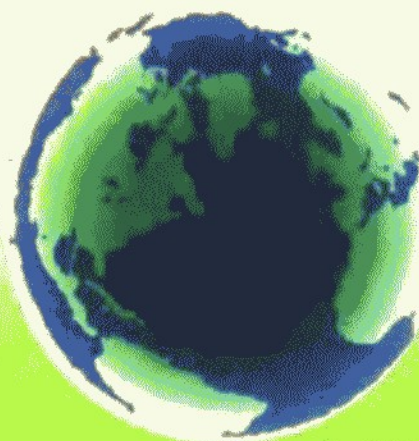


RADIATION SURVEILLANCE OF CHF



国境卫生检疫 放射性监测

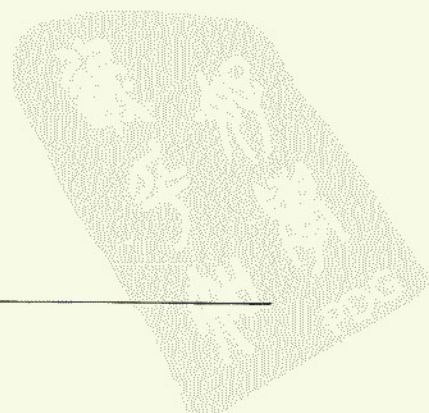
总顾问 曲绪禄

主 编 宋明昌 陈晓枫 任天山



CHF

原子能出版社



图书在版编目(CIP)数据

国境卫生检疫放射性监测/宋明昌等主编. —北京:原子能出版社,1996.5

ISBN 7-5022-1494-1

I. 国… II. 宋… III. 辐射监测-国境检疫:卫生检疫-教材 IV. R144

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 05622 号

内 容 简 介

本书共分 14 章,还有 7 个附件和 5 个附录。前 13 章分别介绍了放射性基本知识、射线与物质的相互作用、辐射量和单位、辐射探测器、放射性活度测量、辐射能量测量、表面污染测量、外照射剂量测量、辐射监测的统计学问题、样品的采集和制备、分析质量控制、放射化学分析和辐射防护的基本原理等内容。第十四章综述了国境卫生检疫放射性监测的有关内容。

本书内容精炼、重点突出、介绍的方法实用,是专为从事国境卫检放射性监测的有关人员编写的,也可供辐射防护和监测、环境保护等有关专业的科技人员和高等院校有关专业的师生参考。

© 原子能出版社,1996

原子能出版社出版 发行

责任编辑:鲍世宽

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:787×1092 mm 1/16 印张 22.625 字数 586 千字

1996 年 5 月北京第 1 版 1996 年 5 月北京第 1 次印刷

印数:1~1000

定价:59.00 元

总顾问	曲绪禄		
主 编	宋明昌	陈晓枫	任天山
副主编	郭 辉	吴少军	张淑蓉
编 委	(按姓氏笔画为序)		
	文 伸	王汝贍	王吉顺
	任天山	孙玉友	宋明昌
	宋春华	陈晓枫	陈伟南
	吴少军	李星洪	张淑蓉
	张宝华	孟传金	周忠孚
	俞秋蓉	高同泰	郭 辉
	夏克胜	徐日新	徐翠华
	富英群	梅述福	樊武疆

前 言

自从电离辐射被发现以来,特别是本世纪40年代以后,射线和核技术的应用日益广泛,电离辐射与人类生活的关系更加密切。人类在对电离辐射的不断认识和开发中,得到了巨大的利益。电离辐射在工业、农业、科研和医学领域的应用越来越广泛,已深入到人类生活的各个方面。然而,电离辐射在造福人类的同时,也给人类带来了一定危害。这些危害来自于许多方面,如放射性物质外渗造成的大面积污染,放射性废物排放不合理造成的污染,核试验引起的大气污染及核事故等。这些污染除引起外照射外,还可通过食物链进入人体内,引起内照射。电离辐射对人体的损害表现在许多方面,重者可引起死亡,轻者可引起生物大分子物质的改变,导致癌症和遗传性疾病。因此电离辐射作为一种有害人类健康的因素,已受到有关部门的重视,并制定有较完善的法律和法规。

国境卫生检疫在我国已有120多年的历史,在保障人类健康方面做出了重要贡献。卫生检疫的目的就是防止有害人类健康的因素传入和传出,保障人类健康。在我国进一步改革开放和国际间贸易迅猛发展的形势下,有些不法商人见利忘义,将大量废旧物品运入我国,其中不乏含有放射性危害的物质,同时国际上核走私也愈演愈烈,卫生检疫机关已多次监测发现进口货物辐射剂量水平超过我国标准。目前全国卫生检疫系统普遍开展了进出口货物和食品的放射性监测工作,本书正是为适应这一工作需要编写的。它为卫生检疫放射性监测工作提供了详尽的基础知识和基本理论及实际监测方法,并附有我国放射性监测的有关法律法规和标准,以及国境卫生检疫放射性监测管理办法和工作规程。它是目前唯一的有关国境卫生检疫放射性监测较完整的参考书,它不仅对国境卫生检疫放射性监测工作者起到有益的参考作用,而且对国境卫生检疫放射性监测工作的发展将会起到推进和完善作用,达到严把国门,保障人类健康的目的。

