

吴明红 王传珊◎编著

核科学技术的 历史、发展与未来



科学出版社

核科学技术的历史、发展与未来

吴明红 王传珊 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是关于核科学技术的导论性书籍,深入浅出地介绍了一个多世纪以来核科学技术的发展史、核科学的基础知识和核科学技术的应用,并展望了未来。本书共分十三章,内容涵盖了核科学的基础知识,核能的利用,核科学技术与医学、材料、环境、宇宙学等学科的交叉,以及辐射加工、辐射防护、剂量学等内容,尤其介绍了蒙特卡罗方法及其在核科技领域的应用实例。本书还对反应堆、核电站、同步辐射、医用加速器等大型辐射设备的原理、构造、屏蔽、应用和发展前景作了介绍。本书在较为全面地介绍核科学技术过去、现状及未来的基础上,提供了大量翔实材料,包括国内外最新技术成果,可供对核科学感兴趣的读者参阅。

本书既可作为非核专业学生的基础课教材,也可作为从事核能应用、核科学技术交叉学科等方面工作的科研工作者及相关工作人员的专业培训教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

核科学技术的历史、发展与未来 / 吴明红, 王传珊编著. — 北京: 科学出版社, 2015.10

ISBN 978-7-03-045922-0

I. ①核… II. ①吴… ②王… III. ①核技术—研究 IV. ①TL

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第239651号

责任编辑: 张淑晓 崔慧娟 / 责任校对: 彭珍珍

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 楠竹文化发展有限公司

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年10月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015年10月第一次印刷 印张: 17 1/4

字数: 250 000

定价: 68.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

将禁锢在原子核中的巨大能量释放出来，这是翻天覆地的伟大事件。从此，地质代中出现了一个“人类纪”，表明人类的痕迹在地质层中有所记录，这个痕迹是原子弹爆炸留下的。从此，自然科学界、国民经济领域、社会生活乃至国际格局，都发生了深刻的变化。核科学技术的触角伸向各个领域，魔法似的改变随之发生。核科学技术推动了经济的发展，同时造福了人类。

该书提供了大量的历史资料，重现了核科学技术发展初期那些惊天动地的事件，曲折而艰难的道路，以及求索者不倦的追求，希望对读者有所启迪。编著者还从自身的积累出发，浅述了核科学技术在各领域的应用，其中包括在环境方面的应用，模拟微观粒子在系统中运动过程的蒙特卡罗方法，核辐射剂量学和辐射防护，等等。

普通公众对于核科学技术的了解，主要来自原子弹的爆炸和核电站的事故，看法不免有所偏颇。鉴于此，该书用较大的篇幅叙述了核电站、同步辐射装置、加速器等典型核设备的原理、设计与应用，重点叙述了对辐射的屏蔽，以帮助读者正确、全面地看待核科学技术的应用。

该书每章末都有结语，总结本章内容并发表编著者的若干感悟。

核科技方兴未艾。“人造太阳”——可控核聚变将成为现实，聚变电站将比裂变电站更高效、更环保；核科学技术的发展将对微观世界的探索和宇观世界的探索同时产生不可替代的作用；核科学技术自然会因为它的可持续发展而得到保护。

该书编著者长期工作在核科学技术领域的第一线，基础理论扎实，实际经验丰富，成果丰硕。相信该书的出版一定会使读者受益。

柴之芳

2015年4月8日

前 言

本书是供非核专业人员阅读的核科学和技术的导论性书籍，介绍核科学的发展史、基础知识、主要技术成果和核与其他学科领域交叉的新发展。本书力图用通俗的语言讲清基本科学原理，使读者了解科学知识，学习科学方法，提升科学素质。

20 世纪前半叶，是核科学从诞生到发展壮大的时期。19 世纪末，放射性现象被偶然发现，此后越来越多的放射性核素不断被发现，人们对它们的性质进行了研究，很快就弄清了原子核是由中子和质子组成的，其结构就像一个紧密、坚实的小球，由一种叫做核力的强大吸引力将中子和质子紧密结合在一起。不久，人们又发现，一个放射性核可自发地放出一个粒子（如中子、质子或电子）变成另一个核；也可以用中子、质子和 α 粒子轰击原子核，使它变成另一个核，甚至可以轰击一个较重的核，使其变成两个较轻的核，或将两个轻核聚变成较重的核。人们还发现，上述过程中有能量释放，这就是核裂变和核聚变。

