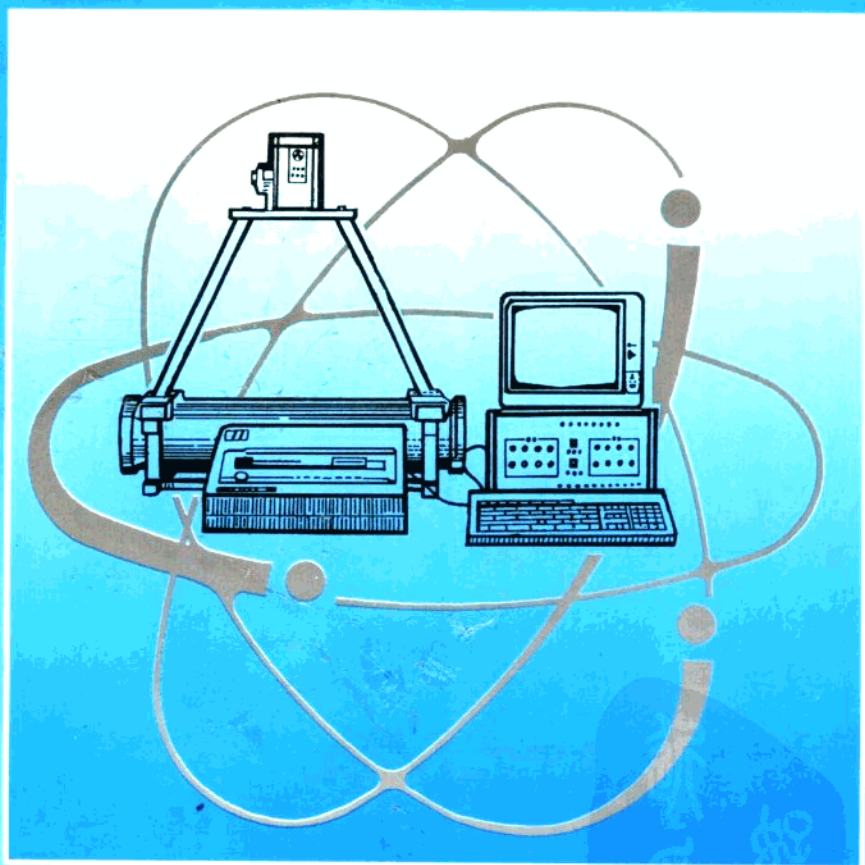


王炳元 主编

核探测微机称重 技 术 应 用



原子能出版社

核探测微机称重技术应用

王炳元 主编

王炳元 陈 鹏
陈凤河 杨倩莉 编著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

核探测微机称重技术应用/王炳元主编. —北京:原子能出版社, 1996. 12

ISBN 7-5022-1644-8

I. 核… I. 王… III. 核子-称重仪-计算机应用 N. TH715.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 22372 号

内容简介

本书论述了核探测与微机称重技术的基本理论,并以微机核子秤为例详细介绍了其原理、使用和维护。由于本书是结合生产实际、科研和教学需要编著的,它涉及多门交叉学科,内容丰富,实用性强。

本书系统地介绍了核辐射探测的基本原理、辐射探测器、核电子学的基础理论;详细论述了核子秤的有关电子电路,显示技术,微机处理技术,微机核子秤抗干扰及屏蔽接地技术,并对微机核子秤的一个典型产品 CCG 作了详细的叙述;为了便于进一步推广核技术的应用,本书还对核防护知识作了一定的介绍。

本书可供从事仪器仪表、自动化、电子计量、计算机等专业的科研、教学及从事工程实践、设计工作及微机核子秤的操作等人员参考。本书也可作为有关专业学生的选修教材或参考书,以及微机核子秤培训班的教材。

©原子能出版社, 1996

原子能出版社出版发行

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

原子能出版社印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/16 印张 12 字数 300 千字

1996 年 12 月北京第 1 版 1996 年 12 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000

定价:13.6 元

前 言

随着近代科学技术的发展,在生产过程中对称重技术和控制技术的要求愈来愈高。微机核子秤正是在这样的情况下产生的。由于它把电子技术,计算机技术,核电子学,核放射技术,控制技术,计量技术等众多学科综合在一起,所以具有许多机械秤、电子秤不具备的独特优点:无接触测量,抗干扰能力强,可在非常恶劣的环境条件下工作,便于与计算机技术、电子技术、控制技术相结合而实现计量和控制自动化。微机核子秤尽管已广泛应用在水泥、电力、煤炭、冶金、采矿、粮食加工、锅炉等各个部门的内部计量考核使用,但是目前尚无这方面的书籍。所以迫切需要一本能满足广大科技工作者,工程技术人员,微机核子秤的使用、维修和计量人员以及有关院校师生参考学习的资料。本书正是为适应这种形势发展的需要,结合编著者近年来的工作实践,教学科研和实际体会,并参考及学习了大量科技文献资料撰写的。全书共分八章:第一章,核辐射探测的基本原理;第二章,核辐射探测器;第三章,核电子学。这三章是核技术应用的基础。第四章,介绍了微机核子皮带秤,它是核技术与计算机技术的有机结合,本章详细讲解了有关称重原理、传感器、显示仪表、模拟数字转换、滤波、微机数据处理技术及计算机软件,本章是全书的重点。第五章为核子秤的抗干扰和屏蔽接地技术;第六章介绍了配料皮带秤;第七章对微机核子秤的一个典型产品 CCG 作了详尽介绍;第八章对核辐射防护知识进行了讲解。

