

海洋放射性核素 测量方法

刘广山 著



海洋出版社

特邀编辑：霍湘娟
责任编辑：白燕



Haiyang fangshexing hesu celiangfangfa

ISBN 978-7-5027-6773-0



9 787502 767730 >

ISBN 7-5027-6773-0/P · 978
定价：68.00元

海洋放射性核素测量方法

刘广山 著

海洋出版社

2006年·北京

内 容 简 介

本书分三篇共十九章介绍了放射性核素测量仪器原理,计数与谱分析数学计算,海洋放射性核素测量方法。第一篇内容包括放射性原子核衰变的基础知识、原子核辐射与物质的相互作用过程、探测器与谱仪、低水平放射性测量装置;第二篇包括测量与误差、放射性测量统计学、谱分析数学、 α 谱分析的数学计算、锗探测器 γ 谱分析的数学计算、液闪 β 谱测量中的数学计算、放射性测量的探测下限与测量方法的选择;第三篇包括样品的采集与预处理方法简述、海洋环境样品 γ 谱测量方法、铀同位素测量方法、钍同位素测量方法、镭同位素测量方法、 ^{210}Pb 和 ^{210}Po 测量方法、人工放射性核素测量方法、宇生放射性核素测量方法。

本书是作者为同位素海洋学的研究生编著的专业基础课教材,适合于从事放射性同位素海洋学研究和环境放射性测量的研究人员、教师和研究生用作参考书。

图书在版编目(CIP)数据

海洋放射性核素测量方法/刘广山著.—北京:海洋出版社,2007.5

ISBN 978-7-5027-6773-0

I.海… II.刘… III.放射性同位素—海洋测量—方法
IV.P714

中国版本图书CIP数据核字(2007)第044044号

责任编辑:白燕

特邀编辑:霍湘娟

责任印制:谢记心

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

(100081 北京市海淀区大慧寺路8号)

厦门集大印刷厂印刷 新华书店发行所经销

2006年12月第1版 2006年12月厦门第1次印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:19.75

字数:506千字

定价:68.00元

(海洋版图书印、装错误可随时退换)

前言

同位素海洋学通过测量海洋环境中的天然、人工放射性核素和稳定同位素,研究海洋环境中同位素的源汇、含量分布、存在形式,并用其作为示踪剂研究物理海洋学、海洋生物学、海洋地质学和海洋工程问题,或利用加入人工示踪剂的方法研究海洋环境中发生的物理、化学、生物学和地质学过程。所以同位素海洋学是实验科学。

作者二十多年来从事环境放射性测量与应用研究工作,认为要搞好实验科学研究,研究者必须具有丰富扎实的实验方法原理知识和实验技能修养,这是著作本书的最初动机。

本书包括3方面的内容:放射性核素测量仪器原理;计数与谱分析数学基础;海洋放射性核素测量方法。

第一篇为放射性核素测量仪器原理。

放射性原子核的衰变一章介绍了核素、同位素、原子核衰变、放射性、放射性核素、放射性活度和稳定核素的基本概念,以及放射性测量和放射性同位素在海洋中应用最基础的知识——原子核衰变的基本规律和衰变纲图。

原子核辐射与物质的相互作用一章简介了带电粒子与物质相互作用的一般特征、重带电粒子与物质的相互作用、 β 射线与物质的相互作用和 γ 射线与物质的相互作用。包括:重带电粒子在物质中的能量损失,重带电粒子在物质中的射程;电子在物质中的能量损失,电子的散射, β 射线的射程和吸收; γ 射线与物质相互作用的光电效应、康普顿效应、电子对效应和物质对 γ 射线的吸收。

不同放射性核素衰变发出的 α 、 β 和 γ 射线具有不同的能量和含量。这些射线既是原子核本身的特性,又为它们的识别与强度测量提供了方法。人们通过 α 、 β 和 γ 射线与探测介质的相互作用感知放射性核素的存在,确定发射核的种类和含量。放射性的测量通过探测器和谱仪实现。

