物含有放射性比铀强得多的元

① 阿伏加德罗数 ($N_A = 6.022 \times 10^{23}$) 定义为克原子 (或分子) 量所需的克数中所含有的原子 (或分子) 数目。此数称为1摩尔。

② “放射性”一词不仅指这种现象本身, 也指所观察到的辐射的强度。

素。”她和她的丈夫皮埃尔·居里开始精心提纯沥青铀矿，在每一沉淀分离步骤之后都测定溶液中和沉淀物中的辐射量。这些最初的放射化学研究是非常成功的：“在进行这些操作时，得到了一些放射性更强的产物。最后我们得到一种放射性比铀大400倍的物质。因而我们相信，我们从沥青铀矿中分离出来的这种物质是一种从未为人所知的金属。如果能够证实这种金属的存在，我们建议把它叫做钋”。在1898年报道钋的发现的出版物中，第一次使用了“放射性的”(radioactive)一词。还可以指出，同一元素也被W.马克沃德同时独立地发现了，他把它叫做“放射性碲”。

同年，居里夫妇与G.贝芒特一起分离出另一种放射性物质，他们建议把它称作镭。为了证明钋和镭实际上是两种新元素，他们处理了大量的沥青铀矿。在1902年，玛丽·居里宣称她已经能够从1吨多的沥青铀矿废物中分离出大约0.1克纯氯化镭。镭原子量的测定及其发射光谱的测量是这种新元素被分离出来了的最终证明。

1.3 放射性衰变

W.克鲁克斯和贝可勒尔在研究铀的放射化学性质时有一重要发现。在从含铀酰离子的溶液中沉淀碳酸盐时，他们发现虽然铀以可溶碳酸铀酰络合物的形式留在澄清液中，而不含铀的沉淀物中却存在着与铀相关联的放射性。此外，沉淀物的放射性随时间缓慢减少，而澄清液的放射性在同一时间内却在增加(图1.2)。我们现在知道，当时所做的这一放射性测量仅测了 β 和 γ 辐射，而没有测量铀直接发射的 α 辐射。

卢瑟福(图1.3)和F.索迪在研究钍的放射性时也得到类似结果。后来，卢瑟福和F.E.

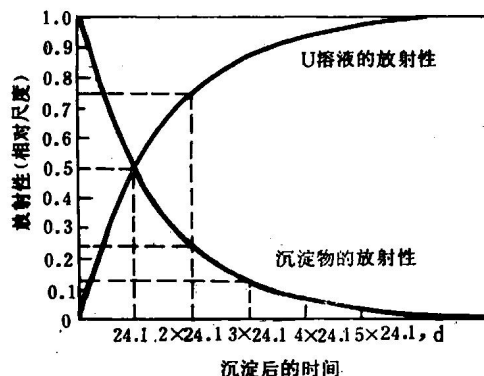


图1.2 由碳酸盐沉淀物和澄清铀溶液测出的放射性变化
即由母体放射性元素铀中分离出子体元素UX(Th)。

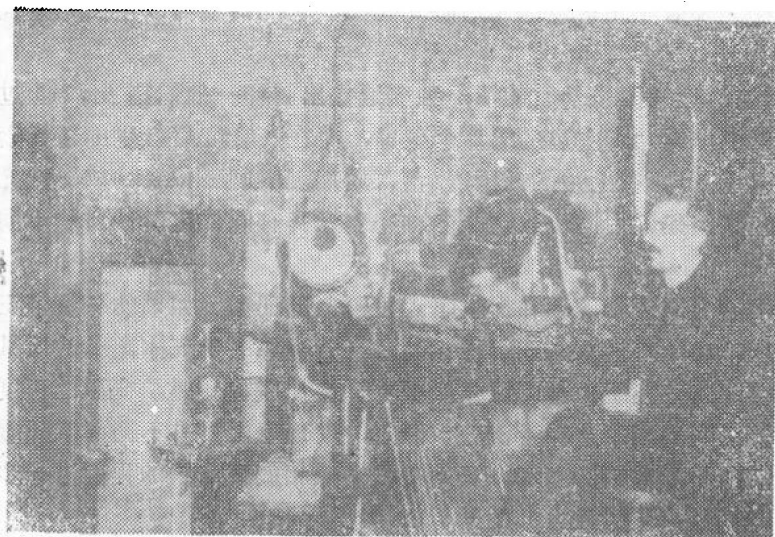


图1.3 1906年欧内斯特·卢瑟福在蒙特利尔大学的地下室内图中仪器为 α 测量设备。卢瑟福1871年生于新西兰的纳尔逊。1919年成为剑桥卡文迪许实验室的负责人，1908年“因他在元素衰变和放射性物质化学方面的研究”而获得诺贝尔化学奖金。

