

735311

高等学校试用教材

核地球物理勘查方法

曹利国 主编

章 晔 审校

原子能出版社

内 容 简 介

本书是为高等院校勘查地球物理专业编写的教材。介绍以 X 射线荧光方法和中子活化分析方法为主的核地球物理勘查方法。本书共分六章,分别讲述基础知识、X 射线荧光方法和中子活化分析方法的原理和应用,以及数据处理问题等。

本书可供从事核物探工作和核技术应用的科研、生产人员和有关专业的学生、研究生参考。

* * *

本书由章晔审校。经放射性地质教材委员会放射性物探课程组于 1989 年 3 月由李树敏、贾文懿主持召开的审稿会审定,同意作为高等学校试用教材。

高等学校试用教材
核地球物理勘查方法
(初版)

曹利国 主编
周蓉生 编著
章 晔 审校

原子能出版社出版
(北京 2108 信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 850×1168 1/32·印张 10·字数 269 千字 插页 1
1991 年 11 月北京第一版·1991 年 11 月北京第一次印刷

印数 1—1500

ISBN7-5022-0450-4

P·18 (课) 定价: 3.20 元

前 言

本书是为高等院校勘查地球物理专业编写的教材。1983年,原核工业部教育司曾组织有关专家讨论过教材的主要内容。近年来,在教学改革中,学时安排、教学内容都有较大变化。参照有关意见和实际情况完成了这一教材的编写工作。

核地球物理勘查方法是近20年迅速发展起来的一门边缘学科。它实际上是将人工放射性方法或核技术用于地质及采矿、冶金等方面,以解决有关元素含量及分布等问题。近10多年来,我国科学工作者广泛开展了这一类方法的研究和应用,并取得了可喜的成果。本书将全面介绍这一方法的基本知识、特点、实际操作,并尽量采用我国科学工作者近年取得的新资料来说明方法的应用效果和前景。为了开阔学生的眼界和拓宽专业面,还收集了一些在其他领域中应用的实例。

讲授这一门课程约需要40学时(不包括实验)。课程应在高年级讲授,因为学好它需要利用基础课、专业基础课和天然放射性勘探方法、放射性勘探仪器等专业课学过的知识。

本书第一章介绍基础知识;第二、三、四章讲解X射线基本理论和X射线荧光方法,这是本书的重点之一,尤其是基体效应问题必须详细讲解,因为选择基体效应校正方法是否得当直接影响X射线荧光方法的应用效果;第五章内容是中子活化分析,这也是本书的重点之一,我们从概念出发,详细讲解其原理和工作方法;第六章讨论如何进行数据处理问题。

本书第一、二、三、四章由曹利国编写,第五、六章由周蓉生编写。编写过程中,我们得到了各方面的支持和帮助。贾文懿教授、李树敏副教授、龙先灌副教授、石玉春副教授、杨乐山高级工程师详细审阅

了书稿并提出了宝贵意见。章晔教授作为审校者,详细审读了书稿,并逐字逐句提出意见,为提高书稿质量付出了艰辛的劳动,在此深表谢意。

由于作者知识水平有限,对某些问题的认识肤浅,书中会有不少错误,请读者、专家不吝指正,以便在再版时得到更正。

作者

1989年5月

目 录

前 言

第一章 基础知识	(1)
第一节 核地球物理勘查方法的内容和特点	(1)
第二节 原子核	(3)
一、原子核的组成	(3)
二、原子核的结合能	(4)
三、原子核的稳定性	(5)
第三节 中子核反应	(10)
一、中子核反应类型	(10)
二、核反应截面及核反应产额	(12)
三、慢中子和中能中子引起的核反应	(12)
四、快中子引起的核反应	(16)
五、14MeV 中子引起的核反应	(17)
第四节 核外电子的运动规律	(18)
一、核外电子的排布	(18)
二、原子结构的量子理论	(19)
三、轨道电子的跃迁	(21)
四、莫塞莱定律	(24)
第二章 X 射线	(29)
第一节 X 射线的实质和特点	(29)
第二节 X 射线与物质的相互作用	(32)
一、X 射线与物质作用的特点	(32)
二、光电效应	(34)
三、康普顿散射效应	(40)
四、X 射线的吸收	(43)
第三节 X 射线荧光的激发	(47)
一、激发方式概述	(48)