中华人民共和国卫生检疫局局长

曲绪祿

一九九六年二月十四日

目 录

前言

第一章 放射性基本知识	(1)
第一节 放射性同位素	(1)
一、同位素和放射性同位素	(1)
二、放射性同位素的分类	(1)
第二节 核衰变及衰变规律	(2)
一、衰变原理	(2)
二、射线的性质与核衰变方式	(3)
三、衰变规律	(7)
第二章 射线与物质的相互作用	(9)
第一节 α 射线与物质的相互作用	(9)
一、激发和电离	(9)
二、电离密度	(10)
三、在物质中的射程	(10)
第二节 β 射线与物质的相互作用	(11)
一、库仑散射	(11)
二、轫致辐射	(12)
三、 β 射线在物质中的射程	(12)
第三节 γ 射线与物质的相互作用	(13)
一、光电效应	(14)
二、康普顿效应	(15)
三、电子对效应	(15)
四、相干散射	(16)
五、光核反应	(16)
六、窄束 γ 射线通过物质时的减弱规律	(17)
七、宽束 γ 射线通过物质时的减弱规律	(17)
第四节 中子与物质的相互作用	(19)
一、弹性散射	(19)
二、非弹性散射	(21)
三、吸收	(21)
第三章 辐射量及其单位	(23)
第一节 放射性活度及其单位	(23)
一、放射性活度的定义及其单位	(23)
二、放射性活度的计算公式	(23)
第二节 辐射量及其单位	(25)
一、辐射量定义及其单位	(25)
二、照射量率与放射性活度的关系	(26)
三、同位素 T 常数的计算	(26)

四、克镭当量与照射量率	(27)
第三节 吸收剂量(率)及其单位	(29)
一、吸收剂量定义及其单位	(29)
二、吸收剂量率及其单位	(29)
三、吸收剂量与照射量之间的关系	(29)
四、两种物质中吸收剂量的换算	(30)
第四节 剂量当量(率)及其单位	(32)
一、剂量当量及其单位	(32)
二、剂量当量率及其单位	(33)
三、各单位之间的关系	(34)
第四章 核辐射探测器	(35)
第一节 气体探测器	(35)
一、气体电离的一般规律	(35)
二、电离室	(36)
三、计数管	(38)
第二节 闪烁计数器	(40)
一、闪烁计数器的工作原理	(40)
二、闪烁体	(41)
三、光电倍增管	(41)
四、闪烁计数器的应用	(42)
第三节 半导体探测器	(43)
一、半导体探测器的工作原理	(43)
二、半导体探测器的种类和结构	(43)
三、半导体探测器的性能	(44)
四、半导体探测器的应用	(45)
第五章 放射性活度测量	(46)
第一节 放射性样品活度测量概述	(46)
一、放射性活度及其单位	(46)
二、影响活度测量的几个因素	(47)
第二节 α 和 β 放射性样品活度的测量方法	(49)
一、小立体角法	(49)
二、 4π 计数法	(54)
第三节 符合方法	(57)
一、符合的概念	(57)
二、符合方法的基本原理	(58)
三、 $4\pi\beta\text{-}\gamma$ 符合方法	(59)
第四节 低水平活度样品测量的一般问题	(61)
一、探测装置的优值因子	(61)
二、灵敏度	(62)
三、测量装置的判断限和可探测限	(62)
四、测量装置的本底	(63)
五、数据测量的稳定性	(65)

第五节 总 α 活度测量	(68)
一、直接测量法	(68)
二、比较测量法	(68)
第六节 总 β 活度测量	(69)
一、直接测量法	(69)
二、比较测量法	(70)
第七节 总放射性测量标准源的选择	(70)
第六章 辐射能量测量	(71)
第一节 α 能谱的测量	(71)
一、能量分辨率	(71)
二、 α 能谱仪的刻度	(72)
第二节 β 最大能量的测定	(73)
第三节 单能 γ 射线能谱的测定	(73)
一、单能 γ 射线的能谱形状及其与探测器尺寸的关系	(73)
二、影响单能 γ 谱形的其他因素	(76)
第四节 标准核素 γ 谱及其在复杂 γ 谱解析中的应用	(76)
一、标准核素 γ 谱	(77)
二、利用标准核素 γ 谱解析复杂 γ 谱的方法	(77)
第五节 能量特征峰	(79)
一、峰位和能量刻度	(79)
二、峰宽和能量分辨率	(80)
三、峰探测效率、峰面积和峰康比	(80)
四、峰形拟合函数	(81)
第六节 γ 能谱测量装置	(83)
一、典型的 γ 能谱测量装置简介	(83)
二、利用符合或反符合的 γ 能谱测量装置	(83)
三、 γ 能谱测量装置的主要技术指标	(84)
第七节 计算机在复杂 γ 能谱数据处理中的应用	(86)
一、对 γ 能谱数据处理程序的一般要求	(86)
二、数据平滑和寻峰	(86)
三、确定峰参数	(89)
第八节 γ 能谱刻度	(90)
一、能量刻度	(90)
二、效率刻度	(91)
第九节 测量	(93)
一、测量条件	(93)
二、本底	(93)
三、探测限	(93)
第十节 γ 能谱分析方法	(95)
一、全能峰面积确定	(95)
二、浓度(或比活度)计算	(96)
第十一节 结果表述	(98)

