



全国辐射环境监测培训系列教材

实验室 γ 能谱测量与分析

SHIYANSHI γ NENGPU CELIANG YU FENXI

李君利 © 主编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



全国辐射环境监测培训系列教材

实验室 γ 能谱测量与分析

SHIYANSHI γ NENGPU CELIANG YU FENXI

李君利 © 主编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书从 γ 能谱测量所必备的基础物理学知识出发,详细描述了实验室 γ 能谱测量与分析的原理、方法及流程,不仅涉及软硬件的操作,还包括详细分析流程的描述,内容涵盖样品的采集制备、仪器的操作运行、实际测量分析过程及质量保证流程的各个环节。

本书可为我国辐射监测领域具有一定专业知识基础的各级从业人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

实验室 γ 能谱测量与分析 / 李君利主编. --北京 :
人民交通出版社股份有限公司, 2014. 12
ISBN 978-7-114-12071-8

I. ①实… II. ①李… III. ① γ 能谱测量—实验室—
化学分析 IV. ①P631.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 032257 号

书 名: 实验室 γ 能谱测量与分析
著 作 者: 李君利
责任编辑: 陈力维
出版发行: 人民交通出版社股份有限公司
地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号
网 址: <http://www.ccpres.com.cn>
销售电话: (010)59757973
总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 14.25
字 数: 329 千
版 次: 2014 年 12 月 第 1 版
印 次: 2014 年 12 月 第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-114-12071-8
定 价: 45.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

全国辐射环境监测培训系列教材

编审委员会

主 任 刘 华

副主任 郭承站 赵永康

委 员 (以姓氏笔画为序)

马 磊 戈立新 帅震清 李君利 杨朝文 杨 斌 宋福祥
张起虹 张家利 陈志东 岳会国 赵顺平 曾 志 潘 苏

《实验室 γ 能谱测量与分析》编写组

主 编 李君利

副 主 编 曾 志 於国兵

编 委 (以姓氏笔画为序)

马国学 马 豪 杜 勤 宋海青 胡 翔 顾先宝

总体审核 岳会国 李宏宇

总 序

我国的核工业自创建发展到今天即将走过十年的历程,辐射环境监测工作开始于20世纪50年代核工业建立初期,当时监测能力和范围非常有限。随着核能开发与核技术利用事业的迅速发展,我国辐射环境监测技术有了长足的进步,尤其是近十年来,辐射环境监测工作取得了显著的成绩,初步建立起适应我国国情的辐射环境监测体系,监测能力逐步提高。

党中央、国务院高度重视环境保护工作,十分关心环境监测事业发展。为适应新形势的发展要求,环境监测在环境管理中的作用更加突出。辐射环境监测是环境监测的重要组成部分,也是核与辐射安全监管的基础性工作,是核与辐射应急决策强有力的支撑,对环境监测起着非常重要和突出的作用。目前,我国辐射环境监测工作面临新的机遇和挑战。一方面,我国核能与核技术利用事业将持续高速发展;另一方面,日本福岛核事故发生后,舆论和公众对辐射环境质量的关注度越来越高,对辐射环境质量监测、核与辐射监督性监测、应急监测与应急响应和监测结果评价与公开等工作提出了更高的要求。

近年来,环境保护部组织建立了全国辐射环境监测组织体系,包括环境保护部辐射环境监测技术中心、环境保护部核与辐射安全中心、环境保护部6个地区核与辐射安全监督站等8个国家级辐射环境监测监管机构,31个省级辐射环境监测机构,106个地市级辐射环境监测机构,初步形成了由国家、省和部分地市组成的三级辐射监测组织体系。截至2011年底,全国辐射监测网络共有1092人,其中技术人员788人,占总人数的72.2%,持证上岗人员736人,占技术人员的93.4%。经过国家、省、市各级环境保护部门的共同努力,全国31个省级辐射环境监测机构和青岛市辐射环境监测机构现共有辐射环境监测设备2472台(套),监测业务用房面积52689m²,全国106个地市级辐射环境监督(监测)机构现共有辐射环境监测设备1384台(套)。

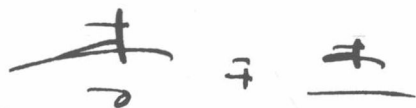
但还应清醒地认识到,我国在辐射环境监测领域还存在着较为突出的问题,包括监测机构职能定位不清,法规、标准体系有待完善,国家级监测能力存在不足,区域监测能力发展不平衡,辐射环境预警体系建设滞后,监测信息发布能力不足,且难以满足公众需求,特别是队伍建设滞后、人员培训不足。目前,我国的辐射监测队伍建设不能适应核与辐射环境监管事业迅速发展的形势,队伍专业化基础薄弱、技术水平停滞不前、高水平人才匮乏、缺少科学的培训体系、没有建立全国性的常态化职业培训机制。