探测器与谱仪一章介绍了常用的气体探测器、闪烁探测器和半导体探测器的结构、工作原理。包括:脉冲电离室、屏栅电离室、圆柱形电离室、正比计数器、G-M计数器、闪烁体、光电倍增管、NaI(Tl)单晶 γ 谱仪、ZnS(Ag) α 计数器、液体闪烁计数器、半导体探测器的工作原理、半导体 α 谱仪、HPGe γ 谱仪、半导体探测器性能参数。很简短地介绍了计数电子学原理和构成部件。

低水平放射性测量装置一章的内容包括:本底的来源和降低本底的措施、低本底 γ 射线测量装置、低本底 α 谱仪、低本底 α/β 计数器、超低本底液体闪烁谱仪。本底来源为:宇宙射线、环境辐射和屏蔽材料与探测器材料中的放射性;降低本底的措施为:物质屏蔽、反符合屏蔽、选择探测器与屏蔽结构材料、能量甄别、信号形状甄别和符合测量。

第二篇是计数与谱分析数学。

首先介绍了测量与误差的一些概念和误差计算的传递公式。放射性测量统计学一章介绍原子核衰变的统计规律、积分计数与计数率误差的计算方法和存在本底时的计数率误差计算方法。谱分析数学一章介绍了谱数据的光滑与微分计算方法,峰位置、峰边界、峰宽度和峰面积等峰参数计算方法。用3章的篇幅分别介绍了 α 谱、 γ 谱和液闪计数测量中用到的数学方法。放射性测量的探测下限与测量方法的选择介绍了探测下限的概念、计算方法和如何由原子核衰变性质、测量装置的本底水平和样品中的放射性核素含量水平选择测量方法。

放射性测量的谱分析过程自动化程度已很高,当计数统计性较好时,自动分析会给出满意的

结果。但是，海洋中的放射性核素含量是低水平的，样品测量中的计数率很低，为得到较好的计数统计结果，计数时间有时可能要数日或十数日。尽管如此，很多情况下仍不能使人们得到满意的结果，而计数率低的更直观的结果是放射性衰变的统计规律决定了其计数误差会很大。在这种情况下，计算机自动分析有时会给出准确度很差的结果，进行人工干预下的谱分析是非常有效的。本书的谱分析数学，除了原理与方法的知识介绍外，更重要的是为人工谱分析准备数学工具。

第三篇是海洋放射性核素测量方法。

该部分内容包括样品的采集与预处理方法简介，海洋环境样品的 γ 谱分析方法，天然放射性核素铀(U)、钍(Th)、镭(Ra)同位素、 ^{210}Pb 、 ^{210}Po 测量方法，人工放射性核素 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{239}Pu 和 ^3H 测量方法，宇生放射性核素 ^7Be 、 ^{32}P 和 ^{33}P 、 ^{32}Si 、 ^{14}C 测量方法。所有可用 γ 谱方法测量的核素在 γ 谱分析方法一章中介绍。铀同位素测量方法包括：固体荧光法、液体激光荧光法、分光光度法测量总铀， α 谱方法测量铀同位素；钍同位素分析测定方法包括：分光光度法测量总钍、 α 谱方法测量 ^{228}Th 、 ^{230}Th 和 ^{232}Th ， β 计数法测量 ^{234}Th ；镭同位素测量方法包括射气法测量 ^{226}Ra 和 ^{224}Ra 、 β 计数法测定 ^{228}Ra ；可用 α 谱、 β 计数法测量 ^{210}Pb ，只能用 α 谱方法测量 ^{210}Po 。

环境中放射性核素的含量是微量的，很多情况下是极微量的。所以，即使是很有经验，进行过多年放射化学分析的人，使用的是非常成熟的分析方法，在进行一个新项目前，或测量新一批样品前，或较长时间未进行样品测量，或长时间测量样品的中间，都要对方法、仪器和人员进行质量保证意义下的考核验证，很多情况下测量过程的质量保证由全程回收率评价。

