

建筑室内放射污染

控制与检测

王喜元 编著



东南大学出版社

SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

W238

建筑室内放射污染控制与检测

王喜元 编著



A1107382



东南大学出版社

内 容 提 要

本书第1章介绍天然放射性基础知识;第2~5章介绍国家标准《民用建筑工程室内环境污染控制规范》中对放射性检测的有关规定;第6章介绍有关空气氡、土壤氡及材料放射性检测的基础知识。

为便于读者查阅资料,本书的附录中收入了4种有关国家标准。本书可作为从事工程室内环境污染检测的工作人员的基本学习材料,也可作为科普读物供社会多方面的人员学习、参考。

图书在版编目(CIP)数据

建筑室内放射污染控制与检测/王喜元编著. —南京:东南大学出版社,2004.1

ISBN-7-81089-375-0

I. 建... II. 王... III. ①室内-放射污染-污染控制 ②室内-放射检测 IV. X799.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 097828 号

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼2号 邮编 210096)

出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 南京京新印刷厂印刷

开本 700 mm×1000 mm 1/16 印张 19.25 字数 375 千字

2004年1月第1版 2004年1月第1次印刷

印数:1~3500 定价:38.00元

前 言

《民用建筑工程室内环境污染控制规范》批准发布已经一年多了。这一年多来,各地对学习贯彻规范抓得很紧,如组织各类工程技术人员参加学习班,学习规范内容;筹建实验室,完善检测手段。各地相继发布了贯彻执行规范的行政性文件,对贯彻执行规范提出了明确要求。众多企业向社会做出承诺:使用环保建筑材料,建设环保型住宅等。工程建设的污染控制正在陆续纳入民用建筑工程管理程序,工程室内环境污染监督正在得到加强。在学习贯彻规范过程中,各地经常向标准编制组提出一些技术问题,希望得到解释和回答。其中相当一部分属于放射性方面的污染控制问题,大体可以分为两类:一类属于具体检测技术或污染控制技术方面的问题,另一类则涉及放射性基础知识方面的问题。从中可以看出,人们对核知识普遍了解不足,普及核知识已成为一种工作需要。据了解,目前社会上缺少通俗易懂的放射性知识读物。根据这种情况,为实施室内环境放射性污染控制,作者编写了本书。

物质的放射性被发现至今已有百年历史。这一百多年来,随着对微观世界认识的不断加深,整个自然科学取得了长足进展,人类历史开始进入科学时代。随着核电日益成为社会经济的供电主力和放射性同位素应用的不断扩大,核应用正在对人类做出有益贡献。

在过去的亿万年里,正是因为有了核能(太阳能),我们美丽、温馨的家园——地球才有了今天的昂然生机;同样,在可以预见的未来,人类还要靠天然的及自己开发的核能过日子。因此,可以毫不夸张地说,核科学的美妙青春即将到来。

国内外大量事实表明,在过去的半个世纪里,核武器留给世界的恐怖景象太深刻了,日本广岛、长崎两市的毁灭及若干次放射性事故造成的悲惨后果至今仍强烈地留在人们的记忆里。

《民用建筑工程室内环境污染控制规范》要求控制放射性致癌物氡。美国前任总统克林顿曾向美国人民发表有关氡的公开信,公开信中说,

在美国氡是致肺癌的第二位诱因,“我鼓励所有美国人检查他们家庭住宅中的氡水平,并采取相应的行动以保护他们的家庭,采用降低我们家庭、学校和工作场所过高水平氡的方法”,以达到早期预防氡危害的目的。