二、电子激发·····	(48)
三、质子激发·····	(51)
四、电磁辐射激发·····	(52)
五、放射性核素激发源·····	(57)
六、激发效率·····	(70)
第四节 X 射线的探测 ·····	(72)
一、X 射线探测仪器的一般要求·····	(72)
二、测量低能电磁辐射的正比计数器·····	(75)
三、闪烁计数器·····	(77)
四、半导体探测器·····	(84)
五、几种探测器的比较·····	(94)
六、平衡滤光片对·····	(99)
七、整机性能的测试 ·····	(110)
第五节 样品的 X 射线仪器谱 ·····	(111)
一、仪器谱形态 ·····	(112)
二、特征 X 射线的能量关系 ·····	(113)
三、特征 X 射线的相对照射量率(分支比) ·····	(113)
第六节 X 射线荧光照射量率的基本公式 ·····	(114)
一、推导基本公式的基本假定 ·····	(114)
二、纯元素试样的 X 射线荧光照射量率公式 ·····	(115)
三、多元素样品的 X 射线荧光照射量率公式 ·····	(119)
四、透射式激发的 X 射线荧光照射量率基本公式 ·····	(121)
第七节 基体效应 ·····	(123)
一、概述 ·····	(123)
二、吸收-增强效应 ·····	(124)
三、散射增强效应 ·····	(127)
四、粒度、均匀度和表面结构的影响·····	(127)
五、研究基体效应的原则 ·····	(130)
第三章 室内 X 射线荧光分析方法·····	(134)
第一节 室内 X 射线荧光分析方法的意义和内容·····	(134)
第二节 样品制备 ·····	(134)

一、薄试样的制备	(134)
二、中、厚层试样的制备	(137)
第三节 探测装置的几何布置	(138)
第四节 相对测量方法	(141)
一、相对测量方法的依据	(141)
二、标准样品	(142)
三、工作曲线	(144)
四、测量工作程序	(146)
第五节 基体效应校正方法	(147)
一、经验分类法	(148)
二、补偿法	(148)
三、特散比法	(150)
四、补偿-特散比法	(152)
五、薄试样法	(153)
六、稀释法	(156)
七、内标法和增量法	(157)
八、辐射体法(吸收因子法)	(159)
九、饱和曲线法	(161)
十、经验系数法	(166)
第四章 现场 X 射线荧光测量方法	(170)
第一节 现场测量的内容和特点	(170)
第二节 野外工作前的准备	(172)
一、工作地区地质情况的调查研究	(172)
二、选择和检查仪器工作状态	(173)
三、试测工作地区的岩矿样品	(173)
第三节 野外工作方法	(174)
一、数据的取得和记录	(174)
二、测点点距的选择	(175)
三、测量条件的一致性	(176)
四、颗粒度和矿化均匀度的考虑	(178)
五、测量方法	(178)

第四节 基体效应校正方法	(182)
第五节 工作曲线的建立	(184)
第六节 资料整理	(186)
一、原始记录	(186)
二、岩壁和岩心综合剖面图的绘制	(187)
三、面积测量与异常点的圈定	(188)
第七节 误差讨论和可比性问题	(193)
一、现场测量的误差来源	(193)
二、可比性问题	(194)
第八节 X 射线荧光方法在地质及其他方面的应用	(197)
一、未知样品的元素分析	(197)
二、厚度测量	(212)
三、在环境科学、生物和医学方面的应用	(217)
四、X 射线荧光法在元素价态分析中的应用	(221)
第五章 中子活化分析	(226)
第一节 中子源	(226)
一、放射性核素中子源	(226)
二、加速器中子源	(231)
三、反应堆中子源	(233)
第二节 活化后子核的积累与衰变	(236)
第三节 快中子的慢化及热中子的扩散	(238)
一、几个基本概念	(238)
二、快中子的慢化	(239)
三、热中子的扩散	(242)
第四节 堆中子活化分析	(243)
一、活化方程式	(243)
二、活化分析用标准	(244)
三、样品的制备	(247)
四、辐照条件的选择及冷却时间的确定	(250)
五、测量核素及特征谱线的选择	(254)
六、干扰因素的讨论	(256)