如果测量中每个样品均使用了示踪剂，则每个样品都要计算回收率，以评价该样品的测量是否成功，如果发现样品回收率明显偏离正常值，则要考虑样品处理过程发生了问题。

海洋中除了海水外，水中还有生物，包括游泳生物、浮游生物和微生物；海洋底有沉积物、有矿物；海洋周边有陆地；海洋上空有大气。所以海洋学的研究对象包括了海水、海洋生物、海底沉积物、海底矿物、陆地沉积物、河水、井水，大气、大气沉降等。

有几方面的原因使样品的富集、分离成为同位素海洋学实验研究中不可缺少的一部分。其一，研究对象中关注核素的含量水平很低，为了提高计数率，或者说为了探测到待测核素，必须集中大量的测量对象，这种情况下需要从研究对象中把待测核素富集起来；其二，当样品中存在多种核素时，如果感兴趣的核素含量不是最高的，或者受其他核素干扰比较严重，即强干扰下的低水平放射性测量问题，无论是 α 谱，还是 γ 谱方法，均可能出现待测核素被淹没的可能，所以需要待测量核素从样品中分离出来；其三， α 谱方法测量样品要求待测样品是均匀几乎无厚度的，如果不进行化学分离，样品介质会将 α 射线衰减并吸收掉，使测量变得很困难或根本无法进行。所以要求将待测核素与基质分离，这样才能使 α 射线穿出样品进入探测器；其四，如果用 α 或 β 计数法测量样品，从样品中分离待测核素是必须的；其五，使用 β 谱方法测量样品时，由于原子核 β 衰变自身的特点， β 射线是连续谱，使得测量样品必须仅含有一种或射线能量差别很大的2~3种核素，所以样品的分离与纯化是必需的。

经过几十年的积累，人们建立了各种放射性核素测量方法，并将其用于环境中放射性核素的测量。本书所介绍的测量方法是根据文献总结出来的，作者没有能力亲自将它们都检验一遍。实际上即使这些方法都是正确的，没有错误的，但从作者的观点看，它们也不是完全能适用的。在使用它们进行测量之前，还必须进行方法的验证与条件实验，通过实验对方法进行改进是必要的。实际工作中，分离、纯化程序确定后，过程中使用的试剂量是需要通过实验确定的，书中的试剂量仅可作为参考，书中介绍的测量方法也需要通过不断的实践和总结纠正错误、完善程序。

本书是作者为同位素海洋学研究方向的研究生编写的同位素海洋学实验方法教材的一部分，

关注的是那些已用于海洋学研究的放射性核素，所以没有写入那些在环境放射性测量中关注的，和海洋学研究没有用到或使用不多的核素。尽管作者极力将内容写到细处，也写出了较多的方法操作步骤，但就整体而言，本书仍不能用作操作手册。作教材使用时，需要关注的主线仍然是原理与计算方法，更详细的化学流程应当去查找研究方法标准和研究方法的文章。当然如果要进行某一测量工作时，研究原理方法和流程的正确性是积极推荐的。

本书中，一些文献的内容多次被引用，一些内容曾参考了多种文献，为了避免累赘，没有在文中全部将其列出，文献表中全部列出了这些文献。这里向这些文献的作者表示谢意。

阅读本书需要一些基本的核物理、高等数学和分析化学的知识。虽然海洋环境样品的放射性核素测量有自身的特点，但主体部分与陆地环境样品放射性核素测量方法完全相同，只是有些地方有适当的变化。所以本书可供从事环境放射性核素测量和利用环境放射性核素进行研究工作的读者使用。从作者二十余年环境放射性测量与十余年的教学经历看，欲从事环境放射性核素测量工作，本书的知识是必需的。