全书内容可分为两大部分,第一、二、三章为核子秤的理论基础,读者需要一定的高等数学、高等物理、电子学等基础知识,这部分内容可作为高等院校非核物理专业的学生及研究生选修课使用。一些现场工作的工程技术人员和维修人员,可径直阅读本书第四章微机核子秤内容及后面章节。为照顾不同对象,第四章、第六章、第七章是按独立成篇编著的。

本书各章节编著分工如下:王炳元撰写第一章、第二章、第三章、第四章、第五章、第八章,陈鹏、陈凤河撰写第七章,杨倩莉撰写第六章及第七章第六节,全书最后由王炳元修改、定稿。

由于本书涉及的学科较多(之所以编写此书,主要是为了给广大微机核子秤使用者提供一本较全面的学习资料以应急需),加上编者水平有限,再加上时间紧迫,书中错误和缺点在所难免,恳请读者批评指正,同时也希望本书能起到抛砖引玉的作用,有更好的有关书籍问世。

在本书编写过程中,参考学习了有关文献、专著,在此向这些作者予以致谢。在编写过程中得到了中国原子能科学院、北京得天探测技术研究所及山西矿业学院监控研究所、山西远通电子工程公司等单位 and 河南开封测控研究所的冯跟胜、谢五星、谢凡、葛学海等同志的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

编著者

1996年2月26日

目 录

前 言

第一章 核辐射探测的基本原理	(1)
第一节 概念与术语	(1)
第二节 核辐射的基本特性	(5)
一、几种主要粒子的性质	(5)
二、放射性衰变的基本规律	(6)
第三节 X 和 γ 射线的探测原理	(7)
一、光电效应	(7)
二、康普顿散射	(9)
三、电子对产生效应	(9)
四、X 和 γ 射线的吸收	(10)
第二章 核辐射探测器	(12)
第一节 引 言	(12)
第二节 气体探测器	(13)
一、气体探测器工作状况概述	(13)
二、气体电离室	(16)
三、正比计数器	(21)
四、G-M 计数管	(24)
五、气体探测器的主要指标和应用	(26)
第三节 半导体探测器	(26)
一、概述	(26)
二、半导体探测器的应用	(27)
第四节 核辐射探测器的一般特性	(27)
一、核辐射探测器的本征电流信号	(27)
二、核辐射探测器的运行工作方式	(28)
三、探测器的探测效率	(30)
四、电流运行方式下探测器的一般特性	(30)
五、脉冲运行方式时探测器的一般特性	(32)
第五节 选用探测器等测量装置时主要考虑的问题	(35)
一、选用探测器	(35)
二、选用电子仪器	(35)
三、选用探测器附属装置	(36)
四、选用微型计算机	(36)

第三章	核电子学	(37)
第一节	引言	(37)
第二节	探测器中的能量-电荷转换	(37)
一、	能量-电荷转换系数	(37)
二、	探测器的固有能量分辨率	(39)
三、	探测器的线性和稳定性	(41)
第三节	探测器的输出电流波形	(43)
第四节	探测器的电源	(46)
一、	探测器电源的技术指标和辅助功能	(47)
二、	高压电源的工作原理	(48)
第五节	核电子学中信号处理的基本要求	(49)
第六节	前置放大器	(50)
一、	概述	(50)
二、	前置放大器的种类	(51)
三、	电荷灵敏前置放大器中的噪声	(53)
四、	电荷灵敏前置放大器的上升时间和时间分辨率	(54)
第七节	脉冲放大器	(54)
一、	脉冲成形	(54)
二、	能谱测量放大器,线性放大器	(56)
三、	偏置放大器	(58)
第八节	幅度甄别器	(58)
一、	积分甄别器	(58)
二、	微分甄别器	(58)
第四章	微机核子皮带秤	(60)
第一节	皮带秤的发展情况	(60)
一、	皮带秤的起源和发展	(60)
二、	皮带秤产品的开发动向	(62)
第二节	皮带秤的称重原理	(63)
一、	称重系统的组成部件	(63)
二、	称重原理	(64)
第三节	皮带秤的分类	(64)
一、	现有的分类方法	(64)
二、	推荐一种新的分类法	(65)
第四节	核子皮带秤	(65)
一、	核子皮带秤概况	(65)
二、	核子皮带秤的结构原理	(66)
三、	对核子皮带秤准确度的影响因素	(68)
四、	核子皮带秤的校准与准确度	(68)
五、	核子皮带秤的使用、维护和应用	(68)