第五节 中子活化测井	(258)
一、中子活化测井在铜矿勘探中的应用	(259)
二、中子活化测井在油田地质工作中的应用	(260)
三、缓发中子法测铀	(260)
第六节 堆中子活化分析应用实例	(262)
一、在地质领域中的应用	(263)
二、在环境科学中的应用	(267)
三、在医学和生物学中的应用	(267)
第六章 数据处理	(269)
第一节 谱数据分析的数学方法	(269)
一、谱原始数据的平滑	(269)
二、自动寻峰	(271)
三、峰面积和本底的计算	(274)
第二节 实验系统的刻度	(278)
一、能量刻度	(278)
二、能量分辨率刻度	(278)
三、效率刻度	(279)
第三节 数据文件	(280)
一、谱数据文件	(280)
二、分析数据文件	(281)
第四节 中子活化样品含量的计算	(283)
第五节 γ 谱分析及含量计算软件包	(285)
第六节 精密度、准确度、灵敏度和检出限	(286)
一、精密度和准确度	(286)
二、灵敏度	(289)
三、检出限	(290)
参考文献	(291)
附录 I 核外电子能级图	(292)
附录 II 元素吸收限及特征 X 射线能量	
附录 III 光子的质量衰减系数	(293)
附录 IV 分析核素参数表	(308)

第一章 基础知识

第一节 核地球物理勘查方法的内容和特点

从上世纪末到本世纪初,科学家们相继发现了天然放射性和人工放射性现象。这大大地促进了核科学技术的发展。由于原子能工业对铀原料的迫切需要,因而利用某些元素具有放射性的“天然放射性勘探方法”得到广泛的应用和发展。与此同时,根据核外电子受激时产生 X 射线荧光和射线或粒子在物质中的散射、吸收以及原子核的人工变换产生新放射性核素等物理现象建立起来的一系列核技术也得到迅速的发展,其中某些核技术在地球物理勘查中已经形成一个新的重要分支——核地球物理勘查方法。该方法是地球物理勘查方法的一种,它是利用放射源所产生的粒子或射线与岩石、矿石或岩矿样品作用时的散射、吸收、激发、电离和核反应等物理现象来测定研究对象的物理性质和物质成分,从而解决有关地质问题。这种地球物理勘查方法简称“核物探方法”。

从原则上讲,上述任何一种物理现象都可以提供一种或几种核物探方法。但是,在实际工作中,由于各种因素的影响,目前应用较多的有以下几种:①根据 γ 射线与物质相互作用时产生的吸收、散射现象以测定样品的密度、“有效”原子序数或物质成分的 γ - γ 法、选择 γ 法等。②根据原子的共振吸收-穆斯鲍尔效应研究元素的价态的原子共振吸收-穆斯鲍尔效应法。③利用 γ 射线与物质作用时的核反应的光-中子法。④利用带电粒子对核外电子激发的 X 荧光方法、重粒子 X 荧光方法、电子探针、扫描电镜法等。⑤利用带电粒子产生核反应现象的带电粒子活化分析法。⑥研究中子在物质中的散射、吸收以了解样品中轻元素含量的中子-中子法、中子寿命法等。⑦利用中子与

样品中某些元素的核反应以研究样品物质成分的中子- γ 法、中子活化分析法等。⑧根据X射线、 γ 射线或中子在物质中的散射、吸收研究样品形态和内部结构的方法。⑨根据内层电子激发和电子跃迁产生特征X射线的X线荧光法。⑩根据中子引起重核裂变产生的碎块的放射性从而研究样品中重元素物质成分的缓发中子法。

从50年代起,我国相继开展了 γ - γ 测井、中子吸收法、光致中子法以及中子活化法的试验研究工作。在石油和煤田的勘探工作中发挥了一定的作用。70年代初,国内不少单位开展了同位素X射线荧光方法的研究。并为金属、非金属矿产资源的勘查提供了重要手段,加速了勘探工作的进程。近年来,在石油勘探工作中,除了使用天然放射性测量方法测定井孔、砂样或岩心中的铀、钍、钾含量外,核物探方法大量使用在:研究 γ 射线在地质体中的散射、吸收,以确定岩石的密度、“有效”原子序数等重要参数;研究中子在地层中的散射、吸收、核反应等物理现象,以了解地层结构、油水界面含油情况以及某些元素在地层中的分布等。目前,这已经形成一个专门的核物探方法分支——核技术测井。它在石油测井中占有非常重要的地位。

在金属、非金属矿产资源的勘查中,同位素X射线荧光法具有特殊的意义。对一些含量较低或肉眼难于识别的矿物、矿石,它能进行现场鉴别和及时提供近似定量的元素含量的数据。这对地质勘查、特别是边远地区地质工作的开展具有重要意义。此外,在选矿、冶金及其他工业生产中,同位素X射线荧光法也可用来测定原材料、中间产品和成品的物质成分、测定镀层、涂层和薄层厚度以及检验生物样品和环境样品等。