由于作者水平有限，也由于时间仓促，书中会存在很多错误和需要完善的地方，特别希望读者通过各种方式将发现的错误和需要修改、补充的内容告诉作者，作者将非常感谢。

作者

2006年10月

目 次

第一篇 放射性核素测量仪器原理

第一章 放射性原子核的衰变	(3)
第一节 核素与同位素	(3)
第二节 放射性、放射性核素、稳定核素和原子核衰变	(3)
第三节 原子核衰变的基本规律	(4)
第四节 放射性活度	(6)
第五节 衰变纲图	(7)
第二章 原子核辐射与物质的相互作用	(9)
第一节 带电粒子与物质相互作用的一般特征	(9)
第二节 重带电粒子与物质的相互作用	(10)
第三节 β 射线与物质的相互作用	(14)
第四节 γ 射线与物质的相互作用	(17)
第三章 探测器与谱仪	(24)
第一节 气体探测器	(24)
第二节 闪烁探测器	(32)
第三节 半导体探测器	(41)
第四节 计数电子学问题	(51)
第四章 低水平放射性测量装置	(52)
第一节 本底的来源与降低本底的措施	(52)
第二节 低本底 γ 放射性测量装置	(56)
第三节 低本底 α 谱仪	(59)
第四节 低本底 α/β 计数器	(61)
第五节 超低本底液体闪烁谱仪	(63)
参考文献	(67)

第二篇 计数与谱分析数学基础

第五章 测量与误差	(71)
第一节 物理量与单位	(71)
第二节 测量与误差	(73)
第三节 测量误差的来源、分类与减小或避免误差的提示	(76)
第四节 几个常用的计量学术语	(78)
第五节 随机变量与统计量	(80)

第六节	误差传递公式	(82)
第六章	放射性测量统计学	(86)
第一节	原子核衰变规律的统计意义	(86)
第二节	积分计数与计数率误差	(88)
第七章	谱分析方法	(91)
第一节	谱数据的光滑与微分运算	(91)
第二节	峰参数计算方法	(95)
第三节	函数拟合解谱方法	(103)
第四节	逆矩阵解谱方法	(106)
第五节	剥谱法解谱	(109)
第八章	α 谱分析的数学计算	(111)
第一节	α 谱的特点	(111)
第二节	α 谱测量的能量与效率刻度	(114)
第三节	α 谱峰面积计算方法	(115)
第四节	样品中核素活度的计算方法	(119)
第九章	锗探测器 γ 谱分析的数学计算	(120)
第一节	γ 谱的构成与能量刻度	(120)
第二节	效率刻度	(124)
第三节	符合加和校正	(132)
第四节	自吸收校正	(141)
第五节	锗探测器 γ 谱分析	(146)
第十章	液闪 β 谱测量中的数学计算	(148)
第一节	β 谱的特点	(148)
第二节	液闪 β 谱测量中的淬灭校正方法	(150)
第三节	多标计数测量方法简介	(154)
第四节	双标法 β 计数测量的数据计算方法	(156)
第十一章	放射性测量的探测下限与测量方法的选择	(159)
第一节	放射性测量的探测下限	(159)
第二节	其他有关探测能力的定义	(164)
第三节	测量方法的选择	(167)
参考文献		(172)

第三篇 海洋放射性核素测量方法

第十二章	样品的采集与预处理方法简述	(175)
第一节	制定采样方案的一般原则	(175)
第二节	海水样品采集与预处理方法	(177)
第三节	沉积物样品采集与预处理方法	(180)
第四节	海洋生物样品与预处理方法	(181)
第十三章	海洋环境样品 γ 谱测量方法	(184)