第五节 核子皮带秤的二次仪表	(69)
一、模拟式仪表	(69)
二、数字式仪表	(70)
三、电脑式仪表	(70)
四、分布式仪表	(72)
第六节 放射源和电离室	(72)
一、 $^{137}\text{Cs}\gamma$ 辐射输出器	(73)
二、 γ 射线探测器	(73)
三、秤体前置放大器及电源	(73)
第七节 核子秤中的测速传感器	(74)
一、接触式测速传感器	(74)
二、非接触式测速传感器	(74)
三、接近开关式传感器	(75)
第八节 A/D 转换器	(76)
一、A/D 转换器的技术指标	(77)
二、A/D 转换器实例分析	(80)
第九节 滤波器	(87)
一、噪声的性质和分类	(87)
二、无源滤波器	(89)
三、有源滤波器	(91)
四、数字滤波器	(92)
第十节 数据处理与电脑软件	(96)
一、计量偏差修正	(96)
二、状态跟踪	(100)
第十一节 微机核子秤的显示接口和总线	(103)
一、键盘、显示器及其接口电路	(103)
二、标准总线	(114)
第十二节 微机核子秤中的软件容错技术	(124)
一、软件容错技术	(124)
二、输入输出抗干扰措施	(125)
三、软件消除抖动	(125)
四、数据测量的抗干扰	(126)
五、软件抗干扰	(128)
六、用软件消除零点误差及漂移	(134)
七、PID 调节器抗失控措施	(135)
八、开辟多个存储器抗干扰	(135)
九、软、硬件结合的抗干扰方法	(136)
十、8096/8098 抗干扰编程方法	(140)
第五章 核子秤的抗干扰技术和屏蔽接地技术	(144)

第一节	屏蔽接地的必要性	(144)
第二节	核子皮带秤的防雷保护接地	(144)
第三节	核子皮带秤的抗干扰屏蔽接地技术	(144)
一、概述		(144)
二、工业环境中的噪声源及耦合途径		(145)
三、屏蔽和屏蔽接地技术		(147)
第四节	接地装置的制造、安装技术	(148)
一、地与接地电阻		(148)
二、接地桩和地线		(149)
三、接地电阻的测定		(149)
第六章	配料皮带秤	(150)
第一节	系统构成和配料方式	(150)
一、恒速配料方式		(150)
二、调速配料方式		(151)
三、同步调速方式		(152)
四、双调速配料方式		(152)
第二节	配料皮带秤机械结构形式	(153)
一、悬臂式配料皮带秤		(154)
二、整机式配料皮带秤		(155)
第三节	环形皮带及其驱动方式	(156)
一、环形皮带		(156)
二、环形皮带的驱动方式		(157)
第四节	配料皮带秤的显示仪表	(157)
一、显示仪表		(157)
二、配料的设定方式		(159)
三、D/A 转换电路		(160)
第五节	调速电机型式	(163)
一、直流电机调速		(163)
二、滑差电机调速		(163)
三、变频式调速电机调速		(163)
第七章	CCG 系列核子秤	(164)
第一节	CCG 系列核子秤简述	(164)
第二节	技术特点和指标	(164)
第三节	物理原理	(165)
第四节	系统构成及可靠性、抗干扰设计	(166)
一、放射源		(166)
二、 γ 射线探测器		(166)
三、前置放大器及电源板		(167)
四、测速系统		(167)

五、主机	(167)
六、可靠性及抗干扰设计	(167)
第五节 主机操作	(169)
一、动态参数屏	(169)
二、静态参数 1 屏	(171)
三、静态参数 2 屏	(172)
四、键盘各键功能	(173)
五、状态参数屏	(173)
六、日期、时间操作屏	(174)
第六节 CCG 微机核子秤的安装与维修	(174)
一、主机部分的安装	(174)
二、现场秤架部分的安装	(174)
三、常见故障及排除	(176)
第七节 CCG 微机核子秤的标定、控制调试及联网	(176)
一、整机调试	(176)
二、核子秤的标定	(176)
三、配料与回控的调试	(178)
四、CCG 核子秤系统联网	(178)
第八节 放射性常识	(178)
第九节 办理放射源使用证	(179)
第八章 核辐射防护	(180)
第一节 人类周围始终存在着辐射	(180)
一、宇宙射线	(180)
二、宇生放射性核素	(180)
三、原生放射性核素	(180)
四、人类生产活动使天然本底照射的增加	(180)
第二节 辐射防护中常用的量和术语	(181)
一、吸收剂量和吸收剂量率	(181)
二、剂量当量和剂量当量率	(182)
第三节 辐射防护	(182)
一、辐射防护的目的	(182)
二、个人剂量的限制	(182)
参考文献	(184)

第一章 核辐射探测的基本原理

核辐射的探测原理是基于核辐射源与被探测的物质之间的相互作用,了解这些相互作用的基本特性,物理概念和作用机制,对于理解各种核辐射探测器基本原理十分重要。本章先介绍核辐射探测的基本概念与术语,而后讲述核辐射的基本特性,最后介绍核技术应用中最广泛使用的 X 射线和 γ 射线的探测原理。

第一节 概念与术语

原子 由带正电的原子核,及绕核旋转带负电的电子组成。电子负电荷的总和等于原子核的正电荷,因而原子不显电性。原子直径为 $10^{-10} \sim 10^{-9} \text{m}$ 。原子的化学性质取决于原子核的正电荷。