中子活化分析法,在贵金属元素、稀土元素和其他稀有分散元素的含量分析中具有灵敏度高、检出限低、重现性好的特点;可为找矿勘探、地层或岩体对比、地层和岩体发展过程的推断等提供重要资料;在生物、医学、食品、环境、考古甚至法学等方面也有广泛应用。

地质科学作为一种古老而又年轻的科学,需要不断地用各种学科的新成就来增加其研究的深度和广度。随着核科学的发展,核技术

将不断为核地球物理勘探方法提供新的手段和开辟新的领域。

第二节 原子核

本世纪初卢瑟福根据大量实验结果提出了原子行星模型。他将原子比拟为一个小的太阳系。原子中央有一个小的带正电的原子核，由质子和中子组成。它集中了原子的绝大部分质量，而带负电的电子在原子核周围的空間里绕核作高速运动，以保持原子的电中性和稳定性。卢瑟福的原子模型很快得到科学界的承认。虽然它未能表明不同元素在原子结构上的差别，以及核外电子的运动规律，但却给人们一个清晰的容易理解的图象。

一、原子核的组成

根据现有的实验结果和对这些实验结果的认识，原子核可以看作由质子和中子组成：质子，带有一个单位的正电荷，质量 m_p 接近于氢原子质量，即

$$m_p = 1.007277u = 1.6725 \times 10^{-27} \text{kg}$$

中子，不带电的中性基本粒子，质量 m_n 与质子质量相近，即

$$m_n = 1.0086654u = 1.6748 \times 10^{-27} \text{kg}$$

中子的质量大于质子和电子的质量和，因此从能量和质量的关系上讲，中子完全可以通过 β 衰变转变成质子，并放出最大能量为 782keV 的电子。半衰期为 $(10.80 \pm 0.16) \text{min}$ 。

正因为中子的平均寿命很短，所以自然界几乎不存在自由中子。但是，中子与质子结合能构成稳定的原子核。这种“束缚态”中子大量存在于原子核内。人们可以通过某种方式使中子从核内释放出来，获得单个的自由中子。每个中子具有一定的能量。这是指它的动能。即

$$E_n = \frac{1}{2} m_n \cdot v^2 \quad (1-1)$$

式中， m_n 是中子静止质量； v 是中子运动速度。

中子能量的单位为电子伏(eV)。经常遇到的中子能量区域是 $10^{-3} \sim 10^7 \text{eV}$ 。

按中子的能量大小将自由中子分为：

- 慢中子 $E_n < 1\text{keV}$
- 中能中子 $1\text{keV} < E_n < 100\text{keV}$
- 快中子 $0.1\text{MeV} < E_n < 10\text{MeV}$

其中,慢中子能区内又有：

- 冷中子 $E_n < 0.0253\text{eV}$
- 热中子 $E_n = 0.0253\text{eV}$
- 共振中子 $1\text{eV} < E_n < 1\text{keV}$

在实际工作中,又常将能量大于热中子的、以共振中子为主体的各类中子总称为“超热中子”。

由质子和中子组成的原子核,占据了原子总质量的 99.95% 以上。质子的数目,即核电荷的数目是原子的基本特性,称为原子序数 Z ,即

$$\text{质子数} = \text{核电荷数} = \text{原子序数}$$

而质子数正好与中性原子的核外电子数相等。用原子质量单位 u 量度的各种原子核的质量非常接近原子质量单位 u 的整倍数。这一整数称为核的质量数 A ,即

$$\text{质量数} = \text{质子数} + \text{中子数}$$

二、原子核的结合能

原子核是由质子和中子组成的,但是原子核的质量总是小于组成原子核的质子、中子质量的总和。这一差值称为原子核的质量亏损。例如一个氦核是由两个质子和两个中子组成的,其组成情况是：