第一节	γ 谱方法可测定的海洋环境中的放射性核素	(184)
第二节	样品测量条件	(184)
第三节	效率刻度与活度计算	(187)
第四节	海洋沉积物放射性核素的测量	(192)
第五节	沉积物中不平衡铀和钍放射系核素的 γ 谱测量	(195)
第六节	深海沉积物中钍放射系核素的测量	(202)
第七节	深海沉积物中 ²³⁰ Th 和 ²³¹ Pa 的测量	(207)
第八节	海水中 ²²⁶ Ra 和 ²²⁸ Ra 的 γ 谱测量	(210)
第九节	海水中 ²²⁴ Ra 的 γ 谱测量	(215)
第十四章	铀同位素测量方法	(221)
第一节	固体荧光法	(221)
第二节	液体激光荧光法	(226)
第三节	分光光度法	(229)
第四节	α 谱和 α 计数方法	(232)
第十五章	钍同位素测量方法	(236)
第一节	分光光度法测量钍	(236)
第二节	α 谱方法测量 ²²⁸ Th、 ²³⁰ Th 和 ²³² Th	(238)
第三节	β 计数法测量海水中的 ²³⁴ Th	(240)
第十六章	镭同位素测量方法	(243)
第一节	海水中镭同位素的富集	(243)
第二节	固体样品溶解与分离纯化方法	(245)
第三节	射气法测量 ²²⁶ Ra	(247)
第四节	射气法测量 ²²⁴ Ra 和 ²²³ Ra	(252)
第五节	β 计数法测定 ²²⁸ Ra	(256)
第十七章	²¹⁰Pb 和²¹⁰Po 测量方法	(259)
第一节	自沉积 α 谱方法测量 ²¹⁰ Po	(259)
第二节	α 谱方法测量 ²¹⁰ Pb 与不平衡 ²¹⁰ Pb 和 ²¹⁰ Po 活度计算	(262)
第三节	β 计数法测量 ²¹⁰ Pb	(263)
第十八章	人工放射性核素测量方法	(265)
第一节	¹³⁷ Cs 的测量	(265)
第二节	⁹⁰ Sr 的测量	(268)
第三节	²³⁹ Pu 的测量	(277)
第四节	³ H 的测量	(282)
第十九章	宇生放射性核素测量方法	(286)
第一节	⁷ Be 的测量	(286)
第二节	³² P 和 ³³ P 的测量	(287)
第三节	³² Si 的测量	(291)
第四节	¹⁴ C 的测量	(294)
参考文献		(300)

第一篇

放射性核素测量仪器原理

第一章 放射性原子核的衰变

原子核物理学的教科书中把原子核的电荷、质量、体积、自旋、磁矩、电四极矩、宇称和统计性质称之为原子核的基本性质。与之相对的是原子核的动力学性质，包括原子核的衰变和核反应。原子核发射粒子引起核性质的变化称之为原子核衰变；在外力作用下原子核发生的变化称之为核反应。原子核的动力学性质是原子核基本性质的变化。原子核衰变最为主要的是 α 衰变、 β 衰变和 γ 跃迁。 α 衰变和 β 衰变原子核发射 α 和 β 粒子使原子核在元素周期表中的位置发生变化； γ 跃迁过程则是原子核能量状态发生变化。

第一节 核素与同位素

原子核是由质子和中子组成的。原子核中的质子数用 Z 表示，中子数用 N 表示，原子核中质子数与中子数的和称为质量数，用 A 表示。电荷数为 Z ，质量数为 A 的原子核由 Z 个质子和 $N=A-Z$ 个中子组成，质子和中子统称为核子。具有一定 Z 和 A 值，因此也就具有一定 N 值的原子核称为一种核素，用 A_ZX 表示， X 为元素符号，例如 ${}^1_1\text{H}$ ， ${}^{12}_6\text{C}$ ， ${}^{238}_{92}\text{U}$ 等。由于 Z 值等于原子序数，已知元素符号时，原子序数就已知，所以对一种核素而言经常省略 Z ，表示为 AX ，例如 ${}^{60}\text{Co}$ ， ${}^{137}\text{Cs}$ 等。在自然界发现的核素中以铀的电荷数为最大， $Z=92$ 。人们用人工方法制造了 $Z>92$ 的核素，称之为超铀元素。

目前已发现了2 000多种核素，在这些核素中有300多种是稳定的，其余可自发转变成其他核素，称之为放射性核素。从 $Z=1\sim 82$ 的元素中，除 $\text{Tc}(Z=43)$ 和 $\text{Pm}(Z=61)$ 外，至少有一种核素是稳定的。