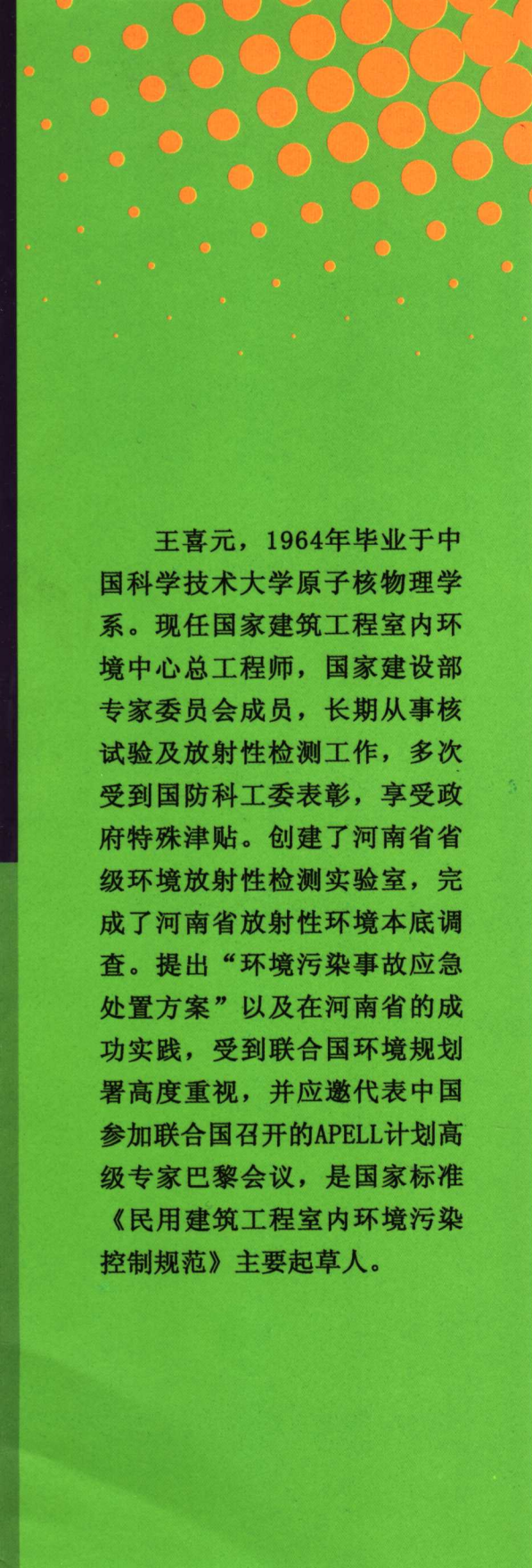
本书的主要内容在于介绍放射性的基本知识。围绕着建筑工程室内环境放射性污染控制工作,从介绍天然放射性的基础知识开始,逐一介绍建筑工程室内环境放射性污染的来源、氡的照射危害、制定民用建筑工程室内放射性污染控制标准的依据、国家的有关规定、工程过程的氡污染控制技术以及涉及的放射性检测方法等等。

本书把具有高中以上文化程度的读者作为阅读对象,在叙述中力图减少数理推导(仅在检测技术部分数理推导多一些),努力做到通俗易懂。虽然如此,仍不免有不尽如人意之处。好在国家标准《民用建筑工程室内环境污染控制规范》发布时间不长,一切工作都是刚刚开始,作者愿与各方面同事一起,在实际工作中共同探讨,共同学习,不断改进,也使本书内容不断完善。

在编写本书过程中,曾得到孙性善、胡天玉、管三元、韩华峰、杨元第、尚兵、王连俊、王倩雪等许多同志的帮助,在此一并表示感谢。

王喜元

2003年4月于郑州



王喜元，1964年毕业于中国科学技术大学原子核物理学系。现任国家建筑工程室内环境中心总工程师，国家建设部专家委员会成员，长期从事核试验及放射性检测工作，多次受到国防科工委表彰，享受政府特殊津贴。创建了河南省省级环境放射性检测实验室，完成了河南省放射性环境本底调查。提出“环境污染事故应急处置方案”以及在河南省的成功实践，受到联合国环境规划署高度重视，并应邀代表中国参加联合国召开的APELL计划高级专家巴黎会议，是国家标准《民用建筑工程室内环境污染控制规范》主要起草人。

目 录

1 放射世界——天然放射性基础知识	(1)
1.1 天然放射性的发现	(1)
1.1.1 放射性敲开了 20 世纪的大门	(2)
1.1.2 放射性的发现及原子核概念的产生	(3)
1.2 天然放射性的 3 种射线	(8)
1.3 射线的电离作用和物质中的穿透性	(10)
1.4 天然放射性的半衰期	(12)
1.5 核裂变的发现	(12)
1.6 核能利用(核武器、核电站)	(16)
1.6.1 裂变过程	(16)
1.6.2 裂变碎片与强放射性	(17)
1.6.3 裂变链式反应与核反应堆	(18)
1.6.4 核电站与核动力反应堆	(23)
1.6.5 发展核电是一种必然趋势	(27)
1.6.6 核电是一种经济、清洁、安全的新能源	(28)
1.6.7 世界核电发展形势与中国核电发展战略	(34)
1.6.8 核能的其他应用	(37)
1.6.9 关于核武器	(40)
1.6.10 中国核武器发展	(43)
1.7 永恒的能量	(56)
1.8 核科学技术的其他应用	(64)
1.8.1 放射性同位素在工业上的应用	(65)
1.8.2 放射性同位素在农业上的应用	(72)
1.8.3 放射性同位素在医学上的应用	(76)
1.8.4 放射性同位素在地质年代测定及考古研究中的应用	(79)
1.9 大地的天然放射性	(81)
1.9.1 从温泉说起	(81)
1.9.2 放射性是烤热地球之火吗	(82)
1.9.3 地壳中的铀	(83)
1.9.4 贫化铀金属的常规应用	(86)
1.9.5 其他:镭、钍、钾等放射性	(88)