为进一步加强我国核与辐射安全监管能力,全面提升辐射环境监测技术能力,环境保护部、国家核安全局组织清华大学、北京大学、四川大学、环境保护部核与辐射安全中心、环境保护部辐射环境监测技术中心、江苏省辐射环境监测管理站和四川省辐射环境监测管理站等国内多家辐射环境监测的权威机构共同编写“全国辐射环境监测培训系列教材”。该教材共分为10册,涵盖了辐射监测基础知识和基本操作等内容。培训对象覆盖了我国辐射监测体系内各类人员,包括辐射监测机构主要负责人、技术负责人、专业监测领域负责人和监测分析人员。

本系列培训教材的出版,在我国辐射环境监测领域尚属首次,希望本系列教材能成为我国

2 实验室 γ 能谱测量与分析

辐射环境监测人员的必备之书。本系列教材的针对性非常强,突出体现了实用性原则,相信在培养我国辐射环境监测人才方面将发挥巨大的作用。



2014 年 12 月

前 言

辐射环境监测涉及的放射性核素大多会放出 γ 射线。通过测量 γ 射线,不仅可以判断放射性核素的种类,还能得到放射性核素的活度信息。此外,与 α 或 β 射线测量相比, γ 射线测量技术对样品前处理的要求要简单得多。因此,实验室 γ 能谱测量就成为辐射环境监测技术中不可缺少的测量手段,在辐射环境质量监测、监督性监测,以及应急监测中都发挥着重要作用。

另外,与现场 γ 能谱测量相比,实验室 γ 能谱测量具有探测更灵敏、测量结果更精确、标定更方便等优点,但缺点是测量时间比前者要长。在福岛核事故期间,我国辐射环境影响的监测评估工作中,大部分环境样品的监测都用到了实验室 γ 能谱测量技术。

按照环境保护部要求,省市级辐射环境监测实验室必须具备实验室 γ 能谱的监测能力。根据辐射环境样品测量工作的实际需求,并结合各省市辐射环境监测队伍的现状,特编写本教材。

《实验室 γ 能谱测量与分析》是全国辐射环境监测培训系列教材的一个分册,由清华大学工程物理系负责组织编写。本分册主要面向 γ 能谱分析的一线技术人员,共分10章,分别从物理基础、仪器基础、实验室测量与分析三个主要方面,对实验室 γ 能谱测量与分析的主要内容进行了介绍和说明。其中,第1、2章由李君利、曾志、马豪编写,宋福祥审核;第3、4章由曾志、於国兵、顾先宝编写,於国兵审核;第5、6、7章由於国兵、顾先宝、杜勤编写,宋海青、马豪审核;第8章由於国兵、顾先宝、杜勤、胡翔、马国学编写,王世联审核;第9章由於国兵、曾志、马豪编写,曾志审核;第10章由宋海青、马国学、曾志编写,戈立新审核。最后由曾志统稿,李君利定稿,全书由李君利、杨斌审核。

在编写过程中,环境保护部核与辐射安全监管一司及所有参加培训教材编写的单位领导及专家们提供了许多无私的帮助和指点,环境保护部核与辐射安全中心负责本教材的组织出版工作,谨此表示衷心的感谢。

由于编写组专业水平和编写时间有限,教材中错误或疏漏之处在所难免,欢迎读者批评指正。

《实验室 γ 能谱测量与分析》编写组

2014年5月

目 录

第1章 放射性衰变	1
1.1 γ 衰变	1
1.2 衰变纲图	3
1.3 放射性衰变规律	4
第2章 光子与物质相互作用	7
2.1 光电效应	7
2.2 康普顿散射	8
2.3 电子对效应	10
2.4 光子在探测器内的能量沉积与逃逸	11
第3章 高纯锗探测器	15
3.1 工作原理	15
3.2 主要特性	17
3.3 制冷系统	23
3.4 探测器结构	24
第4章 低本底 HPGe γ 谱仪	25
4.1 系统组成	25
4.2 NIM 电子学系统	25
4.3 数字化多道电子学系统	30
4.4 本底	31
4.5 反符合技术	36
第5章 HPGe γ 谱仪安装调试及运维	40
5.1 安装前的准备	40
5.2 安装	42
5.3 系统连接	42
5.4 验收	44
5.5 仪器设备管理和维护	46
第6章 γ 谱分析软件基本操作	47
6.1 Gamma Version 软件	48
6.2 Genie 2000 软件	57
第7章 实验室 γ 谱分析基本步骤	71
7.1 基本流程	71
7.2 步骤一 寻峰	72
7.3 步骤二 能量刻度与峰形刻度	74