从发现放射性到发现核裂变与核聚变，经历了长达 40 多年的时间；但是从发现核裂变到造出原子弹，却不到十年。时值第二次世界大战（以下简称二战），是战争将核科学到核技术的转化期缩短了。核弹的强大破坏力使人类受到极大的震撼。二战结束后，反对使用核武器的呼声日渐高涨，在此后数十年中，核技术从军用逐渐转移到民用，核电站便是其最重要的应用之一。核电站与原子弹基于同样的核裂变原理，不同的是：原子弹是在瞬间放出强大能量，核电站是持续而平稳地放出能量。同时，原子能在其他领域中的和平利用也迅速发展。例如，在工业上用于密度、厚度测定和料位控制及材料改性和医用产品灭菌；在农业上用于诱变育种；在地质上用于探矿；在考古上用于鉴定文物年代；在医学上用于探病、治病；在刑侦上用于破案、

测爆；等等。

近年来，核技术在医学上的应用发展迅速，形成核医学这样一个核技术与医学的交叉学科。随着加速器技术和计算机技术的发展，放射治疗已成为各大医院治疗癌症的常规手段，但这需要医生与核技术人员的紧密配合，才能做到精确定位、合理剂量，获得最佳疗效。在航天领域，核辐射环境对飞行器电子元件的影响不容忽视，形成了“抗辐射加固”的专项研究，由核辐射技术人员与航天技术人员协力攻关，取得了不菲的成果。基于核科学而问世的现代宇宙学——宇宙起始于一场大爆炸的模型，被公众接受，现代天文学的许多观察结果都得到了合理的解释。

在核科学自身领域，由于核与基本粒子线度极小、结合极其紧密，对它们进行研究需要大型的高能设备，如高能粒子加速器、同步辐射装置、散裂中子源等。对它们的研制被称为“大科学工程”。所谓“大”，一是规模极大，有的将整座山作为基础，有的建在隧道里；二是涉及学科门类多，其建成与应用涉及众多学科，成为面向全球的服务平台。

核科学的发展和核能的广泛应用，是20世纪最瞩目的科学成就，但是也带来很多环境和安全问题。20世纪中期频繁进行的大气层核试验，对大气和土壤的污染已经显现出来。1979年、1986年和2011年发生的三次严重核电站事故，使很多人“谈核色变”，其负面作用影响了很多国家的能源政策。另外，核工程的废物处理，包括短期和永久处置、运输等都存在不少问题，在使用、保存、运输等环节也发生过不少意外及事故。这导致核技术发展的几度曲折，包括核科学技术研究规模缩小、经费投入减少、核科学技术的专业培训停办等。

核科学与技术带给人类的是充满矛盾的后果——利益与危害。其实，几乎所有高科技领域都存在类似问题。人们在享受核能的高效、洁净与安全的

同时，要克服恐核心理，也要认真对待核辐射可能对人体造成的损害，开发出更加安全、先进的核技术装置，趋利避害，让核科学技术更好地为人类服务。通过本书的学习，使读者能对核科学技术有一个历史的和较全面的认识，这就是我们所期待的。

编 者

2015 年 5 月

目 录

序

前言

第一章 核科学发展简史	1
1.1 偶然的发现	2
1.2 电子的发现	4
1.3 居里夫人与放射性	5
1.4 卢瑟福和他的实验	6
1.5 中子的发现	9
1.6 裂变反应的发现	10
1.7 曼哈顿计划	12
1.8 中国的原子弹历程	16
1.9 早期核电站	18
1.10 和平利用核能的 60 年	20
1.11 求索者的脚步	20
结语	22
第二章 核科学基础	23
2.1 认识物质的结构	24
2.2 力和相互作用	36
2.3 放射性	43
2.4 原子核反应	49
2.5 射线与物质的相互作用	53
结语	72
第三章 核能的利用	73
3.1 核能的释放模式	74