第七章 物质表面放射性污染的监测	(99)
第一节 表面污染的直接测量法	(99)
一、对仪器的要求、选择和使用	(99)
二、仪器刻度	(100)
第二节 表面污染的间接测量法	(101)
一、干擦拭法或湿擦拭法	(101)
二、粘带取样	(102)
第八章 外照射剂量测量	(103)
第一节 γ 和 X 射线的剂量测量	(103)
一、用自由空气标准电离室测量照射量	(103)
二、测量照射量和吸收剂量的小空腔电离室	(104)
第二节 X 或 γ 射线剂量仪的刻度	(105)
一、剂量仪刻度常用的参考辐射	(106)
二、X 或 γ 剂量仪的刻度方法	(108)
第三节 外照射常规监测	(110)
第九章 辐射监测中的几个统计学问题	(113)
第一节 概述	(113)
一、总体、样本和样本容量	(113)
二、误差定义及误差的分类	(113)
第二节 随机误差的正态分布与标准差	(114)
一、正态分布	(114)
二、标准差的估算及测量结果的表示	(116)
三、误差传递	(118)
第三节 有效数字与计算法则	(119)
一、有效数字	(119)
二、计算法则	(120)
第四节 放射性核转变的统计规律与统计误差	(120)
一、放射性核转变的统计规律	(120)
二、放射性测量的标准差及结果表示	(121)
第五节 判断限、探测限及测定限	(126)
一、统计假设的两类错误	(126)
二、判断限 L_c	(126)
三、探测限 L_D	(127)
四、测定限 L_Q	(129)
第六节 放射性测量装置可靠性的统计学检验	(131)
第七节 异常样品的确定方法	(132)
第八节 t 检验法在结果评价中的应用	(133)
第十章 样品的采集和制备	(134)
第一节 一般要求	(134)
一、样品采集	(134)
二、贮存	(134)
三、清洁	(134)

四、干燥、蒸发和灰化	(134)
五、均匀性和二次取样	(135)
第二节 样品的采集和制备	(135)
一、空气	(135)
二、牧草	(136)
三、土壤	(136)
四、牛奶	(137)
五、其他食物	(137)
六、水	(137)
第十一章 分析质量控制	(139)
第一节 分析质量控制计划	(139)
第二节 刻度和标准源	(140)
第三节 比对	(140)
第四节 内部控制计划	(140)
一、仪器性能	(140)
二、分析控制样品	(141)
第五节 结果报告	(142)
第六节 质量保证要点	(142)
第十二章 放射化学分析	(143)
第一节 铯的放射化学分析方法	(143)
一、硝酸盐沉淀法测定各种物质中的放射性铯	(143)
二、牛奶和奶酪中放射性铯的测定	(145)
三、谷物、蔬菜、牧草和其他食物中放射性铯的分析	(146)
四、水中放射性铯的测定	(147)
五、土壤中放射性铯的分析测定	(147)
六、 ^{90}Sr 含量的计算	(150)
七、 ^{89}Sr 含量的计算	(151)
八、计数器的标定	(153)
九、钙的测定	(154)
十、用 ^{90}Sr 示踪剂测定铯的回收率	(154)
第二节 ^{137}Cs 的放射化学测定	(155)
一、硅钨酸法测定 ^{137}Cs	(156)
二、普鲁士蓝法测定 ^{137}Cs	(159)
三、磷酸铵法测定 ^{137}Cs	(160)
第三节 钚、镅和镎的放射化学分析方法	(162)
一、生物、沉积物、土壤、水和空气滤料样品中钚、镅和镎的测定	(162)
二、土壤中镅的测定	(167)
第四节 钚的放射化学分析方法	(171)
一、应用范围和领域	(171)
二、原理	(172)
三、试剂	(172)
四、本底水	(172)