1.10	空气中的放射性——氡	(92)
1.11	天然放射性无处不在(水体与生物体中的放射性)	(99)
1.11.1	水生生物的放射性	(101)
1.11.2	食物的放射性	(103)
1.11.3	人体的放射性	(106)
1.12	土壤中的氡对空气中氡浓度的影响	(109)
1.12.1	郑州市土壤中氡的调查	(110)
1.12.2	青岛市环境氡浓度分布规律研究	(113)
1.12.3	云南省个旧地区氡测量研究	(114)
1.13	无机非金属建筑材料的放射性	(115)
1.13.1	建筑材料涉及的放射性问题	(115)
1.13.2	建筑材料放射性水平调查	(117)
1.13.3	关于建筑材料放射性限量规定的有关情况	(123)
1.14	关于室内氡浓度控制标准的有关情况	(125)
1.15	普及核知识十分重要	(125)
2	《民用建筑工程室内环境污染控制规范》的有关规定	(128)
2.1	《规范》对无机非金属建筑材料的有关规定	(129)
2.2	《规范》对无机非金属装修材料的有关规定	(129)
2.3	《规范》对无机非金属建筑空心材料的有关规定	(131)
2.4	民用建筑工程基础防氡要求	(131)
2.5	民用建筑工程室内空气中放射性氡浓度的限量规定	(132)
3	工程设计阶段的放射性污染控制技术	(134)
3.1	确定基础防氡措施	(134)
3.2	按照民用建筑分类进行设计	(136)
3.3	室内装修设计和改扩建工程设计注意事项	(136)
4	工程施工阶段的放射性污染控制技术	(139)
4.1	一级防水(防氡)基础施工要点	(139)
4.2	材料进场检验	(140)
4.3	施工具体要求	(142)
4.3.1	地下工程防氡技术要求	(142)
4.3.2	实施《新建低层住宅建筑设计与施工中氡控制导则》	(151)
4.4	其他防氡施工要求	(156)
5	工程竣工验收阶段的放射性污染控制问题	(157)
5.1	验收检测的必要性	(157)
5.2	室内 ²²² Rn 浓度限量标准	(159)
5.3	关于验收氡检测的几个具体技术问题	(160)

5.4	室内氡浓度超标的溯源及补救措施	(163)
6	放射性检测技术	(165)
6.1	低本底多道 γ 谱仪工作原理(材料 γ 放射性比活度检测技术) ...	(165)
6.1.1	NaI γ 闪烁谱仪的基本原理	(165)
6.1.2	使用低本底多道 γ 谱仪测量材料的放射性比活度(内、外照射指数)	(177)
6.2	金硅面垒型半导体探测器工作原理(空气中氡浓度检测方法) ...	(178)
6.2.1	半导体的基本性质	(181)
6.2.2	均匀型半导体探测器	(186)
6.2.3	势垒区的形成及其性质	(190)
6.2.4	P-N 结半导体探测器的工作原理	(196)
6.2.5	P-N 结探测器的输出信号及主要性能	(199)
6.2.6	P-N 结探测器的应用—— α 等带电粒子的测量	(199)
6.2.7	RAD-7 氡检测仪使用说明	(200)
6.2.8	RAD-7 氡检测仪在检测中的几个技术问题	(233)
6.2.9	土壤中氡浓度检测技术及 FD-3017 型土壤氡测量仪使用说明书	(236)
6.3	放射性检测的不确定度	(244)
6.3.1	不确定度的意义	(244)
6.3.2	测量不确定度的评定	(245)
6.3.3	检测实验室应用不确定度的几项规定	(255)
附录 1	建筑材料放射性核素限量(GB 6566—2001)	(256)
附录 2	环境空气中氡的标准测量方法(GB/T 14582—93)	(260)
附录 3	空气中氡浓度的闪烁瓶测量方法(GB/T 16147—1995)	(279)
附录 4	新建低层住宅建筑设计及施工中氡控制导则 (GB/T 17785—1999)	(285)
参考文献		(297)

许多人是从小从日本广岛、长崎之毁第一次听说放射性的，自然他们的脑子里很容易将放射性与置千百万人于死地的原子弹联系在一起。然而，这只是问题的一个方面。

1.1 天然放射性的发现

最初的概念往往会长久地留在记忆里。我们幼小的时候就知道，在第二次世界大战中两颗原子弹扔到了日本的广岛和长崎，毁灭了那里的一切。到了今天，“放射”这个名词，知道的人已经很多了：医院有放射科，胸部待查的患者站在 X 射线机前，顺从地由医生随意摆布着，拍下一张张 X 胸片；癌症患者躺在射线治疗台上求助于射线杀伤癌细胞，抑制癌组织的生长，延长自己的生命； γ 刀治疗逐步扩大……今天，放射性的名声似乎并不坏，就一般老百姓而言，他们知道的“放射性”的好处比恐怖要多，尤其是人类可利用的化石燃料越来越少，不得不日益依赖核动力进行发电的今天。美国 1978 年度核电站的发电量已达 3 000 亿度，比我国 1978 年全国总发电量 2 560 亿度还要多。