电荷数 Z 相同，质量数 A 不同的核素由于其在元素周期表中占据同一个位置，所以叫同位素。例如 ${}^1_1\text{H}$ ， ${}^2_1\text{H}$ ， ${}^3_1\text{H}$ ； ${}^{12}_6\text{C}$ ， ${}^{13}_6\text{C}$ ， ${}^{14}_6\text{C}$ 等。

中子数 N 相同，电荷数 Z 不同的核素称之同中子素。例如 ${}^3_1\text{H}$ 和 ${}^4_2\text{He}$ ； ${}^{14}_6\text{C}$ ， ${}^{15}_7\text{N}$ 为同中子素。

质量数 A 相同，电荷数 Z 不同的核素称之同量异位素。例如 ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ ， ${}^{40}_{19}\text{K}$ 和 ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ 为同量异位素。

质量数 A 为奇数的核叫奇 A 核，否则为偶 A 核；质子数与中子数均为奇数的核称为奇奇核，质子数与中子数均为偶数的核叫偶偶核；质子数或中子数有一个是奇数的核叫奇偶核。

第二节 放射性、放射性核素、稳定核素和原子核衰变

有许多天然和人工生产的核素都能发射各种射线。有的发射 α 射线，有的发射 β 射线，有的发射 α 或 β 射线的同时也发射 γ 射线，有的三种射线均有。此外，还有的发射正电子、质子、中子等其他粒子。原子核自发地放射各种射线的现象，称为放射性。能自发地放射各种射线的核素被称为放射性核素，也叫不稳定核素。与此相反，不能自发地放射出射线的核素被称为稳定核素。放射性核素衰变前的原子核叫母核，衰变后的剩余核叫子核。发射 α 粒子的核素叫 α 放射性核素；发射 β 粒子的核素叫 β 放射性核素。放射性与原子核衰变密切相关。所谓原子核衰变是指原子核自发地放射出 α 或 β 等粒子而发生的转变。

原子核自发地放射出 α 粒子而发生转变,叫做 α 衰变。在 α 衰变中,衰变后的子核与衰变前的母核相比,电荷数减少 2,质量减少 4,用下式来表示:

$${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He} \quad (1.2.1)$$

式(1.2.1)中,X 表示母核,Y 表示子核。例如 ${}^{210}_{84} \text{Po}$ 的 α 衰变可写为:



原子核自发地放射出电子或正电子或俘获一个轨道电子而发生的转变,统称为 β 衰变。细分之,放射电子的称为 β^- 衰变;放射正电子的称为 β^+ 衰变;俘获轨道电子的称为轨道电子俘获。 β 衰变的三种类型可分别用下面的式子表示:

$$\beta^- \text{ 衰变} \quad {}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + e^- \quad (1.2.3)$$

$$\beta^+ \text{ 衰变} \quad {}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + e^+ \quad (1.2.4)$$

$$\text{轨道电子俘获} \quad {}^A_Z X + e^- \rightarrow {}^A_{Z-1} Y \quad (1.2.5)$$

式(1.2.3)至式(1.2.5)中, e^- 和 e^+ 分别代表电子和正电子。由上式可见,在 β 衰变中,子核与母核的质量数相同,只是电荷数相差 1。 β^- 衰变相当于原子核的一个中子变成了质子; β^+ 衰变和轨道电子俘获相当于原子核的一个质子变成了中子。 β 衰变子核和母核是同量异位素。例如 ${}^{32}_{15} \text{P}$ 的 β 衰变, ${}^{32}_{15} \text{P} \rightarrow {}^{32}_{16} \text{S} + e^-$, ${}^{32}_{15} \text{P}$ 和 ${}^{32}_{16} \text{S}$ 是同量异位素。

γ 放射性既与 α 跃迁相联系,也与 α 衰变或 β 衰变相联系。 α 和 β 衰变的子核往往处于激发态,处于激发态的原子核要向基态跃迁,在跃迁中通常要放出 γ 射线,称其为 γ 跃迁,所以 γ 射线的发射一般是伴随 α 或 β 射线产生的。例如 ${}^{60}\text{Co}$ 衰变首先是经 β 衰变至 ${}^{60}\text{Ni}$ 的激发态,然后 ${}^{60}\text{Ni}$ 激发态向基态跃迁发出 γ 射线。 γ 跃迁与 α 和 β 衰变不同, γ 跃迁不会导致核素发生变化,而只是改变原子核的内部状态,因此, γ 跃迁的子核和母核的电荷数和质量数相同。