五、内标氟溶液	(173)
六、闪烁溶液	(173)
七、仪器设备	(173)
八、采样和样品用量	(174)
九、分析程序	(174)
十、计算方法	(175)
十一、最佳测量条件	(176)
十二、质量控制	(177)
十三、分析结果报告	(178)
第五节 天然铀、天然钍分析	(178)
一、主要试剂和仪器	(178)
二、分析测定程序	(179)
第六节 ^{226}Ra 的放射化学测定	(180)
一、原理	(180)
二、主要试剂和仪器	(180)
三、样品预处理	(181)
四、操作程序	(181)
五、计算	(182)
第七节 稳定性钾、钙、锶的测定	(182)
一、钾的测定	(182)
二、钙的测定	(186)
三、锶的测定	(191)
第十三章 辐射防护的基本原理	(193)
第一节 辐射与人类的密切关系	(193)
一、天然本底照射	(193)
二、人工辐射源的本底照射	(194)
三、辐射在国民经济和社会发展中的广泛应用	(195)
第二节 辐射生物效应与辐射防护的目的	(196)
一、辐射对人体危害的资料来源	(196)
二、辐射效应分类	(196)
三、辐射防护的目的	(199)
第三节 辐射防护中常用的量和术语	(199)
一、辐射在介质中的能量沉积、授与能	(199)
二、吸收剂量 D 和吸收剂量率 $\dot{D}$	(200)
三、辐射品质因数 Q	(200)
四、剂量当量 H 和剂量当量率 $\dot{H}$	(201)
五、有效剂量当量 H_E , 危险度 γ	(202)
六、待积剂量当量 H_{50}	(203)
七、集体剂量当量 S	(203)
第四节 辐射防护三原则	(203)
一、辐射实践的正当化原则	(20)
二、辐射防护的最优化原则	(204)

三、个人剂量的限制	(204)
第五节 剂量当量限值	(204)
一、《放射卫生防护基本标准》中规定的剂量当量限值	(204)
二、剂量当量限值的安全评价	(205)
第十四章 国境卫生检疫放射性监测	(208)
第一节 国境卫生检疫放射性监测综述	(208)
一、国境卫生检疫放射性监测的目的和意义	(208)
二、国境卫生检疫放射性监测的依据	(209)
三、国境卫生检疫放射性物品分类	(209)
四、国境卫生检疫放射性监测的实施	(213)
第二节 国境卫生检疫放射性监测管理暂行办法	(215)
一、总则	(215)
二、卫生许可	(215)
三、报验放行	(215)
四、放射性监测	(215)
五、罚则	(216)
六、附则	(216)
第三节 国境卫生检疫放射性监测管理暂行规程	(216)
一、放射性监测管理的重点对象	(216)
二、现场放射性监测	(217)
三、采样	(217)
四、实验室检测	(218)
五、报告的签发	(218)
六、放射性污染物品的处理	(218)
七、样品的保存	(218)
八、放射源的管理	(219)
九、案例报告制度	(219)
十、对从事放射性监测管理的卫生检疫人员的要求	(219)
十一、仪器配备	(219)
十二、仪器校准	(219)
第四节 国境卫生检疫放射性监测的内容、标准和方法	(220)
一、国境卫生检疫放射性监测内容和检验项目	(220)
二、国境卫生检疫放射性监测管理标准	(220)
三、 α 、 β 表面污染和 γ 剂量当量测量方法	(221)
附件	(227)
附录	(299)

第一章 放射性基本知识

自然界里的所有物质是由各种元素组成的,组成元素的基本单位是原子。元素的化学性质主要取决于原子的外层电子结构,而元素的物理性质主要取决于原子核的结构。有些原子核是不稳定的,它能自发地改变核结构转变成另一种核,并在核转变过程中放射出带电的或不带电的粒子,这种现象称为核衰变或放射性衰变。本章介绍放射性同位素的基本知识和放射性衰变的方式和规律。

第一节 放射性同位素

一、同位素和放射性同位素

什么叫同位素?核内具有相同数目的质子(即原子序数相同),但中子数不同的一类原子,它们的化学性质相同,在元素周期表上占据同一个位置,故称做同位素。例如: $^{123}_{53}\text{I}$, $^{124}_{53}\text{I}$, $^{125}_{53}\text{I}$, $^{126}_{53}\text{I}$...,它们的原子序数都是53,但它们的中子数分别为70,71,72,73等,它们都是碘元素的同位素。

一种元素可以有多种同位素,如元素周期表中的 $^{133}_{55}\text{Cs}$,这种元素的同位素就有30种。一种元素的各个同位素的某些性质可能是不同的,因此又将核内具有特定数目中子、质子及不同能态的一类原子,称为某一核素。例如 ^1H , ^2H , ^3H ,都是氢的同位素,但它们都是不同的核素。

同位素有二类,一类是稳定的,另一类是不稳定的,即放射性的。在已发现的2500多种同位素中,稳定的元素只有260种左右,其余2200多种都是所谓“放射性”的。凡原子核不会自发地发生变化的同位素,称为稳定的同位素,反之,就是不稳定的同位素。

一般来说,不稳定的同位素能够自发地放出射线,使其原子核发生变化,从而变成另一种元素。原子核的这种具有放出射线的性质,叫做放射性。能够自发地放出射线从而变成另一种元素的同位素,这种不稳定的同位素又叫做放射性同位素。