7.4 步骤三 效率刻度	77
7.5 步骤四 峰面积计算	83
7.6 步骤五 活度计算及修正	88
7.7 步骤六 不确定度与探测限的计算	102
7.8 步骤七 报告	109
第8章 γ 谱样品分析	110
8.1 测量准备	110
8.2 土壤样品的 γ 谱分析	115
8.3 气溶胶样品的 γ 谱分析	120
8.4 水样的 γ 核素分析	130
8.5 γ 能谱快速定性分析	136
第9章 常见 γ 核素分析	142
9.1 天然放射性核素测量	142
9.2 常见人工核素的测量	150
9.3 示例:福岛核事故气溶胶 γ 谱	166
第10章 γ 谱分析质量控制	169
10.1 组织管理	169
10.2 人员的素质要求和岗位培训	169
10.3 测量装置性能的检验	169
10.4 量值溯源和仪器的检定或自校	178
10.5 γ 谱分析实验室质量控制	181
10.6 监测数据的评定	182
10.7 期间核查与仪器检定	183
附录	184
附录1 常见核素的 γ 能量(根据能量大小排列)	184
附录2 核事件筛选与判别数据库	190
附录3 空爆核试验特征放射性核素数据库	191
附录4 地爆核试验特征放射性核素数据库	193
附录5 反应堆核事故特征放射性核素数据库	194
附录6 核燃料后处理厂释放的特征放射性核素数据库	196
附录7 医用核素释放的特征放射性核素数据库	197
附录8 辐射事故释放的特征放射性核素数据库	199
附录9 γ 射线的质量减弱系数 $\mu(\text{cm}^2/\text{g})$	200
附录10 土壤样品分析实例与流程	201
附录11 监测报告参考格式	208
附录12 γ 谱中可能存在的干扰峰	213
参考文献	217

第1章

放射性衰变

原子是由原子核和核外电子组成的,原子核又由一定数目的质子和中子组成。原子核内具有确定数目的质子和中子,并具有同一能态的原子被称为核素。核素的种类很多,有些核素是稳定的,而有些核素则是不稳定的。当原子核内的质子和中子数失去一定比例时,原子核就处于不稳定状态,这时原子核会自发地衰变为另一个原子核,同时放出射线,这一过程称为核衰变。某些核素可以通过核衰变,变成一种新的核素,同时放出一条或多条射线,这种特性称为放射性。具有放射性的核素称为放射性核素。核衰变的类型较多,但最主要的是 α 衰变、 β 衰变和 γ 衰变,见表1-1。

放射性核素主要衰变模式

表 1-1

衰 变 模 式		反 应 式	例 子
α 衰变		${}^A_ZX \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^4_2\text{He} + Q$	${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$
β 衰变	β^- 衰变	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}Y + e^- + \bar{\nu}$	${}^{32}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{32}_{16}\text{S} + e^- + \bar{\nu} + Q$
	β^+ 衰变	${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + e^+ + \nu_e$	${}^{13}_7\text{N} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + e^+ + \nu_e$
	轨道电子俘获	${}^A_ZX + e \rightarrow {}^A_{Z-1}Y + \nu_e$	${}^{103}_{46}\text{Pd} + {}^0_{-1}\text{e} \rightarrow {}^{103m}_{45}\text{Rh} + \nu_e$
γ 衰变	γ 跃迁	${}^{Am}_ZX \rightarrow {}^A_ZX + h\nu$	${}^{137}_{55}\text{Cs} \rightarrow {}^{137}_{56}\text{Ba} + e + \bar{\nu}$
	内转换	${}^{Am}_ZX \rightarrow {}^A_ZX + e^- + (h\nu)_X$	

经过 γ 衰变后,不同核素放出的 γ 射线能量不同,这可以用来确定核素的种类。同时, γ 射线的穿透能力远强于 α 射线和 β 射线,方便用于环境样品的测量。因此,通过实验室 γ 能谱测量与分析,不仅可以确定环境样品中放射性核素的种类,还可以测量出放射性核素的活度情况。实验室 γ 能谱测量与分析的基础是放射性核素的 γ 衰变,需要对 γ 衰变的特点有所了解。本章主要介绍放射性核素 γ 衰变的物理特性及描述方法,包括 γ 衰变的种类、衰变纲图的构成以及放射性衰变规律等。