在人类不断扩大利用核能规模的历史进程中，严密设防，坚持不使发生放射危害的原则，毕竟核事故的后果是严重的。美国 1979 年 3 月 28 日在阿里斯堡市附近发生的三里岛核电站压水堆核电失水事故，引起了各国的极大关注。1986 年 4 月 26 日，乌克兰切尔诺贝利核电站 4 号机组核反应堆发生爆炸，成为人类利用核能历史上最惨痛的悲剧，损失巨大，事故处理至今仍未完结。

人类是在地球漫长的演化、变动过程中，在自然界的培育下进化而来的，她从自然界中生长出来，又同自然密切地结合在一起。她身上的一切都同周围环境相映照：由于运动的需要，生长了四肢等运动器官；为了感知周围世界的情况和动向，生长了视觉、听觉、嗅觉，还有对冷热、软硬的感觉能力等。在长期的进化过程中，生物体随时调整着、完善着与周围世界的对立统一关系，发现自己需要的东西，去取得它；感知不利情况时，尽力保持自己不受损害。冷风袭来，皮肤上毛孔自然收紧，起了“鸡皮疙瘩”，以便减少身体热量的散失；眼前的突然动作，会使眼皮自动闭合，以防止眼球受到损伤；对恶臭及许多刺激性气体，会反射性地抑制吸气，使呼吸次数减慢，呼吸深度变浅，甚至完全停止呼吸等等。这种与生俱来的调节机能和保护性反应，许多已经为我们所认识，留在了我们大脑的记忆里。然而，自然界千变万化，相互间的作用是无量多的。相比之下，我们身体的感觉能力就显得十分小，

可感觉的范围也十分有限。比方说,从有人的那一天起,宇宙射线就在每时每刻穿透我们的身体,但是有谁能说他感觉到了这种穿透呢?我们活着的人,大口大口地将空气连同放射性微粒一起吸入体内,可是有谁能说他“嗅出了”放射性的气味呢?狗的嗅觉比人强百万倍,但在这一点上,看不出它比人更强。

在我们的故乡——地球上,生命正是在放射性不致构成威胁之后开始出现的现象,并在此后漫长的岁月中延续、演变,因此,如同空气和水无嗅无味一样,在我们的感觉器官里,也没有给放射性留下相应的位置。同样地,我们似乎还可以提出这样的问题:如果宇宙间别的星球上也有生物,那里的生命体的周围环境同我们的地球有所不同的话,它们(他们)是否可以感受到放射性现象呢?

正因为放射线看不见、闻不到,所以人类很晚才知道它的存在。直到现在,当科学家向人们宣讲放射性的知识时,似乎比讲那些已经十分抽象和难懂的天文学知识还要困难。但是,既然放射性是客观存在的,我们人类借助于工具发现了并且仔细地研究了它们,那么我们是能够将放射性说清楚的。正如1519年9月至1522年9月,当葡萄牙人麦哲伦率领他的探险队,冲破重重困难,完成了人类首次历史上环绕地球一周的航行并凯旋归来时,尽管他的同代人谁也没有这样的亲身经历,但谁又能不相信他做出的“地球是球形”的结论呢?真理既能发现,就能理解。一旦我们掌握了有关的知识,放射性神秘而又可怕的外衣就自然被剥去了。

1.1.1 放射性敲开了20世纪的大门

今河南省登封市东南15 km的告城镇,有一座我国现存最古老的天文台——

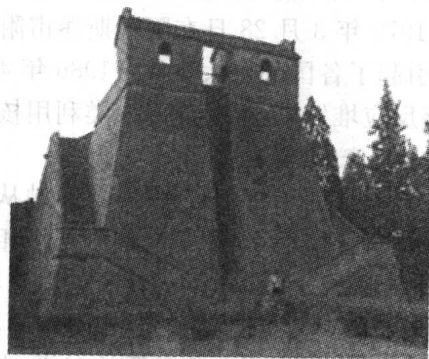


图 1-1 河南登封观星台

观星台,它是世界上著名的天文科学建筑物,距今已有七百多年历史。台高9.46 m,连同台顶小屋,总高12.62 m,台顶每边长八米多,台基每边十六米多(见图1-1)。它既是一座高大的城堡式建筑,又是一台大型天文观测仪器。看看这些古老的建筑,仿佛我们的思路一下子开阔了许多,是啊!我们勤劳聪慧的祖先在当时进行的天文研究是世界上一流的。古建筑还告诉我们,在生产