二、放射性同位素的分类

放射性同位素分为天然的和人工的两种。自然界中天然存在的放射性同位素称为天然放射性同位素,人工制造的放射性同位素称为人工放射性同位素。

(一) 天然放射性同位素

天然放射性同位素按其来源又分为两类,一类是宇生的,再一类是原生的。由宇宙射线与大气中的某些化学元素的原子核相互作用所产生的放射性同位素称为宇生天然放射性同位素。能够引起内外照射的主要宇生放射性同位素有 ^{14}C , ^3H , ^7Be 和 ^{22}Na 等。原生放射性同位素是地球本身自然存在的放射性同位素。主要有 $^{232}_{90}\text{Th}$, $^{238}_{92}\text{U}$ 和 $^{235}_{92}\text{U}$ 三个天然放射性核素系中的40余种放射性核素以及 ^{40}K , ^{87}Rb 等其它一些放射性核素。

天然放射性同位素的种类很多,已达几十种,但有实际意义的核素有 ^{235}U , ^{238}U , ^{226}Ra ,

^{232}Th , ^{222}Rn , ^{40}K 和 ^{14}C 等。地球上到处都存在着天然放射性同位素,它们衰变时放出 α 、 β 或 γ 射线。我们把这种来自地壳表面的射线称为地面辐射。通常又把宇宙射线和地面辐射统称为天然本底辐射。

天然放射性同位素的放射性活度一般都很低,不能满足人们在科研、生产、医疗等方面应用的需要,因此,随着科学技术的发展,人们又根据不同的需要生产了各种各样的人工放射性同位素。

(二) 人工放射性同位素

人工放射性同位素是利用核反应制造的。现在应用核反应堆和加速器生产的放射性同位素已达 1000 多种。如 ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{125}I , ^{198}Au 等,它们均属于人工放射性同位素。由于不同的放射性同位素,其射线的种类、能量、半衰期等不同,所以,它们的用途也各不相同。根据需要,可将人工放射性同位素制成放射性活度不同量级的放射源,放射性活度可做到小至 10^4 Bq 量级(微居里级),大到 100 TBq 量级(万居里级),以至 10 PBq 量级(数百万居里级)。

应用核反应堆生产放射性同位素,其方法是根据原子核的物理性质以及所需射线的种类、能量、半衰期,来选取合适的材料作靶子,将其放入核反应堆中,用核反应堆产生的中子射线进行照射,使其靶材料的原子核吸收中子而变成放射性同位素。如常用的 ^{60}Co 放射源就是根据 $^{59}\text{Co}(\text{n}, \gamma)$ 反应的原理生产的。 ^{59}Co 吸收一个中子,变成 ^{60}Co , ^{60}Co 原子核处于不稳定的激发态,通过放射 β^- , γ 射线变成稳定的原子核 ^{60}Ni 。 ^{60}Co 的半衰期为 5.27 a。

应用加速器生产放射性同位素的方法,就是应用加速器的高压电场加速带电粒子(一般是质子),使其轰击事先选定的靶材料,被轰击的靶材料的原子核吸收一个带电粒子而变成放射性同位素。如 $^{56}\text{Fe}(\text{p}, \gamma)$ 反应,就是用加速器加速的高能质子轰击 ^{56}Fe ,使其吸收一个质子变成 ^{57}Co , ^{57}Co 处于不稳定的激发态,通过发射 β^- , γ 射线再变成 ^{56}Fe 。同位素 ^{57}Co 的半衰期为 17.5 h。

第二节 核衰变及衰变规律

什么叫核衰变? 不稳定同位素的原子核能自发地发生变化而放出某种粒子(α 、 β^- 、 β^+)或射线(γ 射线)的现象,称为核衰变。核衰变不受外界因素的影响,而是由放射性元素核内部能量状态决定的。

原子核为什么能够自发地衰变并能放出射线呢?放射出的射线又具有什么样的性质呢?核衰变有哪些方式和遵循什么样的规律?下面就来分别讨论这些问题。

一、衰变原理

不稳定的原子核由于核力的不对称性和质子间库仑排斥力的作用,将使得原子核的能量状态只能勉强保持平衡。在核内,核子还处于一刻不停的激烈的运动状态。核子的激烈运动又使得原子核隐藏着很大的内能,并使其处于高能量的激发态。处于激发态的原子核,随时都有可能发生衰变。因为核子的运行极为激烈,使其无法严格遵循一确定的运动规律,所以,当核子的运行一旦偏离了它们所遵循的运行规律而打破了核能状态的平衡时,核衰变就发生了。

核衰变发生时,核内多余的能量将释放出来,以使原子核的能量状态达到新的平衡。由于

能量是物质的固有属性,质能是不可分割的,所以,能量必然要通过原子核向外发射物质才能携带出去。这种从核内发射出来具有一定能量的物质,我们就称其为“射线”。

二、射线的性质与核衰变方式

(一) 射线的性质

早期人们为了分析放射线的性质,曾用放射性核素 ^{226}Ra 做过如图 1-1 所示的实验。如果在射线通过的两旁加上电场,结果发现这些射线的径迹发生了变化:一部分向右偏,表明它们是带正电的;一部分向左偏,表明它们是带负电的;再一部分根本就不发生偏转,表明外加电场对它们没有影响,因此断定它们不带电。为此,人们就把这三种射线依次称为 α 射线、 β 射线和 γ 射线。或依次称为甲种射线、乙种射线和丙种射线。