多恩发现能从铀盐和钍盐中分离出放射性气体(射气)来。在把气体由盐中分离出来之后，气体的放射性随时间减少，而盐中新放射性以类似图1.2所示的方式增加。发现盐中放射性随时间增加的速率与化学过程、温度等完全无关。卢瑟福和索迪从这些观察结果得到的结论是：放射性是由于原子本身内部的变化所引起的。他们提出，在发生放射性衰变的时候，原来元素(例如U和Th)的原子

转化为新元素的原子。

有放射性的元素称为放射性元素。因为这些放射性元素没有名字，所以就把 X, Y, Z, A, B 等字母加到主元素（即母体元素）符号上来表示。这样，UX 就是由铀的放射性衰变产生的，ThX 是钍的放射性衰变产生的，等等。这些新的放射性元素（UX, ThX 等）具有不同于原来母体元素的化学性质，可利用沉淀、挥发等化学过程从母体元素中分离出来。放射性的子体元素继续衰变，又形成另外的元素，其符号记作 UY, ThA 等。一个典型的衰变链可写作： $Ra \rightarrow Rn \rightarrow RaA \rightarrow RaB \rightarrow$ 等等。

对这些放射性元素所发出的射线所作的认真研究，证明这些射线由三种成分组成，它们分别被命名为 α , β 和 γ 。当时证明 α 射线就是氦离子，而 β 射线就是电子。 γ 射线具有同 X 射线一样的电磁性质，只是能量更高。发现对于一种特定的放射性元素，其单位重量的放射性衰变率都是固定不变的，而与其化学状态或物理状态无关，尽管不同的放射性元素其衰变率有很大的差别。衰变率可用术语半衰期来表示，半衰期是放射性元素的放射性衰变为其初始值的一半所用的时间。发现不同放射性元素的半衰期相差悬殊，由若干分之一秒到几百万年，例如 ThA 的半衰期是 0.1 秒，UX 是 24.1 天（图 1.2），而铀是几百万年。

1.4 同位素的发现

在 1910 年以前，根据化学性质、辐射性质和特征半衰期的不同，鉴别出了大约 40 种不同的化学单质。研究放射性单质衰变中的亲缘关系发现，这些放射性元素可以分为三个不同的系。其中两个系起源于铀，第三个起源于钍。B. 博尔特伍德发现这三个系全都终止于同一种元素——铅。

当时摆在科学家们面前的一个主要困难，是周期表中在铅和铀之间只有 11 种元素的位置，而从铀到铅的衰变系中却已知有大约 40 种放射性同位素。除了这个矛盾之外，还发现在许多情况下不可能用普通化学技术把某些放射性元素彼此分开。例如，发现放射性元素 RaD 的化学性质与铅完全一样。同样，放射性元素镭的光谱研究表明，它的谱线与以前由元素钍得到的谱线完全相同。

在 1913 年，K. 法简斯和索迪对这些似乎矛盾的情况独立地作出解释。他们指出，通过 α 衰变产生的新元素位于周期表中母体元素左边的第二个位置，而在 β 衰变后产生的新元素在母体元素右边的第一个位置（见图 1.4 右上角的插图）。落入周期表中同一位置的放射性元素，其化学性质是完全一样的。索迪建议用同位素这个名称来表示具有同样化学性质的不同的放射性单质。

J. J. 汤姆逊进行的研究紧接着为同位素的存在提供了无可辩驳的证据。如果使一束带正电荷的气体离子通过电场或磁场，离子将沿双曲线行程运动，其行程取决于气体离子的质量和电荷（见图 2.1 和相应的正文）。这些离子束打到照相底板上，会使底板变黑，变黑的程度正比于打到底板上的离子数目。汤姆逊利用这种方法分析氦气，发现氦由具有不同原子质量的两种原子组成。这两种同位素的质量数是 20 和 22。汤姆逊根据照相底板变黑的程度进一步算出氦中质量数为 20 的原子约占 90%，质量数为 22 的原子占 10%。