1.1 γ 衰 变

原子核从激发态通过发射 γ 光子或其他过程跃迁到较低能态的过程,称之为 γ 衰变。在 γ 衰变过程中,核电荷数不变、核子数不变。它包括了 γ 跃迁和内转换两种形式。放出 γ 射线的原子核其质量数、电荷数均保持不变,只是能量状态发生了变化,如果这种激发态能维持较长的时间,原子核此时处于同质异能态,一般用 ${}^{Am}X$ 表示,其中 X 表示核素元素符号, A 表示质量数, m 表

示同质异能态。同质异能态核素通过 γ 跃迁和内转换回到基态。例如 ^{137}Cs 通过 β^- 衰变到 $^{137\text{m}}\text{Ba}$,之后再通过 γ 跃迁放出一个 0.661MeV 的光子回到 ^{137}Ba 基态。

γ 射线通常是在原子核进行 α 衰变或 β 衰变后伴随发射出来的。原子核激发态存在的时间常常很短(一般为 $10^{-13} \sim 10^{-11}\text{s}$),因而可以认为 γ 射线与 α 、 β 射线同时放出。 γ 射线的能量是单能的,它的大小约等于激发核两个核能级之差(忽略反冲核动能)。多种核素在衰变时可能发射不止一种能量的 γ 射线,而且原子核的衰变数不一定等于射线数。此外,虽然不同核素的能级不同,但是其发射的 γ 射线的能量可能很接近,为此,在一定条件下,某种能量的 γ 射线可能来源于不同的几个核素。这种情况下,需要根据实际情况或找到更多的 γ 射线,来确定核素的种类。常见核素的 γ 射线能量见附录1。

1.1.1 γ 跃迁

核素在进行 α 、 β^- 、 β^+ 或EC等衰变时,产生的子核可能暂时处于较高的激发核能级,之后很快过渡到能量较低的激发态或基态,在这个过渡过程中,多余的能量就以光子,即 γ 射线的形式发射出来,这种伴有 γ 射线的核能级跃迁称为 γ 跃迁,即为 γ 辐射。例如, ^{137}Cs 衰变过程为:



其衰变纲图如图1-1所示。由于 ^{137}Cs 在发生 β^- 衰变的同时,会让它的子核 ^{137}Ba 处于激发态, ^{137}Ba 通过发射光子从激发态跃迁到基态。

1.1.2 内转换

有时原子核发生 γ 跃迁时不发射 γ 光子,而是把多余的能量交给核外绕行的电子(主要是K层电子),使它脱离原子核的束缚而放射出来,这种现象称为内转换(internal conversion),发射的电子的能量是固定的,近似于 γ 光子的能量:

$$E_e = E_i - E_f - \varepsilon_i = h\nu - \varepsilon_i = E^* - \varepsilon_i \quad (1-2)$$

式中: ε_i ——电子的结合能;

E^* ——激发核能量。

从以上可以看到,与 β^- 衰变不同,内转换电子能量是分立的,而 β^- 粒子能谱是连续的。与电子俘获类似,发生内转换后,由于内层出现电子空穴,外层电子会向内层空穴跃迁,从而发出特征X射线或俄歇电子。

内转换系数 α 定义为发射的内转换电子的数目 N_e 和光子数目 N_γ 之比,即:

$$\alpha = \frac{N_e}{N_\gamma} \quad (1-3)$$

α 随着原子序数 Z 的三次方即 Z^3 的增加而增加,同时随着激发能 E^* 的增加而减少。因此,重核元素衰变中,内转换系数比较大,尤其在核素处于低激发态时。而在轻核核素中,主要是 γ 跃迁。由于存在竞争关系,因此,在环境监测领域测量 γ 射线时,一般要选择 γ 射线发射率较高、内转换系数较小的 γ 射线进行监测。