$$\text{两个质子质量} \quad 2 \times 1.007277 = 2.014554u$$

$$\text{两个中子质量} \quad 2 \times 1.008665 = 2.017330u$$

$$4.031884u$$

$$\text{而氦核质量为} \quad 4.001509u$$

故氦原子核质量亏损为 $0.030375u$

人们认为,这些质量亏损(对应于一定能量)实际上转变为核子之间的结合能,以维持原子核的稳定。

对于不同的核素,结合能是各不相同的。图 1-1 表示每一个核子

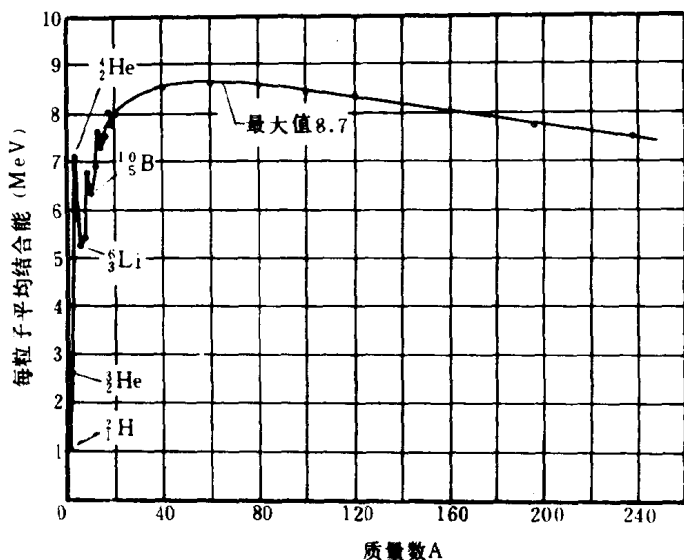


图 1-1 每一核子的结合能和质量数的关系

的结合能与核素质量数之间的关系。在低原子序数时,结合能较小。最小的复合核氦核的结合能为 1.12MeV/核子 。随质量数的增加,曲线急剧上升,接着逐渐缓慢上升,直到 $A = 56$ 附近达到最大值(即 8.79MeV ,对应于 $^{56}_{26}\text{Fe}$ 的原子核)。随后缓慢下降,一直到自然界存在的最重核素 $A = 238$,其结合能约为 7.6MeV/核子 。如此情况说明,中等质量的原子核释放一个核子所需要的能量最大,因而其原子核就更稳定,而重核可能以某种方式裂变成较轻的核,并放出能量。轻核也有可能以某种方式聚合成较重的核,并放出能量。

三、原子核的稳定性

大量的实验研究表明,并不是任何数目的中子和质子都能组成

一个稳定的核。稳定的核素的质子数与中子数必须保持一定的关系。就轻核($A \leq 20$)来说,中子数与质子数大致相等。而对质量数较大

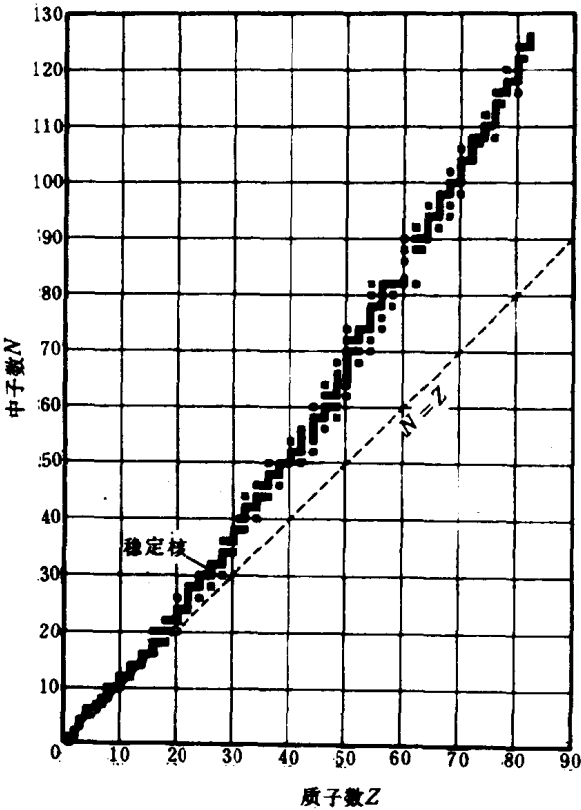


图 1-2 原子核稳定组态的中子-质子图

的中量核和重核来说,中子都多于质子(图 1-2)。

轻核中中子数与质子数相等的趋势可以用核能级来解释。一般认为,原子核内核子分别处于不同的能级,根据不相容原理,一个核能级上只能容纳自旋相反的两个中子和自旋相反的两个质子。原子核内的核子总是依次由低能级到高能级填充,使体系具有最小能量,即处于最稳定的组态。例如在填满低能级后,若余下两个中子和两个质子。它们就会填在能量较高的同一能级上。若余下三个中子和一