原子核 由质子和中子(统称核子)组成。原子核的直径约为 10^{-14}m 。

原子序数与等效原子序数 原子核中的质子数目,以符号 Z 表示。它等于核的带电量(以质子电量为单位计算)。等效原子序数由化合物或混合物的组成比份及它们的原子序数计算得出。

质量数 原子核中的核子数目,即核中质子与中子的总数,以符号 A 表示, $A = Z + N$, N 表示中子数。

[统一的]原子质量单位 一个统一的原子质量单位等于一个处于基态的 ^{12}C 中性原子的静止质量的 $1/12$,用符号 u 表示。

$$1u = (1.6605402 \pm 0.0000010) \times 10^{-27} \text{kg}$$

一个 ^{12}C 中性原子处于基态的静止质量的 $1/12$,称为[统一的]原子质量常量,用符号 m_u 表示,

$$m_u = (1.6605402 \pm 0.0000010) \times 10^{-27} \text{kg}$$

$$\frac{m_a}{m_u} \text{ 称为相对原子质量,式中 } m_a \text{ 为原子质量。}$$

核的结合能 核的质量,比组成核的质子和中子的质量之和要小。该质量差是由组成核的粒子结合成原子核时放出能量而引起的。为了使核分离成初始的粒子,必须给核一定的能量,它正好等于这一质量差。该能量就是结合能,用符号 E_b 表示。大多数核中,一个核子的结合能大体相等,约为 8MeV 。

质 子 电量为 $+1.60219 \times 10^{-19} \text{C}$ 、静止质量为

$$\begin{aligned} m_p &= (1.6726485 \pm 0.0000086) \times 10^{-27} \text{kg} \\ &= (1.007276470 \pm 0.000000011)u \end{aligned}$$

的稳定的基本粒子,常用符号 p 表示。质子是氢原子核。

中 子 不带电、静止质量为

$$\begin{aligned}m_n &= (1.6749543 \pm 0.0000086) \times 10^{-27} \text{kg} \\&= (1.008665012 \pm 0.000000037) \text{u}\end{aligned}$$

平均寿命为 1000s 左右的基本粒子,常用符号 n 表示。

核 子 原子核的成分,即质子和中子的统称。

电 子 电量为 $e = (1.6021892 \pm 0.0000046) \times 10^{-19} \text{C}$ 、静止质量为

$$\begin{aligned}m_e &= (0.9109534 \pm 0.0000047) \times 10^{-30} \text{kg} \\&= (5.4858026 \pm 0.000000021) \times 10^{-4} \text{u}\end{aligned}$$

的稳定的基本粒子。不加说明时,此术语表示带负电的电子,又称为阴电子或负电子。它的反粒子是带正电的电子,又称为阳电子或正电子。

核 素 具有特定的质量数、原子序数和核能态,而且其平均寿命长得足以被观察的一类原子,如:

$^{104}_{44}\text{Ru}$ 与 $^{105}_{45}\text{Rh}$ 因质子数不同而为两种核素;

$^{100}_{44}\text{Ru}$ 与 $^{100}_{45}\text{Rh}$ 因质子数、中子数皆不同而为两种核素;

$^{60}_{27}\text{Co}$ 与 $^{59}_{27}\text{Co}$ 因中子数不同而为两种核素;

$^{60}_{27}\text{Co}$ 与 $^{60\text{m}}_{27}\text{Co}$ 因核所处的能态不同而为两种核素。

同位素 具有相同的 Z 值、不同的 A 值的核素。同一种元素的几种同位素的原子核的稳定性差别很大。大部分化学元素都有两种或两种以上的同位素。超铀元素的同位素数目更多。同位素具有相同的化学性质。

同位素丰度 一种元素的同位素混合物中,某特定的同位素的原子数与该元素的总原子数之比。存在于自然界的一种元素中,某种指定的同位素在该元素中的丰度,称为该同位素的天然丰度。

放射性衰变 一种自发的核转变的过程。在这种转变过程中放出粒子或 γ 辐射,或在发生轨道电子俘获之后放出 X 射线,或发生自发裂变。

放射性衰变的方式: α 衰变、 β 衰变(包括 β^- 衰变、 β^+ 衰变和轨道电子俘获)、 γ 衰变(包括 γ 跃迁和同质异能跃迁)、内转换和自发核裂变。

一种核素能以两种或多种方式进行的放射性衰变,称为分支衰变。原子核中以某种指定方式衰变的份额,称为分支份额。分支份额通常以百分数表示。

半衰期与衰变常数 特定能态的放射性核素的核数目衰减一半所需时间的期望值,称为半衰期,用符号 $T_{1/2}$ 表示。

某种放射性核素的一个核在单位时间内进行自发衰变的概率,称为衰变常数,用符号 λ 表示。衰变常数 λ 由下式给出:

$$\lambda = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt}$$

式中 N 是在时间 t 时存在的该核素核的数目。

平均寿命是指处于特定能态的一定量放射性核素平均生存的时间,即放射原子核的数目减少到原来数目的 $1/e$ 所需时间的期望值,用符号 τ 表示。

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = \tau \ln 2$$

α 衰变 原子核放射 α 粒子的放射性衰变。一次 α 衰变后该原子核的原子序数减少 2,质

量数减少 4。

原子核 A_ZX 经 α 衰变后转变为子核 ${}^{A-4}_{Z-2}X$ 。

α 粒子和 ${}^4\text{He}$ 核一样,是由两个中子和两个质子结合成的束缚态的稳定粒子,是在核衰变时发射出来的。

α 粒子组成的辐射称为 α 辐射。

β 衰变 原子核放射 β 粒子或俘获轨道电子的放射性衰变。原子核的 β 衰变使原子序数增加或减少,但不改变其质量数。

β^- 衰变过程中,核内一个中子转变为质子,同时发射一个 β^- 粒子(即负电子 e^-)和一个反中微子 $\bar{\nu}$,即 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ 。

β^+ 衰变过程中,核内一个质子转变为中子,同时发射一个正电子 e^+ 和一个中微子 ν ,即 $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ 。

轨道电子俘获记作 EC 衰变。不稳定的原子核通过轨道电子俘获的方式衰变时,原子核内的一个质子从核外的电子轨道上俘获一个电子转变为中子,同时发射出一个中微子 ν ,即 $p + e^- \rightarrow n + \nu$ 。

β 粒子是在核转变时由原子核发射的,或者是在中子或不稳定粒子衰变时产生的带正电荷或负电荷的电子。

β 粒子组成的辐射称为 β 辐射。

γ 辐射 核跃迁或粒子湮没过程中发射的电磁辐射。

发生在原子的核外部分,由波长比可见光短得多的光子组成的辐射(湮没辐射除外),称为 X 辐射。

核裂变 一个重核分为两部分(或在少数情况下分为更多部分)的现象。裂变后的各部分具有同一数量级的质量,通常同时放出中子、 γ 辐射,在少数情况下还放出小的带电核碎片。

由裂变产生的原子核称为裂变碎片。裂变碎片由裂变获得动能。

由裂变产生的核素或由裂变产生的核素接着进行放射性衰变而形成的其他核素,称为裂变产物。

原子核在不加粒子或不注入能量的情况下发生的核裂变,称为自发裂变。

戈[瑞] 国际单位制与我国法定的吸收剂量、比释动能和比能的单位的专门名称,符号为 Gy, $1\text{Gy} = 1\text{J/kg}$ 。过去曾用拉德(rad)作为吸收剂量的专用单位。

$$1\text{Gy} = 100\text{rad}$$

希[沃特] 国际单位制与我国法定的剂量当量单位的专门名称,符号为 Sv。 $1\text{Sv} = 1\text{J/kg}$ 。过去曾用雷姆(rem)作为剂量当量的专用单位。

$$1\text{Sv} = 100\text{rem}$$

照射量 照射量 X 定义为 dQ 除以 dm 所得的商,即

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

式中 dQ 为 X 或 γ 辐射在质量为 dm 的空气中释放出来的全部电子(正电子和负电子)被空气阻止时,在空气中产生一种符号的离子的总电荷的绝对值。但 dQ 内不包含该质量中释放出来的次级电子发射的韧致辐射被吸收后产生的电离。

国际单位制及我国法定单位中,都没有照射量专用单位,而采用 C/kg 为单位。历史上曾

用伦琴(R)作为照射量的专用单位。 $1\text{R}=2.58\times 10^{-4}\text{C/kg}$ (准确值)。

反应能 在核反应过程中,反应生成物的动能和光子能量的总和与反应物的动能和光子能量的总和之差,以符号 Q 表示。对于放能反应, $Q>0$; 对于吸能反应, $Q<0$ 。

[粒子]注量、[粒子]注量率 在空间一给定点处射入以该点为中心的小球体的粒子数 dN 除以该球体的截面积 da 所得之商,称为该定点处的[粒子]注量,以符号 Φ 表示。

$$\Phi = dN/da$$

[粒子]注量率以符号 φ 表示,

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d^2N}{da dt}$$

式中 $d\Phi$ 为 dt 时间间隔内,[粒子]注量的增值。

通常粒子一词用所指粒子的名称代替,例如质子注量(率)、中子注量(率)等。

电子伏 能量单位,等于电子在真空中通过 1V 电压电场所获得的动能。用符号 eV 表示。近似地, $1\text{eV}=1.6021892\times 10^{-19}\text{J}$ 。如果质量 m 以原子质量单位 u 表示,能量 E 以电子伏 eV 表示,则爱因斯坦质能方程应写作:

$$E = 9.31 \times 10^8 m$$

电离 原子或原子团失去电子或得到电子而变成离子的过程。

激发 向一个系统补充能量,使其从基态跃迁至激发态的过程。一个核、原子或一个分子的激发可由吸收光子或在与同其他粒子的非弹性碰撞中发生。

基态 一个核、原子或分子的最低能量状态。所有其他能量较高的状态称为“激发”态。

韧致辐射 电磁场使带电粒子动量改变的发射的电磁辐射。

辐射俘获 原子核俘获一个入射粒子并发射瞬发 γ 射线的过程。原子核俘获一个中子,然后放出 γ 量子释放激发能的过程称为“中子辐射俘获”。辐射俘获时放出的 γ 辐射称为俘获 γ 辐射。