3.2 核武器	77
3.3 核电站	80
3.4 可控核聚变	94
3.5 核潜艇	97
3.6 核动力航空母舰	98
3.7 其他海洋核动力装置	99
3.8 核动力在航空航天领域的应用	100
3.9 核动力装置小结	102
结语	103
第四章 核科学技术与蒙特卡罗方法	105
4.1 蒙特卡罗方法的基本思想	106
4.2 M-C 方法的起源	108
4.3 M-C 方法的解题思路	111
4.4 M-C 方法的特点	112
4.5 M-C 方法的收敛性和误差	113
4.6 核科学技术中使用的 M-C 通用程序	114
4.7 M-C 方法的应用及发展	118
4.8 计算实例	119
结语	127
第五章 粒子加速器	129
5.1 电子加速器	132
5.2 带能中子发生装置	133
5.3 质子加速器	136
5.4 同步辐射装置	137
结语	148

第六章 辐射的来源、危害及其防护	149
6.1 辐射的来源	150
6.2 放射性物质在环境中的迁移与照射	154
6.3 辐射防护.....	156
6.4 核辐射对人体的危害.....	162
6.5 核电站的安全性	164
6.6 氡的危害.....	168
6.7 生活中的放射性污染.....	170
结语	172
第七章 核辐射测量	173
7.1 核辐射探测器.....	174
7.2 与放射性核素有关的物理量测量	179
7.3 放射性活度测量	183
结语	184
第八章 中子活化分析及其应用	185
8.1 中子活化分析.....	186
8.2 中子活化分析的应用.....	188
8.3 中子活化分析小结	194
8.4 其他核分析技术一瞥.....	194
8.5 几种核测量设备	198
结语	199
第九章 核科学在医学中的应用	201
9.1 核医学.....	202
9.2 辐射在核医学中的应用	204
9.3 放射治疗中的医用加速器.....	207

9.4 放射治疗鼻咽癌的实例	212
9.5 核医学中的放射性药物	214
结语	215
第十章 辐射技术在环境保护中的应用	217
10.1 辐射技术在废水处理中的应用	218
10.2 辐射技术与污泥处理	220
10.3 烟道气的辐射处理	221
10.4 辐射技术在揭示环境污染物的生物毒理中的应用	222
10.5 辐射技术处理高分子固体垃圾	223
10.6 辐射技术应用于环境保护的现状与展望	224
结语	225
第十一章 辐射加工及改性	227
11.1 辐射源	228
11.2 高分子辐射化学基本原理简介	229
11.3 辐射聚合	231
11.4 聚合物的辐射交联与降解	232
11.5 辐射固化	236
11.6 辐射消毒	236
11.7 辐射育种	237
11.8 辐射不育	238
11.9 低剂量刺激生物生长	239
11.10 食品辐照	239
结语	240
第十二章 宇宙起源与核科学	241
12.1 宇宙是什么?	242

12.2 宇宙的起源	242
12.3 宇宙形成的最初 3 秒钟	245
12.4 3 秒钟后的宇宙	248
12.5 宇宙的命运	249
12.6 宇宙学的未来	249
结语	252
第十三章 核科学的未来	253
13.1 未来的核科学技术将继续为其他领域的发展提供武器	254
13.2 未来的核科学技术将淘汰过时的理论和落后的技术	256
13.3 未来的核科学技术发展必须是可持续的	257
13.4 未来的核科学技术要继续发展先进技术	257
参考文献	260
后记	261

第一章

核科学发展简史

- 1.1 偶然的发现
 - 1.2 电子的发现
 - 1.3 居里夫人与放射性
 - 1.4 卢瑟福和他的实验
 - 1.5 中子的发现
 - 1.6 裂变反应的发现
 - 1.7 曼哈顿计划
 - 1.8 中国的原子弹历程
 - 1.9 早期核电站
 - 1.10 和平利用核能的 60 年
 - 1.11 求索者的脚步
- 结语