力水平十分低下的古代,人类的目光,不只是注意自己的衣食住行和周围的东西(土地、房屋、人群、牲畜),而是把目光指向浩瀚的天空了。

不仅宏观上如此,人类对于微观世界的思考也从未停止过。公元前5世纪至公元前3世纪,中国战国时期的《庄子》一书中就有“一尺之棰,日取其半,万世不竭”的物质无限可分的朴素观点。这就说明,人类文明几千年以来,除进行基本的生产活动外,从未停止过对世界的构成和变化的思索。

知识是连续性的,也是循序渐进的。从近到远看去,人类是先认识地球的现象,然后推知太阳系,再去探求银河系以至更大空间的规律。从大到小看去,人类也是先认识生活周围的尺度规模,再逐渐缩小下去的。到了 19 世纪初,出现了分子学说和原子论,从此结束了很长时间里人们关于微观结构的猜测和争议,达到一个质的飞跃。

整个 19 世纪,人类猎取的知识十分丰富。到 19 世纪末期,德国科学家伦琴在他的实验中发现 X 射线。实验表明,这种射线能够穿透可见光线无法穿透的纸板,使挡在纸板后面的照相底片感光(图 1-2)。一切未知的新现象都是那么神秘,并令人向往。当时,X 射线的发现轰动了整个科学界,吸引了很多科学家,于是,围绕着 X 射线的各种各样的实验研究很快在各个国家开展起来。像数学中常用的未知数符号 x 那样,伦琴也就称这种未知的射线叫 X 射线。现在,人们早已知道 X 射线究竟是怎么一回事了,但是已经长期用习惯了的名称,也没有谁再去改一改它。

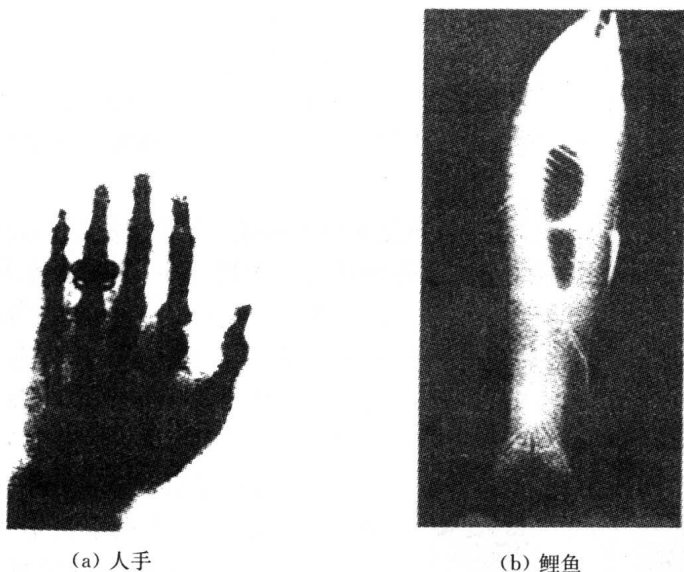


图 1-2 最初的 X 射线照片

1.1.2 放射性的发现及原子核概念的产生

X 射线发现以后,法国物理学家亨利·贝克勒尔出于对神秘的未知射线的兴趣,也投身到 X 射线的研究中去。当时,荧光辐射现象发现不久(就是说,某些物质材料被太阳光紫外线照射后,能够在一定时间内放射出可见光)。贝克勒尔猜想,X 光的发光机制是否和荧光有某种关系呢?他开始做这方面的实验。他决定将一块硫酸双氧铀钾矿石(一种荧光物质)放在太阳下照射,然后再将这块矿石与用黑纸包起来的照相底片放在一起。他想,如果太阳光照射后的矿石发出的荧光中含有 X 射线,那么底片应当感光。

贝克勒尔的试验方案并无不妥之处,不巧的是,偏偏那几天碰上连续阴天,试验无法进行。在焦急等待天气放晴的日子里,他不在意地将那块矿石与黑纸包住的照相底片一起放进抽斗里去了。几天之后太阳出来了,细心的贝克勒尔并没有原封不动地拿上矿石和底片就去试验,而是想到:底片是否会有漏光等情况发生呢?于是,他先去冲洗了底片。当底片冲出来以后,他经历了一个又惊又喜的时刻,因为他发现底片由于很强的辐射而变黑,留下了铀盐的痕迹,而这绝不是荧光或阳光所能达到的。以后,他又进行了多次试验,试验很快证明了,使底片感光的东西是矿石中的铀(当然,现在已经很清楚,正是从天然铀中放射出来的 β 、 γ 射线对底片起了作用)。贝克勒尔发现了天然放射性——铀,那是1896年2月底的事。