宇宙辐射 来自地球外部的能量很高的初级粒子,以及由这些粒子与大气外层相互作用产生的次级粒子组成的辐射。

电子对产生 一个具有足够能量(至少大于 1.02MeV)的光子在原子核或其他粒子的场作用下产生一个正电子和一个负电子的过程。

湮没 电子与正电子之间的一种相互作用,在此作用过程中,正电子与电子消失,而其能量(包括静止能量)转化成电磁辐射。

平均自由程 某种粒子在一给定的介质中发生一种(或数种)指定类型的相互作用前,所移动的平均距离。故平均自由程可表示为对于各种相互作用的总平均自由程,也可表示为对某种特指类型的相互作用,如散射、俘获或电离等的特定的平均自由程。

吸收 1) 辐射转移部分或全部能量给所穿过的物质的现象。伴随有能量损失的散射(如康普顿散射)属于这种现象。

2) 入射粒子与物质相互作用不再作为自由粒子存在的现象。可包括随后放出一个或几个与入射粒子相同或不同的粒子,但不包括入射粒子的散射。

线衰减系数 通过单位厚度某种物质的 γ 辐射束,由所有的吸收与散射过程导致的光子数目减少的比分,用符号 μ 表示。

质量衰减系数 线衰减系数除以该物质的质量密度, μ/ρ , 用符号 μ_m 表示。

硬度 这是 X 射线穿透能力的一种相对表述。辐射的波长越短,辐射越硬。

半厚度 将单向粒子流的辐射量减少到初始值一半时的减弱层厚度,符号为 $d_{1/2}$ 。对于指数衰减系统: $d_{1/2} = \ln 2 / \mu$ 。此量还可称为半值厚度,或半值层。

上述概念与术语,主要供读者在了解有关核技术方面的文献时作为参考和查阅,由于篇幅有限,不能详细予以介绍,请读者谅解,但在本书中所涉及到的概念和术语还要作详细介绍。

第二节 核辐射的基本特性

在各种核跃迁中,从原子核中释放出来的辐射,包括 γ 辐射、中子辐射、 α 和 β 辐射等称为核辐射。本节及下节所涉及的探测对象除核辐射外,还包括 X 射线、质子和其他重带电粒子。由于它们本身是粒子或具有粒子性质,有时也将它们称为粒子。本节着重介绍几种主要粒子的性质和放射性衰变的基本规律。

一、几种主要粒子的性质

1. 中子和质子

组成原子核的中子和质子统称为核子。质子(用符号 p 表示)是氢原子核,也是组成所有其他原子核的基本粒子之一。其自旋为 $1/2$,带一个正电荷($1.6021892 \times 10^{-19} \text{C}$),静止质量为 $1.6726485 \times 10^{-27} \text{kg}$ 。用加速器可以得到各种能量的质子。中子是一种不带电荷、与质子一起组成除氢以外所有其他原子核的基本粒子,其自旋也为 $1/2$,静止质量为 $1.679543 \times 10^{-27} \text{kg}$ 。中子在自由状态下是不稳定的(束缚在原子核内的中子是稳定的),会衰变成质子、电子和反中微子,其半衰期为 10.6min 。大量的中子是由反应堆和加速器产生的,实验室内也常利用放射性同位素中子源的中子。

2. α 粒子

α 粒子是核衰变时放出的重粒子。它由两个中子和两个质子组成,带两个正电荷,质量为电子质量(用 m_e 表示)的 7296.03 倍。它与 He 的原子核相同,习惯上称之为 α 射线。其能量一般在 $4 \sim 9 \text{MeV}$ 范围内。

3. 电子

电子是一种稳定的亚原子粒子,其电荷量为 $\pm 1.6021892 \times 10^{-19} \text{C}$,静止质量为 $9.109534 \times 10^{-31} \text{kg}$ 。不加说明时,它通常指带负电荷的电子,也叫负电子。它的反粒子是带正电荷的电子,称为正电子。 β 衰变中放出的电子(β^-)或正电子(β^+)称为 β 粒子。原子核由质子和中子组成,核内不存在电子,因此 β 衰变实质上是中子和质子互相转化的过程。中子转变成质子放出 β^- 粒子,质子转变成中子则放出 β^+ 粒子。

β 射线的能量是连续的,一般小于 2MeV ,虽然比 α 射线的能量低,但电子的质量小,因此它的速度比 α 粒子快得多。

4. γ 辐射(γ 射线)和 X 辐射(X 射线)

γ 辐射和 X 辐射都是电磁辐射。 γ 辐射是核跃迁或粒子湮没过程中发出的电磁辐射。它们具有明显的粒子性,因此通常也称之为光子。其自旋为 1 ,静止质量为 0 ,不带电荷。由量子力学知道,光子的能量为:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1-1)$$