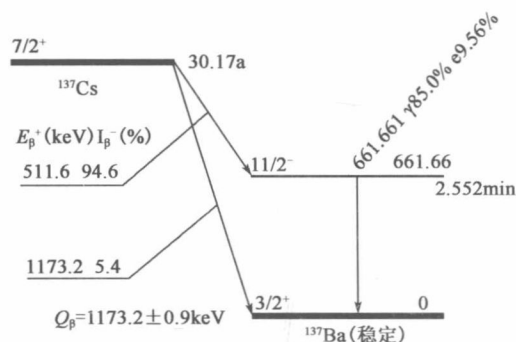


图 1-1 ^{137}Cs 的 γ 跃迁

1.2 衰变纲图

衰变纲图是综合反映某种核素放射性衰变的主要特征和数据的示意图,其中包含了在研究原子核衰变中积累起来的关于原子核激发态性质的大量实验数据。这些数据是测量放射性核素 α 能谱、 β 能谱和 γ 能谱的基础。此外,衰变纲图上给出了放射性核素的半衰期、射线能量及强度的数据,在实验室 γ 能谱测量和分析中,至关重要。

1.2.1 表现形式

衰变纲图一般有两种形式:

1) 单一核素衰变纲图

单一核素的衰变纲图,通常包括:母核和子核核素类别、半衰期、衰变时发射出的粒子(或射线)的种类及其能量和发射概率等能谱学基础数据,同时还会包括能级、衰变能、自旋和宇称等核结构数据。

2) 衰变链的衰变纲图

有些核素属于衰变链,例如天然存在的 ^{238}U 系、 ^{232}Th 系,母核与子核构成一条衰变链。这种情况下,一般用衰变链的方式表达母核和子核之间的先后次序,同时标识出半衰期、主要衰变模式以及分支比等。图1-2所示为天然 ^{232}Th 系衰变链的衰变纲图。

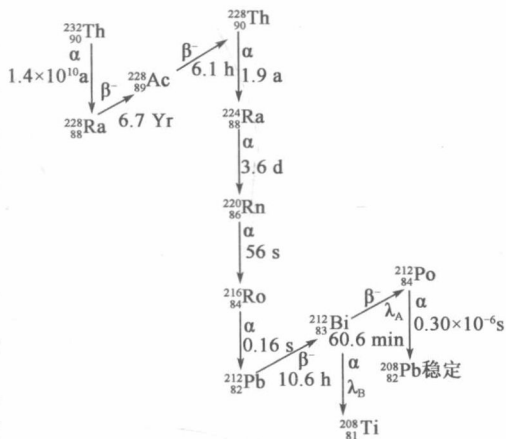


图1-2 天然 ^{232}Th 衰变系列衰变纲图

1.2.2 常用表达方式

衰变纲图中一般以横线表示核能级,最上的粗横线表示母核的基态,最下的粗横线表示子核的基态,中间的横线表示子核的激发态(有的核素的衰变纲图中还会有一条中等粗细的线,表示半衰期较长的激发态,即同质异能态)。母核衰变到子核的基态后,若子核是稳定核素,在子核的基态下标注“稳定”(或 stable);若子核是不稳定核素,在子核的基态下标注其半衰期。同时,在衰变纲图中,一般用 ^AX 表示核素,其中 A 表示核子数(质子与中子之和), X 表示元素符号。

以 ^{40}K 为例来说明衰变纲图各标注的意义,如图1-3所示。从 ^{40}K 的衰变纲图中可以看出,核素 ^{40}K 的半衰期为 $1.2 \times 10^9 \text{ a}$ 。原子核在发生衰变时,可能发生 β^- 衰变,其概率为89.33%,衰变能为1311.6keV;有可能发生轨道电子俘获,其概率为10.67%,衰变能为1505.0keV;也有可能发生 β^+ 衰变,其概率为0.001%。若原子核发生了 β^- 衰变

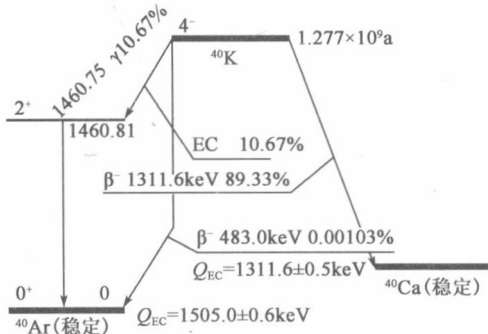


图1-3 ^{40}K 衰变纲图

变,母核 ^{40}K 就会通过发射一个最大能量为 1311.6keV 的 β^- 粒子衰变到 ^{40}Ca 的基态,对于母核,这种 β^- 粒子的发射概率为 89.3%;若原子核发生了轨道电子俘获,母核 ^{40}K 就会通过俘获一个轨道电子而衰变到 ^{40}Ar 的激发态,激发态不稳定,通过发射一个能量为 1460.75keV 的 γ 光子退激到基态,对于母核,这种 γ 光子的发射概率为 10.67%;若原子核发生了 β^+ 衰变,母核 ^{40}K 就会通过发射一个最大能量为 483.0keV 的 β^+ 粒子衰变到 ^{40}Ar 的基态,对于母核,这种 β^+ 粒子的发射概率为 0.001%。