这样，一种化学元素可由几种质量不同但化学性质相同的原子组成。40 种放射性元素实际上不是 40 种不同的元素，而是由铅到铀的 11 种不同化学元素的同位素。

	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	
232										Th, α 1.41·10 ¹⁰ y				
228	钍系								MsTh ₁ , β 5.8y	MsTh ₂ , β 6.13h	RdTh, α 1.90y			
224	质量数 A=4n								ThX, α 3.64d					
220							Th, α 55.6s							
216				ThA, α, β 0.15s	²¹⁶ At, α 3·10 ⁻⁶ s									
212		ThB, β 10.6h	ThC, α, β 60.5m	ThC', α 30·10 ⁻⁷ s										
208	ThC'', β 3.1m	ThD 稳定												
237													²³⁷ Np, α 2.44·10 ⁶ y	
233	镭系											²³³ Pa, β 27.0d	²³³ U, α 4.47·10 ⁹ y	
229	质量数 A=4n+1												²²⁹ Th, α 7340y	
225								²²⁵ Ra, β 14.8d	²²⁵ Ac, α 10.0d					
221								²²¹ Fr, α 4.8m						
217					²¹⁷ At, α 0.032s									
213			²¹³ Bi, α 40m	²¹³ Po, α 4.2·10 ⁻⁶ s										
209	²⁰⁹ Tl, β 2.2m	²⁰⁹ Pb, β 3.2h	²⁰⁹ Bi 稳定											
238	铀系													
234	质量数 A=4n+2													
230														
226									Ra, α 1600y					
222														
218														
214														
210														
206														
235	锕系													
231	质量数 A=4n+3													
227														
223														
219														
215														
211														
207														

图1.4 三个天然放射性衰变系和人工镭系

虽然²³⁹Pu (锕系的母体) 和²⁴⁴Pu (钍系的母体) 已在自然界中发现, 但这显示出的衰变系是以丰度最大的长寿命核素开始的。

1.5 放射性衰变系

为了表征一种元素的一种特定同位素, 把原子序数 (即元素在周期表中的顺序、号数或位置) 写在该元素符号的左下角, 把质量数 (即以原子质量单位表示的中性原子质量的最接近的整数值) 写在左上角。这样, 铀的质量数为238的同位素被记作²³⁸U。同样, 镤的质量数为234的同位素记作²³⁴Pa。对于 α 粒子, 我们用希腊字母 α 或用⁴He表示。类似地, β 粒子或记

作希腊字母 β ，或采用符号 ${}_{-1}^0e$ 表示。下文我们将讨论一种发射正电子的 β 衰变形式，正电子的符号记作 ${}_{+1}^0e$ 或 β^+ 。 γ 衰变既不引起衰变核的质量数改变，又不引起原子序数改变，它的符号是希腊字母 γ 。

在放射性衰变中，质量数和原子序数都是守恒的。这样在 ${}^{238}_{92}\text{U}$ 衰变链中的前两步可写作



在这样一种衰变链中，常常把放射性衰变的半衰期($t_{1/2}$)表示在箭头的上面或下面。一般常用一种更简单的表示法：

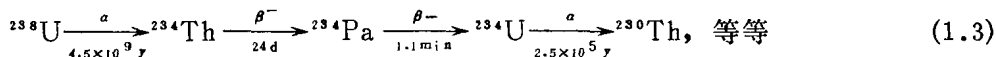


图1.4示出三个天然放射性衰变系，这就是大家知道的钍系、铀系和锕系。图中也表示出起源于人工元素镎的第四个系。这个系在地球上找不到的，因为系中的放射性同位素在很久以前就衰变完了。图1.4同时给出了同位素的目前符号和历史（即“放射性元素”）符号。注意，这些系都遵从法简斯和索迪定则，即 α 衰变使原子序数减少2，质量数减少4，而 β 衰变质量数不变，只有原子序数增加1。另外，我们会发现在这些系中经常出现的一种模式，即每次 α 衰变之后，接着就发生两次 β 衰变。