式中: h 是普朗克常数, 其值为 $(6.6260755 \pm 0.0000040) \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$; ν 是振动频率; c 是光速; λ 为波长, 单位用 nm。能量 E 的单位相应为 J 或化为 eV [$1\text{eV} = 1.60217733 \pm 0.00000049) \times 10^{-19} \text{J}$]。

通常应用的 γ 射线是由 γ 放射性核素发射的, γ 辐射大都是母核进行 α 或 β 衰变后, 原子核处于较高激发态, 退激到较低激发态或基态时发出的。其能量为与跃迁有关的两个能级间的能量差, 通常在几十 keV 与几 MeV 之间。

X 辐射是核外电子跃迁过程中产生的电磁辐射。原子内特定轨道的电子从高能级跃迁到低能级时发射的辐射称为特征 X 射线。

5. 重离子

重离子是原子序数等于或大于 2 的核素的带电原子或原子核, 它们存在于宇宙线中。供实验用的则主要是用重离子加速器人工产生的。核裂片(重核分裂的产物)也包括在重离子之中。质子、 α 粒子和重离子等统称为重带电粒子, 以与电子等质量小的带电粒子和不带电粒子相区别。

二、放射性衰变的基本规律

上面介绍的 α 粒子、 β 粒子和 γ 光子等都是从原子核内放出来的。某些核素具有自发地放出粒子或 γ 射线, 或在发生轨道电子俘获之后放出 X 射线或发生自发裂变的性质, 这种性质称为放射性。具有放射性的核素称为放射性核素。

放射性核素的原子核自发地放出 α 、 β 等粒子而转变成为另一种核素的过程称为核衰变。对某一个原子核来说, 在何时衰变, 完全是偶然的。但是就大量这种原子核作为整体来说, 在 t 到 $t+dt$ 时间内衰变的原子核 dN 应当和时间间隔 dt 及 t 时刻的放射性原子核数 N 成正比:

$$-dN = \lambda N dt \quad (1-2)$$

负号表示 N 随时间减少。式中的常数 λ 称为衰变常数, 它的量纲是时间量纲的倒数。它表示某种放射性核素的一个核在单位时间内进行衰变的概率。

显然, λ 的大小决定了衰变的快慢, 每种放射性核素都有一个特定的 λ 值。因此, 它是放射性原子核的特征量。设 $t=0$ 时放射性原子核数为 N_0 , 将(1-2)式积分就可得到 t 时刻的放射性原子核数目:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-3)$$

可见, 放射性核的数目随时间按指数规律减少。这是放射性核衰变的基本规律。

对于实际工作来说, 某个时刻放射源中还存在多少个放射原子核没有衰变并不重要, 重要的是单位时间内有多少个核发生衰变。在给定时刻 t , 一定量的放射性核素在一个很短的时间间隔 dt 内发生的核衰变数 dN 除以 dt 的商, 称为放射性活度, 用 A 表示:

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

由(1-2)和(1-3)式, 放射性活度可以表示为:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1-4)$$

式中是 $A_0 = \lambda N_0$ 是 $t=0$ 时的放射性活度。(1-4)式表明放射性活度随时间成指数规律衰减。

放射性活度的国际单位制单位是“贝可勒尔”，符号为“Bq”。1Bq 为一次衰变每秒。以前习惯用“居里(Ci)”及其导出单位“毫居里(mCi)”和“微居里(μ Ci)”作放射性活度的单位。它们与贝可之间的关系为 $1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$ 。

直接测量放射性原子核数目的减少是很困难的。但探测放射性原子核衰变时放出某种粒子的数是比较容易的。测定单位时间内放射源放出某种粒子的数目，再由放射性核素的衰变纲图知道其分支比，就可以求得放射源的活度，或放射性原子核数的减少率。

描述放射性原子核衰变除了用“ λ ”外，还可半衰期，平均寿命等常数。在单一的放射性衰变过程中，放射性活度降至其原有值的一半时所需的时间称为半衰期，符号为 $T_{1/2}$ 。将 $A = A_0/2$ ， $t = T_{1/2}$ 代入(1-4)式，可得到 $T_{1/2}$ 为：

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1-5)$$

平均寿命是指在某特定状态下放射性核数减少到原来的 $1/e$ 平均时间，符号为 τ 。将 $A/A_0 = \frac{1}{e}$ 代入(1-3)式，可得：

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (1-6)$$

从(1-5)式和(1-6)式，可以得到 τ 与 $T_{1/2}$ 的关系为：

$$T_{1/2} = 0.693\tau \quad (1-7)$$

不同的放射性核素或粒子有不同的 $T_{1/2}$ 和 τ 。

第三节 X 和 γ 射线的探测原理

X 射线和 γ 射线的基本特性在第二节中已经说明。它们在物质中没有直接的电离和激发效应，不能被直接探测到。利用它们在物质中的光电效应、康普顿散射和电子对产生效应等产生的次级电子再引起物质的电离和激发才能探测到。下面对这三种主要作用作简要介绍。