有天然和人工放射性核素之分,天然放射性核素是指天然存在的放射性核素,主要有三个天然放射系的核素,另外还有一些非系列的放射性核素。也可用人工方法来产生放射性核素,叫人工放射性核素。已知的人工放射性核素已远超过天然放射性核素的种类。

第三节 原子核衰变的基本规律

放射性原子核经 α 或 β 衰变成为另一种原子核。实验表明,即使是同一种核素,多个原子核的这种变化也不是同时发生的。由于衰变,放射性原子核数目随时间变化,这种变化服从以下指数衰减规律:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.3.1)$$

式(1.3.1)中, t 是时间, N_0 是 $t=0$ 时的原子核数, N 是 t 时刻的原子核数, λ 称为衰变常数。

1 衰变常数

衰变常数 λ 的量纲是时间的倒数。显然, λ 决定了原子核衰变的快慢。它与是哪一种放射性核素有关, 是放射性原子核的特征量。

对式(1.3.1)微分可以得到:

$$\lambda = \frac{-dN/N}{dt} \quad (1.3.2)$$

式(1.3.2)中, $-dN/N$ 表示每个原子核的衰变几率。所以衰变常数 λ 是单位时间内每个原子核的衰变几率。这就是衰变常数的物理意义。将式(1.3.2)改写为如下形式:

$$\lambda = \frac{-dN/dt}{N} \quad (1.3.3)$$

则可看出式(1.3.3)中分子是单位时间原子核数的变化, λ 是单位时间内每个原子核的衰变几率的意义则更明确。由于 λ 是常数, 说明每个原子核不论何时衰变, 概率均相同。这就意味着每个原子核的衰变是独立无关的, 不能说哪一个核先衰变哪一个后衰变, 每一个核到底何时衰变完全是偶然的。但大量原子核作为整体讲其衰变服从指数衰减规律式(1.3.1)。通常又把原子核的指数衰减规律叫放射性衰变的统计规律。

2 半衰期与平均寿命

半衰期通常用 $T_{1/2}$ 表示, 是原子核数衰减到原来一半所经历的时间。由定义我们容易得到 $T_{1/2}$ 与 λ 的关系, 当 $t=T_{1/2}$ 时,

$$N = \frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

所以有

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (1.3.4)$$

可见 $T_{1/2}$ 与 λ 成反比, λ 越大, 放射性核素衰变速度越快, 衰变到核数目为起始核数目一半所经历的时间就越短。

平均寿命用 τ 表示, 是指放射性原子核平均存在的时间。对于大量的放射性原子核而言, 有的核先衰变, 有的核后衰变, 各个核的寿命长短不同, 可以从 0 到 ∞ 的任何值, t 时刻衰变的 $-\frac{dN}{dt} = \lambda N$ 个核素寿命为 t , N_0 个原子核的平均寿命为:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N dt = \frac{1}{\lambda} \quad (1.3.5)$$

即平均寿命与半衰期互为倒数。

第四节 放射性活度

1 放射性活度

由于测量放射性核数目很不方便，而且很多情况下感兴趣的是单位时间内多少原子核发生衰变。由此，人们定义放射性活度为放射性核素的衰变率，通常用 A 表示：

$$A = \frac{-dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.4.1)$$

式(1.4.1)中， $A_0 = \lambda N_0$ 是 $t=0$ 时的放射性活度，可见放射性活度与放射性原子核数量随时间变化服从同样的指数衰减规律。

2 放射性活度单位

有关或涉及放射性核素的研究中，经常情况下人们关心的不是放射性核素质量的多少，而是单位时间内衰变的原子核数量的多少——放射性活度。历史上，放射性活度的常用单位是居里，用 Ci 表示。居里的原先定义是与 1g Ra 处于平衡的 Rn 的每秒钟衰变数，也即 1g Ra 的每秒钟衰变数。早期测得该数值为 3.7×10^{10} 。1950 年以后规定，1Ci 就是每秒钟有 3.7×10^{10} 个原子核衰变。即：