如果说X射线的发现是个前奏的话,那么,贝克勒尔的发现则拉开了一个新时代的序幕。贝克勒尔之前,人类为揭开微观物质构成之谜,长久地进行着研究,19世纪出现的分子学说和原子论就是这种研究取得成就的突出标志。然而,当时的分子学说和原子论尚没有原子结构和核结构的进一步具体化,因而是软弱无力的,没有多少实质内容。从那以后直至贝氏发现天然放射性之前的70年间,众多的科学家们虽然从未放松过自己的工作,但在微观世界的研究方面,始终未能取得大的突破。恰在这时,贝氏看见从原子内部射出的一道闪光,犹如在无从攀登的高墙前发现了一个缺口。

对探索真理的人来说,这一发现是对他们的极大挑战,使他们迅速地投入到向原子世界进军的队伍中去,用自己的全部聪明才智奋斗,甚至舍弃生命也在所不



图 1-3 居里夫人

惜。在这支队伍中,有一位功劳卓著、可歌可泣的科学家,她两次荣获诺贝尔奖金,这个人就是我们熟知的波兰女科学家玛丽·居里夫人(图1-3)。她对科学的强烈爱好驱使她离开了科学比较落后的波兰,到法国去求学,后来在那里安了家,开始了科学研究生活。贝克勒尔发现天然放射性的消息传来,像一股旋风那样迅速地将她卷入到对放射性物质铀矿石的研究中去。在十分简陋的实验条件下,她克服了生活上的种种困难和家庭拖累,在实验室里从事大批量的化学分离操作。有

一次,居里夫人和她的丈夫为了弄清一批沥青铀矿石是否有价值用于提炼纯铀而对样品进行测量,在工作中,他们惊奇地发现,有几块样品的放射性比纯铀的放射性还要强,这意味着,这些铀矿石中肯定还含有别的尚未被知道的放射性元素。这一新的发现推动着他们,一定要弄个水落石出。

居里夫人怀着十分激动的心情,搞到了几吨沥青铀矿石,接下去,就是在他们简陋的由木棚改装而成的实验室里,日以继夜地进行分析、研究。就这样,

一个月一个月地过去了,提炼过的矿石越来越多,一边提炼一边测量放射性,差不多非放射性的元素都被分离出来了,剩下的物质,放射性越来越强。到了1898年7月,也就是贝氏发现铀的天然放射性2年以后,居里夫人终于用两只手从几吨样品中分离出了极少量的黑色粉末,一种很像氯化钡的物质,它的放射性比铀矿石强400倍。不久,他们从这种黑色粉末中发现一种在化学性质上和铀很相似的新元素。为了纪念居里夫人的祖国波兰,他们把这种新元素命名为钋(Polonium)。

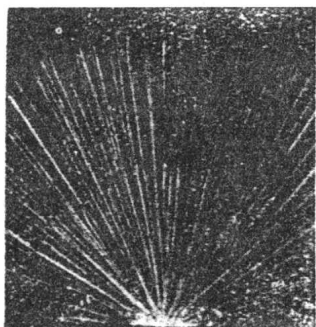
但是,钋只是使他们的黑色粉末样品具有强放射性的部分原因。因此,他们把这项工作继续进行下去。到1898年底,他们又从中分离出一种比钋的放射性还要强的另一种新元素,并把它命名为镭。“镭”一字来自拉丁文 *raolins*,意思即放射线。

钋和镭这类放射性元素,今天已经获得广泛应用,用镭放射源的强 γ 射线治疗癌症,已使许多患者受益。这两种放射性物质,都是亲骨性元素,一旦进入体内,容易跑到骨头中去,破坏人体的造血系统,导致癌症。按我国对放射性毒物的毒性分级,它们都属于“剧毒”组。但是,居里夫人当时对钋、镭的放射毒性是不了解的,她在没有起码防护条件的实验室里长年工作。就是她,既是第一个用双手将钋和镭献给人类的人,也是钋和镭的第一个受害者。后来,居里夫人得了白血病。1934年,这位卓越的学者、品德高尚的女性,为崇高的科学事业献出了光辉的一生。

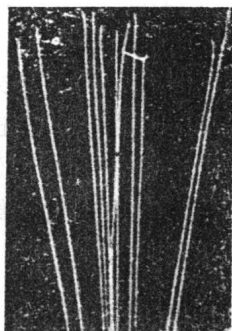
由于众多科学家的努力,放射性研究取得重大突破,关于微观物质结构的知识迅速增长,这就为原子物理学的建立奠定了基础。而这些近代科学的产生,明显地加快了19世纪已经开始了的工业、技术和科学现代化的进程。