个质子,其中一个中子必须填到更高的能级中去,而处于不稳定状

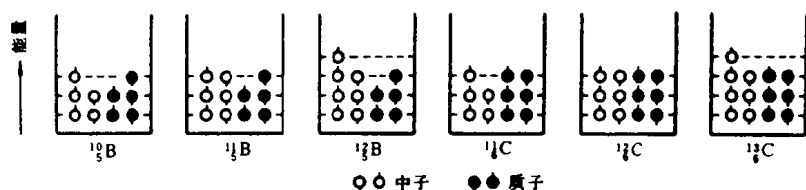


图 1-3 不同核素的简化核能级图

态。图 1-3 就是根据这一原理描绘的几种硼和碳的同位素的核能级图。它可以较直观地说明, ^{12}B 是硼的不稳定同位素(β 衰变半衰期为 0. 0204s),而 ^{12}C 是碳的稳定同位素。

从另一方面看,质子是带正电的,因而相互之间有很强的静电斥力。在原子核中质子越多,这种静电排斥力就越强。为了维持原子核的稳定性,需要过量的、只产生吸引力的中子。从图 1-2 可以看出,在 $A > 20$ 的稳定原子核中,中子数 N 都大于质子数 Z ,即稳定核中子-质子关系曲线向上偏离 $N = Z$ 直线。并且 A 越大,曲线偏离越远。这说明没有足够的中子产生较大的吸引力,核也是不稳定的。比较图 1-3 上硼和碳原子核的组合就可以理解: ^{10}B 和富中子的 ^{11}B 是稳定核;富质子的 ^{12}C 是不稳定的(β^+ 衰变,半衰期 20. 39min);而富中子的 ^{13}C 却是稳定的。

上面提到的“吸引力”实际上是一种核力,它是一种短程力。只在核子相互非常接近时才发生强相互作用。这种现象称为核力的“饱和性”。但质子电荷所产生的库仑力在整个原子核中都是相当强的。因而,中子在阻止重核裂变作用方面也是有限的。从图 1-2 可以看到,当 A 增大,原子核中中子所占比例也增大。但是当 $Z > 83$ 、 $N > 126$ 或 $A > 209$ 时,自然界已不存在稳定的原子核,它们都具有自发衰变的趋势,常常放出一个 α 粒子、使中子数 N 减小 2、质子数 Z 减小 2 逐步趋近于稳定态(图 1-4)。

对于一些质量数很大的核素,其核经过一次 α 衰变之后(A 减小

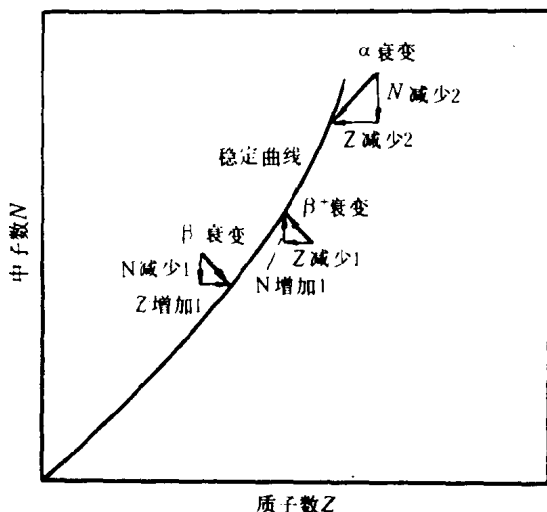
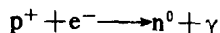


图 1-4 放射性衰变使非稳定核趋于稳定态

4, N 减小 2, Z 减小 2), 仍不能达到稳定态时, 其衰变产物继续以放出 α 方式或放出 β 方式进行衰变, 一直到衰变产物为一个稳定核素为止。自然界存在的 ^{238}U 、 ^{235}U 和 ^{232}Th 就是这种情况。这些重核都经过多次衰变, 生成多种放射性核素, 最后达到某一稳定态, 生成一种稳定核素 ^{206}Pb 为止。这就是人们所熟悉的天然放射性系列。此外, 一些富中子或富质子的核素也有进行 β^- 或 β^+ 衰变而趋于稳定态的趋势。一些富中子的核素可能产生 β^- 衰变, 使一个中子转化为一个质子、一个电子和中微子, 即



而富质子的核素可能产生 β^+ 衰变或电子俘获, 即



而趋于稳定。

除了天然存在的一些重核具有自发衰变的放射性之外, 可以利用核技术制备各种元素的同位素。一些质量数偏高(富中子)的同位素, 常以 β^- 衰变的形式趋于稳定; 而质量数偏低(富质子)的同位素,