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{s}^{-1}$$

另外，为了使用方便还有 mCi 和 μCi ：

$$1\text{mCi} = 3.7 \times 10^7 \text{s}^{-1}$$

$$1\mu\text{Ci} = 3.7 \times 10^4 \text{s}^{-1}$$

1975 年国际计量大会(General Conference on Weights and measures)通过决议，规定“贝可勒尔”(Becquerel)为放射性活度单位，用 Bq 表示，其意义为每秒 1 个原子核衰变，与居里的关系为：

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{Bq}。$$

3 分支衰变

有些原子核有两种以上的衰变方式，例如 ^{40}K 既可发生 β^- 衰，以可发生 β^+ 衰变和轨道电子俘获，衰变纲图如图 1.5.1 所示。当核素有多种分支衰变时，总的衰变常数等于各分支衰变常数之和：

$$\lambda = \sum_i \lambda_i \quad (1.4.2)$$

第 i 个衰变分支的部分放射性活度为:

$$A_i = \lambda_i N = \lambda_i N_0 e^{-\lambda t} = \frac{\lambda_i}{\lambda} A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.4.3)$$

所以, 各个衰变分支放射性活度与总活度成正比, 分支活度随时间的变化规律与总活度的变化规律相同。为了明确表示分支衰变活度与总活度之间的关系, 定义 $Y = \frac{\lambda_i}{\lambda}$ 为分支比。

分支比更明确的意义是一个原子核衰变发生某个分支衰变的几率。在实际应用中分支比还用来表示一次衰变放出某种射线的几率。对于一种原子核, α 或 β 射线的分支比之和总是等于或小于 1 的; 一个原子核不同能量的 γ 射线分支比之和可能大于 1。

4 活度与质量的关系

通过半衰期或衰变常数很容易得到放射性物质质量 m 与放射性活度 A 的关系:

$$A = \frac{m}{M} N_A \lambda = \frac{m}{M} N_A \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (1.4.4)$$

式(1.4.4)中, M 是原子量, N_A 是阿伏伽德罗常数。

实际应用中经常用到比放射性活度, 简称为比放或比度, 定义为放射性活度与其质量之比, 即单位质量的放射性活度, 常用的单位是 Bq/g 或 Bq/kg。纯物质的比放射性活度有时称之为本征比放射性活度。纯物质比放射性计算公式为:

$$A = \frac{N_A}{M} \lambda = \frac{N_A}{M} \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad (1.4.5)$$

第五节 衰变纲图

为了清楚地表示原子核的衰变过程, 人们采用了图示的方法, 这种图叫放射性核素衰变纲图。本节以图 1.5.1 中 ^{40}K 、 ^{60}Co 、 ^{65}Zn 和 ^{238}U 为例介绍衰变纲图的构成及图形与符号的意义。

(1) 衰变纲图以母核命名。

(2) 衰变纲图中母核和子核的能级由一系列横线表示, 最低的一条横线表示基态, 其他上面的横线表示激发态; 子核能级在母核能级下面; 如果子核原子序数小于母核, 则子核的能级在母核能级的左下方, 图中 ^{40}K 的衰变纲图中 ^{40}Ar 的能级, ^{65}Zn 的衰变纲图中 ^{65}Cu 的能级和 ^{238}U 的衰变纲图中 ^{234}Th 的能级在其母核能级的左下方; 如果子核原子序数大于母核, 则子核能级在母核能级右下方, 图中 ^{60}Co 的衰变纲图中 ^{60}Ni 的能级和 ^{40}K 的衰变纲图中 ^{40}Ca 的能级在其母核能级的右下方。

(3) 通常在各个核基态能级下方标注核素名称; 各个能级一边标注能级相对于基态的能