第一个将放射线用于物质结构研究并取得卓越成就的是英籍新西兰人厄·卢瑟福,还有他的合作者盖华和马斯登。卢瑟福在近代物理研究领域取得了多项重要成就, α 射线就是他首先发现并由他命名的。那时,在贝克勒尔发现天然放射性3年以后,为了弄清 α 粒子和 β 粒子究竟是什么东西,他进行了许多工作,终于在1908年通过实验证实了 α 粒子就是带电的氦原子, β 射线是近于光速的电子。其中,证明 α 粒子是带电的氦原子的实验是十分有趣和巧妙的:他把 α 放射性材料装入一个玻璃管中,外面套一个厚玻璃管,两者之间抽成真空, α 粒子能够穿透内层的薄管壁而不能穿透厚的外层。这样,由于 α 粒子在内外两层物质中的放射,损失能量,就有一部分在两层之间停留下来,经过一段时间后,就收集了相当数量的 α 粒子。然后,他用放电方法来激发其中的 α 粒子,使它们受激发光。结果他发现,发射光谱是氦的特征光谱线。

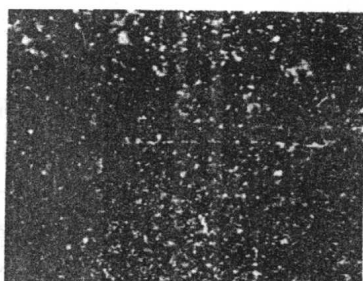
科学研究就是不停地向未知的顶峰攀登,每一步的终点都是下一步的起点。卢瑟福用 α 放射性物质作炮, α 粒子作为炮弹,对着别的材料轰击。正是卢瑟福的这一具有历史意义的轰击,打开了原子世界的大门(图1-4)。



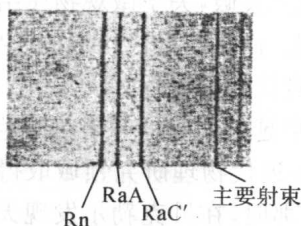
(a) 自 $\text{Th}(\text{C}+\text{C}')$ 发出的 α 粒子



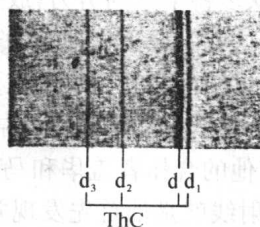
(b) 在同一照片上把射程尾段加以放大后的情形



(c) α 粒子的乳胶径迹



(d) 自镭发出的 α 射线谱



(e) 从钍 C 发出的 α 射线谱

图 1-4 α 粒子的照相记录

情况是这样：当时，带正电的质子及带负电的电子均已发现，人们开始猜测原子的具体构成了，但说法不一。有的人认为，原子大概由质子和电子构成（发现中子是以后的事），同时，由于电子易于打出，而质子则不能。所以，推想质子可能处于原子的内部。也有的人认为，原子的主体是带正电的，而带负电的电子像葡萄干一样粘在带正电的主体上。正是卢瑟福的 α 粒子散射实验使各种争论迅速平息下来，并最终取得一致。

卢瑟福的实验结果，一开始他自己都不敢相信。卢瑟福与其合作者获得重要发现的经过，正如卢瑟福所自述的那样：“在我年轻的时候，观察过 α 粒子的射线，

并且盖华博士在我的实验室中仔细地研究过它。他发现,在重金属薄片 α 粒子的散射一般是微小的, 1° 左右。有一天,盖华走过来对我说,“你是否认为跟我搞放射性方法的年轻人马斯登应该开始做一点研究?”我当时也想到这事,于是我说,“为什么不让他查看一下是否 α 粒子能有大角度的散射?”我可以偷偷地告诉你,我认为不会有大角度的散射。因为我们知道 α 粒子是一种极快速的重粒子并具有很大的能量,而且你可以证明,如果散射是由若干小的散射的积累效果引起的,则一个 α 粒子向后方散射的几率是极小的。然后,我记得是在两三天以后,盖华十分高兴地跑来告诉我说:“我们已经能够看到 α 粒子向后方跑出来了……”那真是我一生遇到的最难以置信的事了。它几乎就像你用15英寸炮弹来射击一张薄纸,而炮弹返回来击中了你自己那样令人难以置信,经过思考之后,我了解到这种后向的散射必然是单击碰撞的结果。而且在我计算时,我领悟到,除非你承认这种体系,即原子质量的大部分集中成微小的核,否则你就怎么也不可能得到那种数量级的散射。就在那时,我就有了原子具有微小原子核,原子具有一个带电的微小而重的中心的想法。用数学方法我算出了散射所应遵循的规律,并发现沿着角度射线的粒子数目应同散射箔的厚度、原子核电荷的平方成正比,并同速度的四次方成反比。”那是1909年的事。卢瑟福关于原子结构的定性分析以及他的计算,为以后大量的实验所证实。原子核的概念由此产生了。

现在已经明白,原子的大小在 10^{-8} cm量级,即小数点后7个零(0.000 000 01 cm),原子核大小在 10^{-13} cm量级(即小数点后12个零)。这样小的东西,按我们通常生活范围的尺度比,简直难以想像。因为,谁能想到在一根头发丝粗细的横断面上,竟能排下数以十万计的、有一定结构的原子呢?那可真是微观世界。卢瑟福的科学分析正是关于这个微小世界内的事情。