字母 β 的右上角加一个负号,表示它是带负电的,即负 β 衰变。有些放射性核素放出的 β 射线是带正电的,即正 β 衰变。

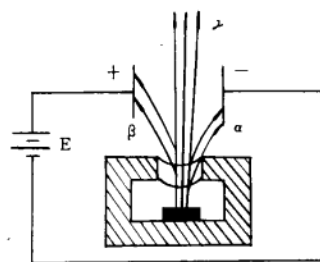


图 1-1 射线的性质实验示意图

为了进一步分析上述射线的性质,在上述实验中,人们先用一张纸将容器的开口盖上,结果发现 α 射线不见了。 α 射线的穿透能力很弱,一张普通纸就可将它们挡住。其射程很短,在空气中只有几 cm,这说明它是一种带电的重粒子。人们将纸拿掉,换上具有一定厚度的铝箔,结果发现 β 射线也不见了。 β 射线比 α 射线的穿透能力大,在空气中射程一般能达几 m,这说明它是一种质量比 α 粒子小得多的带电粒子。人们将铝箔拿掉,又换上比铝箔还厚几倍的铝板,结果发现仍有少量的 γ 射线穿透铝板。 γ 射线的穿透能力很强,在空气中的射程能达几十 m,以至数百 m。人们对它的波长进行测量,发现它与 X 射线一样,是一种静止质量为零、波长很短的电磁波,只不过它比 X 射线的波长更短,穿透能力更强。两者的区别在于 γ 射线是从原子核内发射出来的,而 X 射线是从原子核外电子壳层中发出来的。

为了弄清 α 射线和 β 射线到底是什么粒子,人们又对盛 ^{226}Ra 放射源的容器进行密闭测量,结果发现里面出现了氦气,即 ^{226}Ra 经 α 衰变变成了 ^{222}Rn 。人们才由此断定 α 射线实际上就是氦原子的原子核 ^4_2He ,它是由两个质子和两个中子组成的,质量和氦原子核相等,带着两个单位正电荷,能起极强的电离作用。这种电离作用对生物体破坏性很大,致伤集中,即形成放射性“烧伤”,且不易恢复。

人们对放射源 ^{226}Ra 的样品进行分析,结果发现还有 ^{218}Po 、 ^{218}At 等核生成。于是将新生核素 ^{218}At 与 ^{218}Po 作比较,发现两者的质量数 A 相同,但前者多了一个质子。这说明 ^{218}Po 还有另一种衰变方式,在这个衰变过程中,它释放出一个电子,使核内的一个中子变成一个质子。为此,人们断定前面所说的那种比 α 粒子的质量小得多的带电粒子—— β 射线,它实际上就是一个负电子,带有一个单位的负电荷。因为这种电子是从原子核里发射出来的,所以叫 β 射线。 β 射线也能引起电离,但电离本领比 α 粒子的小得多。

图 1-1 所示的实验中,人们将镭源拿掉,分别换上其它一些放射性元素进行测量。结果发现:有的核素放 α 射线,有的核素放 β 射线,有的核素既放 α 射线,又放 β 射线,而 γ 射线则总是

随着α衰变或β衰变放射出来。这说明某一种放射性同位素不一定同时都能辐射α,β,γ三种射线,可能辐射一种,也可能辐射两种,或者三种射线同时都能辐射。不同的放射性核素,有不同的衰变类型,即α衰变、正β衰变、负β衰变、γ发射(跃迁)。实际上,实验证明,核衰变还有其它一些类型,如EC衰变,CE衰变,SF衰变等。不同类型的衰变,其射线的来源可以不同,如α,β,γ射线来源于核内,而EC衰变后发射出的X射线就来源于核外。同一类型的衰变,由于衰变可以通过不同的能级进行,所以,核衰变的方式可以是多样的。下面就来讨论不同类型的衰变对母核的影响及其衰变方程式。

(二) 核衰变方程式

1. α衰变

具有α衰变的天然放射性同位素,绝大部分都是属于原子序数Z大于82的重元素,如²³²Th, ²²⁶Ra, ²⁴¹Am, ²³⁸U等。原子序数Z低于82的放射α粒子的天然放射性同位素只有¹⁴⁷Sm, ¹⁴⁴Nd, ¹⁸⁰W, ¹⁹⁰Pt等。人工放射性同位素大部分都不是α衰变的,具有α衰变的人工放射性同位素也多是原子序数Z大于82的同位素。例如:²³²Pu, ²³⁷Am, ²⁴⁸Cf等。