一、光电效应

光子通过物质时和物质原子相互作用，光子被原子吸收后发射轨道电子的现象，称为光电效应，也称为光电吸收。光电效应发射出来的电子叫做光电子。光电子可以从原子的 K、L、M 等各壳层中发射出来。但是由于在满足能量守恒的同时还要满足动量守恒定律，这就必须要有第三者即原子核参加。因此，自由电子不可能产生光电效应。原子中外层电子的结合能很小，原子核反冲动量也很小，动量守恒条件不易得到满足；但随着电子束缚程度的增加，原子核得到的反冲动量很快增加，较易满足动量守恒，因此光电效应概率随着电子束缚程度而很快增加。当入射光子能量大于 K 层电子结合能时，从 K 壳层发射光电子概率最大。图 1-1 是表示光电效应过程的示意图。

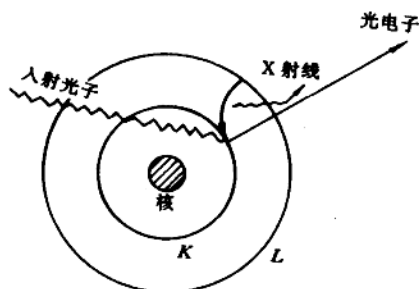


图 1-1 光电效应示意图

1. 光电子的能量

入射光子能量($E_0 = h\nu$)一部分用来克服电子在原子中的结合能,另一部分转化为光电子的动能,所以光电子的能量可由能量守恒定律得到:

$$E_e = h\nu - B_i \quad (i = K, L, M \dots) \quad (1-8)$$

式中 B_i 为第 i 壳层电子的结合能,其数值可近似按以下公式计算:

$$\text{对于 } K \text{ 层} \quad B_K = hcR_\infty (z - 1)^2$$

$$\text{对于 } L \text{ 层} \quad B_L = \frac{1}{4} hcR_\infty (z - 5)^2 \quad (1-9)$$

$$\text{对于 } M \text{ 层} \quad B_M = \frac{1}{9} hcR_\infty (z - 13)^2$$

式中: h 为普朗克常数; c 为光速; R_∞ 为里德伯常数;显然 $hcR_\infty = 13.60\text{eV}$.

利用(1-8)式和(1-9)式可由光电子的动能确定入射光子的能量。

原子发射电子后在原子壳层留下的空位会由外层电子填充,因而发射特征 X 射线或俄歇(Auger)电子。 L 层电子跃迁到 K 层空位而发射的 X 射线为 KX 射线,其能量为两个壳层的结合能之差,即 $E_{KX} = B_K - B_L$ 。因能量与原子的特征性质有关,因此称为特征 X 射线。测量特征 X 射线的能量和辐射量,可以确定元素的种类和含量。

2. 光电截面

γ 射线和 X 射线与物质相互作用发生光电效应的概率就是光电吸收截面,或简称光电截面。当 $h\nu \ll m_e c^2$ 而 $h\nu > B_K$ 时,对于 K 层电子,每个原子的光电截面为:

$$\sigma_{KPh} = 2^{5/2} a^4 \left(\frac{m_e c^2}{h\nu} \right)^{7/2} Z^5 \sigma_{th} \quad (1-10)$$

当 $h\nu \gg m_e c^2$ 时:

$$\sigma_{KPh} = 1.5 a^4 \frac{m_e c^2}{h\nu} Z^5 \sigma_{th} \quad (1-11)$$

式中: $a = e^2 / hc = 1/137$ 是精细结构常数, σ_{th} 是每个电子的汤姆逊散射截面,其值为:

$$\sigma_{th} \approx \frac{8}{3} \pi (e^2 / m_e c^2)^2 = \frac{8}{3} \pi r_e^2 = 6.651 \times 10^{-25} \text{cm}^2 \quad (1-12)$$

由(1-10)式和(1-11)式可见 $\sigma_{KPh} \propto Z^5$, 所以重元素的光电效应比轻元素的强得多,许多 γ 探测器常用高 Z 材料,以获得较高的探测效率。另一方面, σ_{KPh} 首先随 $(h\nu)^{-7/2}$ 减小,而后随 $(h\nu)^{-1}$ 而减小。显然,即使是很重的元素,当 $h\nu > 1\text{MeV}$ 时,光电效应已是次要的了。当 $h\nu$ 接近 B_K 时, σ_{KPh} 达到峰值,因此 $h\nu = B_K$ 称为 K 吸收限。同样还有 L 吸收限、 M 吸收限等。

3. 光电子的角分布

与入射光子的能量有关。实验上在 0° 方向(光子入射方向)没有观测到光电子,这也证明了光电效应过程中能量和动量守恒要求有第三者原子核参加。实验和理论计算还证明在 180° 方向也

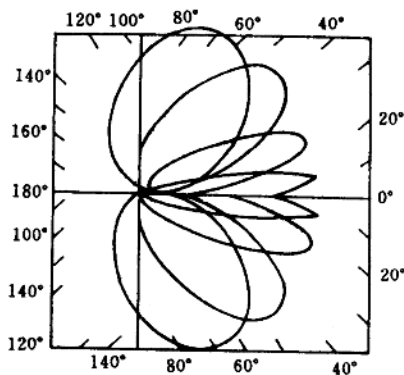


图 1-2 不同 γ 能量时光电子角分布
(极坐标表示)