原子虽然十分微小,但仍然是个对立统一物,它有一定的结构。原子核比原子小约10万倍。比方说,如果原子像北京天文台大厅那样大的话,那么原子核充其量不过像一颗小米粒那样大小。由此可以想像,原子空间是多么的“空洞无物”。然而,整个原子大厅重量的99.9%以上全部集中在那个小米粒上(核外电子的质量仅为质子或中子质量的 $1/1840$)。卢瑟福实验中的金箔就是由这样的原子,像蜂窝一样一个挨一个构成的。因此,当他用 α 粒子(它是氦元素的原子核,带正电,比电子重得多,比金片中的元素原子的原子核小一些)朝金片轰击时,自然如入无人之境,无所阻挡地疾驶而去,由于与金片中金原子核的电荷相斥作用, α 粒子对于入射方向稍偏离 1° 左右,也是可以理解的。至于核外电子的轨道运动在重得多的 α 粒子面前,正好似蜘蛛网面对一枚飞速前进的重炮弹,绝对形不成障碍。既然如此, α 粒子竟朝飞来方向波散射回去的可能性自然不会大。一旦发生这种情况,只能理解为 α 粒子与金属箔片中的原子核刚好碰头了,并被径直撞了回去的缘故。须知, α 粒子的飞行速度是很快的,例如,我们有时接触的 ^{239}Pu (239 钚) α 粒子的能量

约为 $5.14 \text{ MeV}^{①}$, 相当于飞行速度为每秒钟 $16\,000 \text{ km}$, 就是说, 一秒钟飞过太平洋。

卢瑟福的 α 粒子散射实验为原子核结构的研究揭开了新的一页。几年以后, 丹麦科学家尼·玻尔提出原子结构的量子化轨道理论, 以后又不断为其他学者所补充而日臻完善, 逐渐勾画出现代科学的原子图像。

现代原子物理学在整个现代自然科学中占有突出的重要地位, 可以毫不夸张地说, 如果没有原子物理学, 就如同没有沃土一样, 其他科学及现代工业将无法根深叶茂和果实累累。

1.2 天然放射性的 3 种射线

同一种元素的原子核, 其原子序数相同, 在元素周期表中处于同一位置。但是, 原子序数相同的原子核并不仅有一种, 可以有多种, 它们的原子序数相同, 但原子核质量不同。这些原子序数相同但原子核质量不同的原子核, 我们称之为该元素的同位素。目前, 人们发现的元素有一百多种, 同位素有一千多种。从原子核的结构看, 所谓同位素, 就是原子核内质子数相同而中子数不同的原子核。正是由于它们的质子数相同, 核外的电子数相同, 电子结构大体相同。所以, 同一种元素的同位素的化学性质几乎一样, 或十分相近。

自然界中天然的同位素有许多, 其中有稳定的, 也有不稳定的。例如, 一般的氢(^1H)和氘(^2H)就是两种同位素, 它们的质子数都是 1, 都是稳定的原子核, 但氘(^2H)除了有一个质子外, 原子核内还有 1 个中子, 而氢(^1H)的原子核内只有 1 个质子, 氢(^1H)和氘(^2H)的化学性质十分相近, 两个氢(^1H)原子与 1 个氧(O)原子结合形成 1 个水分子, 两个氘(^2H)原子与 1 个氧(O)原子结合同样形成 1 个水分子。为了有所区别, 我们将这种水称为重水, 重水在反应堆的建造上很有用。又如, 锂(Li)元素, 有两种稳定的同位素, 一种是 ^6Li , 另一种是 ^7Li , 它们的原子序数(质子数)都是 3, 但原子质量不一样, 一个原子核内有 3 个中子, 一个原子核内有 4 个中子, ^6Li 和 ^7Li 的化学性质十分相近。其他稳定的同位素还有很多, 例如, ^{10}B 、 ^{11}B 、 ^{12}C 、 ^{13}C 等等。到目前为止, 已经发现的各种各样原子核(同位素)总共有一千四百多种, 它们或者包含的质子数不同, 或者包含的中子数不同, 或者包含的质子数和中子数都不同。

自然界中有许多不稳定的具有放射性的同位素, 例如, 元素铀(U)就有多种放射性同位素: ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{234}U 等, 它们的原子序数一样(质子数一样), 但核内的中子数不一样, 它们都具有放射特性。铀(U)核中含有 92 个质子, 所以它的原子序数是 92, 但是, 其核中所含有的中子数可以很不相同, 单铀的

① 在物理学中, 电子伏可表示为 eV 。其物理意义为: 1 个电子在 1 伏特电压差的电场中运动所获取的能量。