1.6 原子模型

不管是放射性衰变还是同位素的发现，都没有提供原子内部结构的情况。原子内部结构的信息是由散射实验得到的。在此实验中，使薄金属箔这样的物质受到 α 粒子束的照射，然后测量散射到不同角度的粒子的强度（通过记录打到荧光屏上的散射粒子闪光点的数目来测量，见图7.7）。当时假定粒子的偏转是由受辐照物质原子的碰撞引起的。有一些 α 粒子发生角度大于 90° 的强烈偏转。虽然这种大角反射十分稀少，大约8000个粒子才有一个，但它们是出乎意外的，并且不能用汤姆逊的“葡萄干布丁”原子模型加以解释。卢瑟福在1911年思考了这些稀有事件，并得出结论：原子的全部正电荷必须集中在一个很小的体积内，其直径约为 10^{-14}m 。他把原子的这一小部分称作原子核。卢瑟福能够算出：要是全部正电荷和几乎全部原子质量都集中在原子核内，那么当 α 粒子在靠近原子核的地方通过时，就可能引起大角散射（见有关图7.7的文字说明）。原子中电子的质量比原子核小得多，并假定这些电子围绕着原子核。包括外部（环行）电子的整个原子，其半径约为 10^{-10}m ；相比之下，计算出的原子核半径就小得多。

不久就证明，原子核的正电荷数与表明一种元素在门捷列夫周期表中的位置的原子序数是一致的。如此就得出结论，在一个中性原子中，带正电荷的小原子核被若干电子所围绕，电子的数目等于原子核的总正电荷数。在1913年，N.波尔利用量子力学概念才可能提出一个至今在原则上仍然有效的原子模型。

1.7 小结

从卢瑟福的散射实验以来，我们对原子核的了解迅速增加。核科学发展史中的一些重要事件列于表1.1。在后面的章节中将讨论其中许多发现及其实际后果。

现在我们知道原子核是由中子和质子组成的，它们可被描述为处于不同的能级，或者说

是不同的轨道。这种轨道与原子中的电子轨道类似。这些中子和质子由一种很强的短程引力结合在原子核中。此短程引力据信是源自核子间被称作介子的亚核粒子的交换。这一核结合力模型可类比于分子的共价键。