因为α粒子是由两个中子和两个质子组成的,所以,原子核^A_ZX(又称为母核)经α衰变变为^{A-4}_{Z-2}X(子核)。α衰变方程式为:

$$^A_ZX \longrightarrow ^{A-4}_{Z-2}X + \alpha + Q_\alpha \tag{1-1}$$

式中, Q_α 为α衰变中放出的能量,又叫α衰变能,它来源于衰变前后整个系统静止能量的减少。

如果衰变后生成的子核处于激发态时,那么子核以发射γ射线的方式衰变到它的基态,其能量就全部转变成γ射线的能量。当然,它也可能以别的方式衰变到基态。对具有这类衰变的放射性同位素的防护,不仅要注意防护α射线,而且还要注意防护γ射线。

例如,²¹⁰Po的α衰变方式就有如下两种:一种是通过发射一个能量为5.3045 MeV的α₁射线直接衰变到²⁰⁶Pb的基态,以这种方式衰变的概率为大于99%;另一种方式是先发射一个能量为4.524 MeV的α₂射线衰变到²⁰⁶Pb*的一个能级能量为0.8031 MeV的激发态上,再发射一能量为0.804 MeV的γ射线衰变到它的基态,以这种方式衰变的概率为0.00107%。²¹⁰Po的衰变方程式可写为:

$$\begin{array}{l} ^{210}_{84}\text{Po} \xrightarrow{(>99\%)} ^{206}_{82}\text{Pb} + \alpha_1 + 5.3045 \text{ MeV} \\ \quad | \quad (0.00107\%) \\ \quad \xrightarrow{\quad} ^{206}_{82}\text{Pb}^* + \alpha_2 + 4.524 \text{ MeV} \\ \quad \quad \quad | \\ \quad \quad \quad \xrightarrow{\quad} ^{206}_{82}\text{Pb} + \gamma + 0.804 \text{ MeV} \end{array} \tag{1-2}$$

式中,²⁰⁶Pb 右上角的“*”表示该核素处于激发态。

许多核素的衰变方式往往是很复杂的,因而,人们通常用核衰变纲图来表示它们的衰变方式,这样可以更加直观。²¹⁰Po的核衰变纲图如图1-2所示。图中所标的时间是该核素的半衰期,其定义将在后面讲到。

²¹⁰Po经α衰变后,因其质量数A减少了4个,原子序数Z减少了2个,所以,相对母核而言,子核在周期表上的位置向左移动了两位。

2. β衰变

β衰变分为β⁻衰变和β⁺衰变两种,它们的共同特点是,在衰变过程中,核内质子和中子的

总数保持不变,即母核和子核的质量数 A 保持不变。

β^- 衰变发生时,核内的一个中子转变为一个质子,同时发射出一个负电子 e^- 和一个反中微子 $\bar{\nu}$,即:

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu} + Q \quad (1-3)$$

[中子] $\rightarrow$ [质子][电子][反中微子][衰变能]

反中微子 $\bar{\nu}$ 和中微子 ν 一样,静止质量和电荷数都为零。所以,核内中子减少一个,质子增加一个,总质量数 A 不变。

β^- 衰变放出的能量叫做 β^- 衰变能,它来源于母核和子核的中性原子的静止能量之差。

母核 A_ZX 在作 β^- 衰变时,它可以通过不同的能级进行。当衰变后形成的子核处于激发态时,通常可通过发射 γ 射线再衰变到它的基态。

β^- 衰变的方程式如下:

$${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z+1}X + \beta^- + \bar{\nu} + Q_{\beta^-} \quad (1-4)$$

常使用的 ${}^{32}_{15}P$ 即属于此衰变。 ${}^{32}_{15}P$ 的 β^- 衰变式可写为:

$${}^{32}_{15}P \rightarrow {}^{32}_{16}S + \beta^- + 1.7104 \text{ MeV} \quad (1-5)$$

β^- 衰变因核内的一个中子转变成一个质子,使子核的原子序数 Z 增加了一个,所以,相对母核而言,子核在元素周期表上的位置向右移动一位。

${}^{32}_{15}P$ 的 β^- 衰变纲图如图 1-3 所示。

绝大多数的放射性核素都是具有 β^- 衰变性质的,并且能够放出一组或数组甚至更多组能量的 γ 射线来。纯 β^- 衰变的放射性核素很少。 3_1H , ${}^{14}_6C$, ${}^{32}_{15}P$, ${}^{35}_{16}S$ 等,它们均属于纯 β^- 衰变放射性核素。

β^+ 粒子又称正电子,是一种质量与电子相等,带着一个单位正电荷的粒子。在物质中的射程与 β 粒子的基本相同。在 β^+ 衰变过程中,核内的一个质子转变成一个中子,同时发射出一个正电子 e^+ 和一个中微子 ν ,即:

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu \quad (1-6)$$

β^+ 衰变后形成的子核因核内质子数减少了一个,所以,相对母核而言,它在元素周期表上的位置向左移动一位。

同理, β^+ 衰变形成的子核因核内少了一个质子,要使原子保持电中性,核外电子层必须向环境中释放一个电子。可见,在从电中性的原子 A_ZX 变为电中性的原子 ${}^A_{Z-1}X$ 的过程中,整个系统向外释放了一个正电子和一个负电子。

β^+ 衰变的方程式为:

$${}^A_ZX \rightarrow {}^A_{Z-1}X + \beta^+ + \nu + Q_{\beta^+} \quad (1-7)$$

β^+ 衰变通常是与 β^- 衰变或 EC 衰变相竞争,所以,虽发现不少纯 β^- 衰变的放射性核素,但

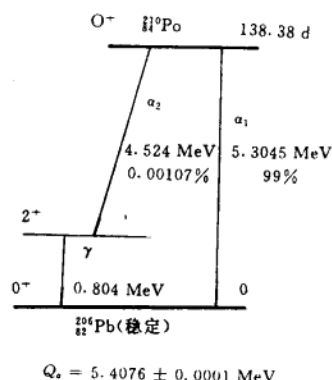


图 1-2 ${}^{210}_{84}Po$ α 衰变纲图

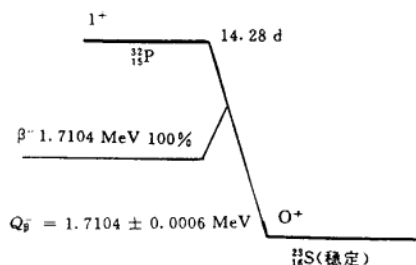


图 1-3 ${}^{32}_{15}P$ 的 β^- 衰变纲图

还没发现纯 β^+ 衰变的放射性核素。

作为 β^+ 衰变的一个例子是 $^{64}_{29}\text{Cu}$ ，它的衰变方式有五种，其中一种是 β^+ 衰变，如图 1-4 所示。

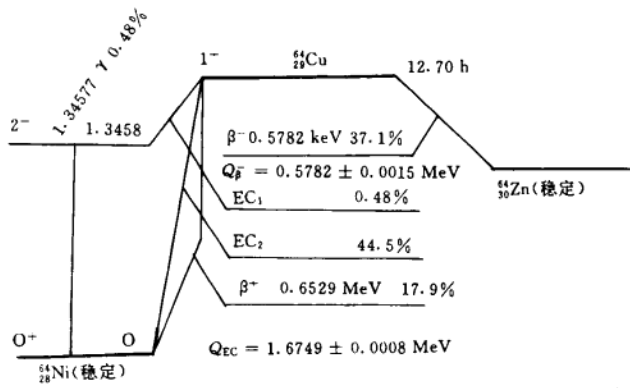


图 1-4 $^{64}_{29}\text{Cu}$ 衰变纲图

3. EC 衰变

EC 衰变是指不稳定的原子核通过轨道电子俘获的方式进行衰变。在这种衰变过程中，核内的一个质子从核外的电子轨道上俘获一个电子而转变成中子。同时发出一个中微子 ν ，即：

$$p + e^- \rightarrow n + \nu \quad (1-8)$$

母核 ^A_ZX 经过这种衰变所形成的子核 $^{A-1}_{Z-1}\text{X}$ ，因质量数 A 没变，质子数减少了一个，所以，相对母核而言，子核在元素周期表上的位置向左移动了一位。

经 EC 衰变形成的处于激发态的子核通常是以发射 γ 射线的形式再衰变到它的基态，当然，也可以通过发射内转换电子再衰变到它的基态，如图 1-5 所示的 $^{48}_{22}\text{Ti}$ 的衰变就属于此类。

EC 衰变的方程式可写为：

$$^A_Z\text{X} + e^- \rightarrow ^{A-1}_{Z-1}\text{X} + \nu + Q_{\text{EC}} \quad (1-9)$$

EC 衰变通常是与 β^- 衰变和 β^+ 衰变相竞争，但也有些放射性核素是属于纯 EC 衰变性质的，如 $^{49}_{23}\text{V}$ ， $^{55}_{26}\text{Fe}$ ， $^{68}_{32}\text{Ge}$ ， $^{71}_{32}\text{Ge}$ ， $^{97}_{43}\text{Tc}$ ， $^{131}_{55}\text{Cs}$ 等一类放射性核素。

4. γ 发射

放射性原子核在经历了 α 衰变或 β 衰变后，形成的子核常处于激发态，子核从高激发态到基态或从高激发态到低激发态的跃迁，主要是通过发射 γ 射线进行。

γ 射线不带电，静止质量为零，所以， γ 射线的发射并不改变子核的组成，即不产生新的核素。

5. CE 衰变

同 γ 发射相竞争的另一种衰变方式是发射内转换电子，即通过电磁相互作用，子核把 E_γ 的能量直接传递给核外的一个轨道电子，从而发射一个轨道电子来完成从激发态到基态或从较高激发态到较低激发态的衰变。这种衰变叫做 CE 衰变，这样发射出的电子叫做内转换电