通常情况下,只有发射 γ 射线的放射性核素才有可能使用 γ 能谱仪对其进行测量,但是对于那些子核半衰期较短、又是可以发射 γ 射线的不稳定核素,由于母核与子核之间很快能够达到放射性平衡,因此也可以通过分析子核的 γ 能谱来确定母核的放射性水平。例如裂变产物 ^{106}Ru ,通过衰变纲图可以知道它是纯 β^- 衰变,半衰期是 368.0d, γ 能谱仪不能直接对其测量,但是它的衰变子核是 ^{106}Rh , ^{106}Rh 是不稳定核素,半衰期为 30s,衰变时能够发射适合 γ 能谱仪测量的 γ 射线,在这种情况下就可以通过对 ^{106}Rh 的 γ 能谱的分析来确定 ^{106}Ru 的放射性水平。再例如医院核医学科常用的放射性核素 ^{99}Mo ,半衰期是 66h,它也是纯 β^- 衰变, γ 能谱仪不能直接对其测量,但是它的衰变子核是 $^{99\text{m}}\text{Tc}$,半衰期为 6h,衰变时能够发射适合 γ 能谱仪测量的 γ 射线,在这种情况下也可以通过对 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的 γ 能谱分析来确定 ^{99}Mo 的放射性水平。

1.3 放射性衰变规律

1.3.1 单一核素指数衰减

通过实验,人们发现单位时间内发生衰变的原子核数目和总的原子核数目成正比,因此有:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (1-4)$$

式中: $-dN$ ——发生衰变的核素数目;

N ——原子核总数;

λ ——衰变常数(decay constant),代表了在某一个时间间隔,单位时间内单个原子核发生放射性衰变的概率。于是,可以进一步得到:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-5)$$

式中: $N(t)$ ——时刻 t 对应的原子核数目;

N_0 ——初始时刻对应的原子核数目;

λ ——该核素的衰变常数。

从上式可以看出,放射性核素衰减符合指数衰减规律。

放射性核素衰减到原来的一半所需要的时间,称之为“半衰期(half-life)”,记作 $T_{1/2}$,它的计算也服从指数衰减规律:

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (1-6)$$

单位时间内发生衰变的原子核数目,称之为“活度(activity)”,记作 A ,定义如下:

$$A \equiv -\frac{dN}{dt} \Rightarrow A = \lambda N \quad (1-7)$$

活度的国际单位制单位是贝克勒尔(Becquerel),简称贝克(Bq),1贝克表示1s内有一个放射性核素发生了一次核衰变,即: $1\text{Bq} = 1\text{s}^{-1}$ 。历史上,曾经使用居里(Ci)作为活度的单位,它表示1g镭每秒发生核衰变的数目,即 3.7×10^{10} 。居里与贝克二者的关系为:

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq} \quad (1-8)$$

如果包含活度为 A 的核素的样品质量为 m ,定义“比活度(specific activity)”(记作 C)为:

$$C = \frac{A}{m} \quad (1-9)$$

单位为 Bq/kg。

如果样品的体积是 V ,定义“活度浓度(activity concentration)”(记作 A)为:

$$A_V = \frac{A}{V} \quad (1-10)$$

单位为 Bq/L 或 Bq/m³。

利用活度的定义,并依据指数衰减规律,容易推出:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1-11)$$

式中: A_0 ——初始时刻对应的核素活度。

这就是活度指数衰变的规律。

1.3.2 链式衰减规律

通常,多数放射性核素是经过多次衰变后才变为稳定核素的。如果将初始存在的放射性核素称作母体核素,由它产生的核素就称为子体核素。子体核素有自己的衰变常数,它以一定速率从母体中产生,同时又按照自己的半衰期进行衰变。

先假定衰变链为: $A \xrightarrow{\lambda_1} B \xrightarrow{\lambda_2} C$,在此,设 C 为稳定核素。若以 N_1 和 N_2 分别代表在 t 时刻母体核素 A 和子体核素 B 的原子核数目, λ_1 和 λ_2 代表各自的衰变常数,则分别可以表示为:

$$N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t} \quad (1-12)$$

和

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (1-13)$$

其中, N_1^0 是 A 在 $t=0$ 时刻的原子核数,两式联立,有:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1^0 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2 \quad (1-14)$$

如果满足条件 $t=0$ 时, $N_2=0$,则式(1-14)可以简化为:

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_1^0}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (1-15)$$

由此可以看出,子体核素 N_2 不仅和自己的衰变常数 λ_2 有关,同时也和母核原始数目 N_1^0

以及母核衰变常数 λ_1 有关。当母体 A 的半衰期比子体 B 的半衰期长时, 即 $\lambda_1 < \lambda_2$, 经过足够长的时间(一般为子体核素的 5~6 个半衰期)后, $e^{-\lambda_2 t}$ 与 $e^{-\lambda_1 t}$ 比较, 可以忽略不计, 故上式可以简化为:

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_1^0 e^{-\lambda_1 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (1-16)$$

又因为 $N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t}$, 所以:

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (1-17)$$

或表示为:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (1-18)$$

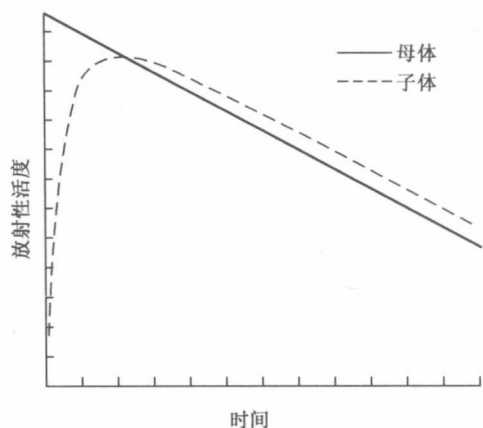


图 1-4 放射性平衡示意图

这样就达到了 N_2/N_1 的比值保持不变的状态, 称为暂时平衡 (transient equilibrium)。在此情况下, 子体的衰变率与母体相同, 如图 1-4 所示。

当母体的放射性寿命与子体寿命相比非常长时, 即 $\lambda_1 \ll \lambda_2$, 可以认为 $\lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_2$, 于是可有下表示:

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_1^0}{\lambda_2} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (1-19)$$

经过足够长的时间后, $e^{-\lambda_2 t} \approx 0$, 因此上式可以简化为:

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_1^0}{\lambda_2} e^{-\lambda_1 t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1 \quad (1-20)$$

如果母体核素的半衰期非常长, 则可近似有:

$\lambda_1 = 0, e^{-\lambda_1 t} \approx 1$, 这时, $N_1 \approx N_1^0$, 所以可得出:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1^0 \quad (1-21)$$

式(1-21)表明: 当母体核素的寿命非常长时, 经过足够长的时间之后, 子体核素 N_2 与母体核素 N_1 之比为一常数, 其值为 λ_1/λ_2 。这种状态表明, 子体核数 N_2 由于母体核素的衰变不断增加, 但经过足够长的时间以后, N_2 达到一饱和值, 如上式所示。从此, 子体核素的生长率与衰减率相等, 它的原子核数 N_2 不再变化, 通常把这种状态称为长期平衡。

放射性核素衰变链在实验室 γ 能谱测量与分析中有重要作用。它使得可以通过测量子核的活度间接测量出母核的放射性活度, 而且通过选择合适的 γ 射线全能峰, 可以减少其他核素的干扰, 从而提高测量的精确度。

第2章

光子与物质相互作用

光子与物质的相互作用是一种“单次性”的随机事件。就单个光子而言,它穿过物质时只有两种可能:要么发生相互作用被吸收或转化成次级粒子,要么不发生任何作用而直接穿过。一旦发生相互作用,入射光子的全部或部分能量将被转换为电子能量。这就意味着光子将在物质中沉积能量。这个能量会转换成脉冲信号被 γ 能谱仪记录下来,进而形成 γ 能谱。在环境样品中,常见的放射性核素发出的光子与物质相互作用时,主要包括光电效应、康普顿效应、电子对效应三种类型。要分析 γ 能谱,需要先了解这三种相互作用类型。

2.1 光电效应

2.1.1 光电效应过程

当光子与物质原子中的一个束缚电子发生相互作用时,其全部能量将转移给电子(原子核的反冲能忽略不计),使之克服原子核的束缚而成为自由电子,原来的光子消失,这种效应称为光电效应。光电效应及其原子退激过程如图 2-1 所示。

当发生光电效应时,光子从 K(或者 L, M) 壳层打出一个光电子,将会在这个壳层留下一个空位,并使得原子处于激发态。它的退激过程有两种:第一种是发射特征 X 射线,也就是外层电子向内层跃迁过程中所释放的能量以特征 X 射线的方式发射出去;第二种是把跃迁的能量直接传递给外层电子,使它从原子中发射出去,这种电子就被叫作俄歇电子。