表1.1 核科学发展大事记

1896	贝可勒尔发现来自铀的辐射(放射性)。辐射强度通过它引起的空气电离或通过辐射打在荧光屏上所观察到的闪烁现象进行测量。
1896—1905	克鲁克斯、贝可勒尔、卢瑟福、索迪、多恩、博尔特伍德等发现放射性衰变是形成不同放射性元素的一种原子转变。这些放射性元素传代联接成放射性衰变系。
1898	皮埃尔与玛丽·居里发现镭和钋; 建立第一批放射化学方法。
1898—1902	皮埃尔·居里、德比尼、贝可勒尔、丹劳斯等发现辐射影响化学物质, 并引起生物损伤。
1900	维拉德和贝可勒尔提出 γ 辐射具有电磁性质; 1914年由卢瑟福和安德雷德最后证明。
1900	贝可勒尔证明 β 射线就是电子。
1902	皮埃尔与玛丽·居里和德比尼分离出第一批宏观数量的放射性元素(镭)。
1903	卢瑟福证明 α 辐射是电离的氦原子。
1905	爱因斯坦用公式表示质能等价定律。
1907	斯坦贝克用镭作了第一次治疗处理, 并治愈皮肤癌。
1911	卢瑟福、盖革和马斯登从薄金属箔对 α 辐射的散射的测量得出结论: 原子包含一个非常小的正核。
1912	赫维西和帕内思第一次应用放射性示踪元素, 用RaD测定了PbCrO ₄ 的溶解度。
1912	威尔逊发明云室, 使核粒子的径迹成为可见的。
1913	赫斯发现宇宙射线。
1913	法简斯和索迪用同位素存在的假定解释了放射性衰变系。汤姆逊用氩离子在电磁场中的偏转证明了这一点。阿斯顿用气体扩散法分离了氮的同位素。
1913	N. 波尔证明原子核被有固定轨道的电子包围着。
1919	卢瑟福在实验室中第一次实现核转变, ${}^4\text{He} + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{17}\text{O} + {}^1\text{H}$ 。
1919	阿斯顿制成第一台实用粒子质谱仪, 同时发现同位素重量并不精确地为整数。
1921	哈恩发现同质异能素: ${}^{234\text{m}}\text{Pa}(\text{UX}_2) \xrightarrow{1.2\text{min}} {}^{234}\text{Pa}(\text{UZ})$ 。
1924	德布罗意提出所有运动的粒子都具有波动性的假设。
1924	拉卡萨尼和拉特斯在生物学研究中应用放射性示踪元素(镓)。
1925—1927	波尔原子模型的重要改进: 泡利不相容原理, 薛定谔波动力学, 海森伯测不准关系。
1928	盖革和弥勒制成第一个用于单个核粒子测量的盖革-弥勒管。
1931	范德格喇夫研制了把原子离子加速到高能静电高压发生器。
1932	科克罗夫特和沃尔顿研制了高压倍加器, 并用它在实验室中第一次实现以加速的粒子进行的核转变 ($0.4\text{MeV} {}^1\text{H} + {}^7\text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He}$)。
1932	劳伦斯和利文斯顿建造了第一台回旋加速器。
1932	尤里发现了氘, 并通过液氢的蒸发实现了同位素浓缩。
1932	查德威克发现中子。
1932	安德森通过用云室研究宇宙射线, 发现正电子 e^+ 或 β^+ 。
1933	尤里和里顿伯格证明化学反应中的同位素效应。
1934	约里奥与伊伦·居里发现人工放射性: ${}^4\text{He} + {}^{27}\text{Al} \rightarrow {}^{30}\text{P} + \alpha$; ${}^{30}\text{P} \xrightarrow[2.5\text{min}]{\beta^+} {}^{30}\text{Si}$ 。
1935	汤川预言介子的存在。
1935	魏茨塞克导出半经验质量公式。
1937	内德迈耶和安德森利用照相底片在宇宙射线中发现 μ 介子。
1938	贝蒂和魏茨塞克提出在星球中通过核聚变 ${}^3\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$ 产生能量的第一个理论。
1939	哈恩和斯特拉斯曼发现铀在中子辐照后发生裂变。
1940	麦克米伦、艾贝尔森、西博格、肯尼迪和沃尔生产了第一批超铀元素——镎(Np)和钚(Pu), 并发现 ${}^{239}\text{Pu}$ 是易裂变的。
1940	许多国家的科学家证明慢中子引起 ${}^{235}\text{U}$ 的裂变, 但 ${}^{232}\text{Th}$ 和 ${}^{238}\text{U}$ 仅可由快中子引起裂变; 每次裂变产生 2—3 个中子, 同时放出大量的能。有几个国家考虑了生产核武器和建造核电站的可能性。
1942	费米及其合作者建成第一座核反应堆(12月2日临界)。
1944	美国橡树岭第一次生产了克量的人工元素(Pu), 1945年美国汉福特生产了千克量的钚。
1944	麦克米伦和维克斯勒发现同步加速器原理, 使建造能量大于1000MeV的加速器成为可能。