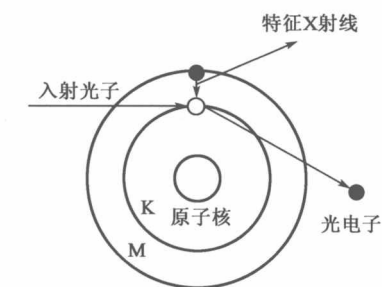


图 2-1 光电效应及其原子退激过程示意图

光电效应过程中放出的电子称为光电子,其动能为:

$$E_e = h\nu - \varepsilon_i \quad (2-1)$$

式中: $h\nu$ ——光子能量;

ε_i —— i 层的电子结合能。

只有光子能量大于壳层电子的结合能时才能发生光电效应。

光电效应过程中,光子是与原子整体(而非和自由电子)发生相互作用。电子在原子中束缚得越紧,就越容易使原子核参与相互作用,发生光电效应的概率就越大。因此, K 层的电子发生光电效应的概率最大, L 层次之,以此类推。

2.1.2 光电峰与全能峰

对于能量为 $h\nu$ 的光子,当其入射到较小尺寸的探测器时,光电效应产生的光电子被探测器吸收、但光电效应产生的次级特征 X 射线可能逃逸出探测器,从而使得入射光子的能量 $h\nu$ 没有全部沉积在探测器中,此时产生的峰叫作“光电峰”;当其入射到较大尺寸的探测器时,光电效应产生的光电子被探测器吸收,同时光电效应产生的次级特征 X 射线也被探测器所吸收,从而使得入射光子的能量 $h\nu$ 全部沉积在探测器中,此时产生的峰叫作“全能峰”。图 2-2 所示为使用 2 英寸 NaI(Tl) 探测器测量 ^{57}Co 点源得到的能谱示意图,可以看到明显的逃逸峰与全能峰。

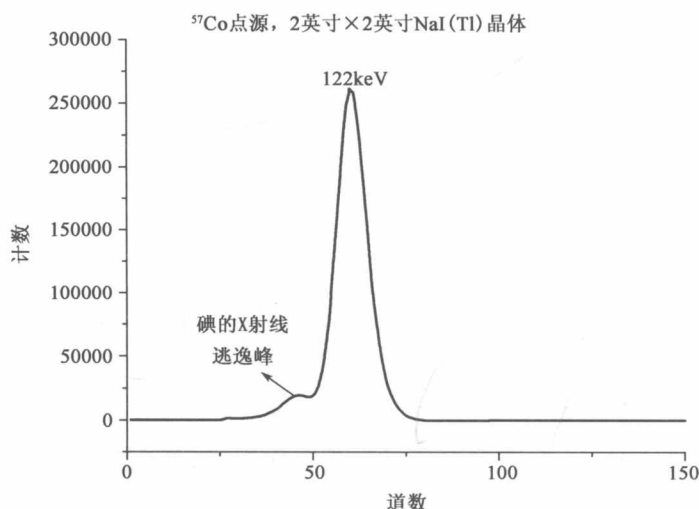


图 2-2 使用 2 英寸 NaI(Tl) 探测器测量 ^{57}Co 点源的能谱示意图

光电峰与全能峰之间的能量差为特征 X 射线的能量。因此,对某核素 A,光电峰也叫 A 逃逸峰。但是光电峰和全能峰两者之间能否区分出来,则是由探测器尺寸、探测器的能量分辨率、核素所发射的特征 X 射线的能量等诸多因素决定的。

2.2 康普顿散射

2.2.1 物理过程

入射光子与原子的核外电子发生非弹性散射,把一部分动能转移给电子,使它脱离原子射出而成为反冲电子,同时光子损失能量并改变运动方向而成为散射光子,这种效应成为康普顿效应,也称之为康普顿散射,如图 2-3 所示。

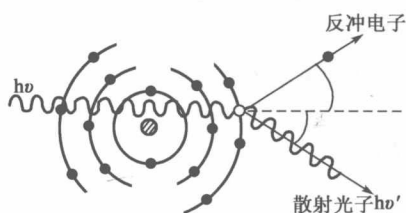


图 2-3 康普顿效应示意图

康普顿效应主要是 γ 射线与靶原子最外层电子之间的作用。最外层电子的结合能很小,通常只是电子伏量级,与入射光子的能量相比完全可以忽略不计,所以可以把外层电子看成是静止的“自由电子”,康普顿散射也就