1940—1945	奥本海默及其合作者研制了一个能产生快速不可控链式反应并放出巨大能量的装置。1945 年在美国阿拉莫戈多的首次试验产生了相当于20000吨TNT炸药的能量；接着就在日本使用了原子弹。
1944—1947	研制出光电倍增管闪烁探测器。
1946	利比发明测定年代的 ¹⁴ C方法。
1950	迈耶、哈克塞尔、詹森和休斯提出核壳层模型。
1951	美国阿贡国立研究所研制了第一座增殖反应堆，同时利用该堆首次发出电能。该堆建在爱达荷州。
1952	美国试验第一个不可控的大型聚变装置（氢弹）。
1953—1955	A. 波尔、莫特森和尼尔森提出核的统一模型（单粒子对集体运动的影响）。
1955	张伯伦、西格瑞、威甘德和伊普西兰蒂斯取得反质子。
1955	第一艘核动力船（“鹦鹉螺号”核潜艇）。
1954—1956	一座电功率为5MW的核电站于1954年在苏联奥布宁斯克投入运行。第一座大型民用核电站（45MW 电功率）于1956年于英国卡德豪尔投入运行。
1959	采用第一座民用船舶反应堆的“列宁号”破冰船在苏联下水。
1961	一种放射性核素（ ²³⁸ Pu）用作人造卫星电源（Transit-4A）
1961	半导体探测器研制成功。
1969	苏联科学家在托卡马克聚变反应堆中得到稳定的高密度等离子体。
1972	美国巴塔维亚国立加速器研究所的加速器得到300GeV能量的质子（1976年提高到500GeV）。
1974	法国科学家在加蓬的奥克劳发现古代天然核反应堆。
1955	成立“联合国原子辐射效应科学委员会”（UNSCEAR）。
1957	成立“国际原子能机构”（IAEA），总部设在维也纳。
1963	禁止在大气层、外层空间和水下进行核武器试验的部分禁试条约 ^① 。
1968	由“三个受委托政府”（苏、英、美，都是有核武器国家）和40个其他签约国（都是无核武器国家）签订防止核武器扩散条约 ^② 。
1971	国际原子能机构负责控制无核武器国家裂变材料的安全监督体系。

① 中国政府声明反对这一条约。——译者注

② 中国政府未参加并反对这一条约。——译者注

裂变的发现产生了核武器，并开辟了一个全新的能源，而放射性同位素的应用使科学研究的几乎每个实验领域都得到重大改进。名目繁多的基本粒子和反粒子，要求我们对于从原子核到整个宇宙的自然界的基础作出新的解释。然而虽说取得这一知识进步，从本书以后各章节中可以看出还有许多本质问题尚待弄清。我们仍然必须用几种不同的核模型来解释核状态的不同方面。核力的性质不能用目前的理论加以适当描述，而我们对亚核粒子的性质和作用也没有满意的了解。在过去80年内，核科学不仅在我们对物理世界的认识方面引起一场革命，在我们的日常生活中也是如此。在今后80年内，核科学很可能会使我们对自然的了解更加深入，并给人类社会带来更大的利益。

1.8 文 献

1.8.1 近代普通读物

- R. T. BEYER, *Foundations of Nuclear Physics*. Dover Publ. Inc., New York, 1949.
 E. FARBER, *The Evolution of Chemistry*. Ronald Press, New York, 1952.
 L. FERMI, *Atoms in the Family*, University of Chicago Press. Chicago, 1954.
 B. RUSSEL, *Wisdom of the West*. McDonald, London, 1959.
 R. G. HEWLETT and O. E. ANDERSSON Jr., *The New World*. 1939 1946 (volumel of a *History of the U.S. A.E.C.*). Pennsylvania State University Press, University Park, 1962.
Nobel Lectures, Chemistry, and Nobel Lectures, Physics. Elsevier. Amsterdam, 1966 and later.
 S. GLASSTONE, *Source Book on Atomic Energy*, van Nostrand, New York, 1967 (3rd edn.).
 J. R. PARTINGTON, *A History of Chemistry*. Macmillan. London. 1970.
 G. T. SEABORG, *Nuclear Milestones*. W. H. Freeman. San Francisco, 1972.

1.8.2 核化学经典著作

- M. CURIE, *Traite' de Radioactivite'*, Paris, 1910; *Radioactivite'*. Hermann. Paris, 1935.
S. MEYER and E. SCHWEIDLER, *Radioaktivität*, Leipzig, 1927.
E. RUTHERFORD, J. CHADWICK, and C. D. ELLIS, *Radiations from Radioactive Substances*. Cambridge University Press, 1930 (reprinted 1951).
O. HAHN, *Applied Radiochemistry*, Cornell University Press, 1936.
G. HEVESY and F. A. PANETH, *A Manual of Radioactivity*, Oxford University Press, 1938.
G. T. SEABORG, *The Transuranium Elements*, Yale University Press, New Haven. 1958.
G. HEVESY, *Adventures in Radioisotope Research*, Pergamon Press. Oxford, 1962.
O. HAHN, *A Scientific Autobiography*, Charles Scribner's Sons. New York, 1966.

[姜樾 译]