我们生活的地球上，缤纷万物无不具有其独特性。仰望星空，浩瀚宇宙更显得无限神秘。古今中外，人们都在思索这样一个问题：宇宙万物是从哪里来的，我们是从哪里来的。溯源的结果是，我们这样一个大千世界，乃至宇宙万物，竟然都是由肉眼看不见的原子构成的。原子的种类也并不太多，自然界中能找到的也不过 92 种。就是这小小的原子构成了高山大川、土壤空气、生物和非生物。那么，原子是否是万物的本源呢？在古希腊学者看来，原子是不可分的（“原子”的希腊文为 atom，“不可分”的意思。这个词沿用至今）。到 18 世纪，道尔顿的现代原子论诞生了。他认为：元素由不可分割的原子构成；同一元素的原子相同，与其他元素的原子不同；原子不可再分，不因化学反应而变成更小的微粒。这个理论影响了科学界 200 年。

但是，追求万物本源的步伐并未停止，19 世纪末，一个偶然的机，放射性被发现了。放射性现象完全不同于化学反应，在化学反应中，原子保持不变；而放射性则来源于原子内部，一种原子放出射线，它就变成了另一种原子，这说明原子是可变的、可分的，而且是有结构的。很快，人们对物质的认识就进入了原子核层次，发现所有原子都由原子核和核外电子组成，而不同的原子核又都由不同数目的中子和质子组成。这样，人们朝着认识物质本源的目标又前进了一步。原来，组成宇宙万物的仅是几种基本粒子——电子、中子和质子。从此，一门崭新的学科——核科学诞生了。

1.1 偶然的发现

19 世纪末 20 世纪初，物理学界笼罩着一片乐观气氛。当时，牛顿运动方程、麦克斯韦电磁场理论和统计力学为主的经典理论体系已经成熟，能解释宏观物理学遇到的所有问题，以至于部分物理学家自满地认为，物理学的大厦已经建成，今后的问题只是在某个角落里作一些不重要的修饰而已。譬如，对某个物理定律作一些小修正，这种修正可能发生在小数点后面几位。就在此时，放射性被发现了。

1895 年 11 月的一个下午，维尔茨堡大学的伦琴（Wilhelm Conrad

Röntgen, 1845 ~ 1923, 德国物理学家) 在实验室用一个同事为他制作的阴极射线管做实验, 这是一个两端装有金属电极的玻璃管, 在两极加上高电压, 管中的稀薄气体会发出光线; 将管中气体抽尽, 再在两极加上电压, 就有物质从阴极流向阳极, 这种物质称为阴极射线。在昏暗的实验室中, 他注意到, 阴极射线击中阳极后, 阳极后面的玻璃会发出荧光。他想知道, 把阴极射线加速后再轰击阳极会发生什么现象, 于是在阴极射线管两端加上 3 万伏高压, 并在阳极上装上铝箔窗, 管后放上荧光屏, 他希望能看见阴极射线射出管外。结果, 他确实看到荧光屏处有闪光, 但这闪光并不是阴极射线, 而是某种从未见过的特殊射线。伦琴举起手, 想看看自己的手是否能阻挡射线, 却看见屏上显现出手的骨架。起初, 伦琴将加速的射线引向铝箔, 目的是让射线减速。根据电磁学原理, 电荷速度变化能产生电磁波, 伦琴的射线是加速的带电粒子流, 受到铝箔阻止会产生电磁波。但是, 伦琴发现的射线, 其波长是如此之短, 大大低于可见光, 且低于紫外线的波长, 射线能穿透他的手, 只是没有穿透骨头。这是一种从未见过的射线, 伦琴认为必须尽快为自己发现的这种射线取个名字, 于是就把它称为 X 射线。不久, 伦琴公布了这个新发现, 引起了全世界的关注。伦琴发现的射线 (也称为伦琴射线) 极具穿透力, 可用于医疗诊断, 甚至开创新的工业领域, 其对原子科学的影响则更为深远, 这使他成为获得诺贝尔物理学奖 (1901 年) 的第一人。

1896 年新年伊始, 法国科学家贝可勒尔 (Antoine Henri Becquerel, 1852 ~ 1908) 在巴黎的自然历史博物馆听取了伦琴发现 X 射线的科研成果报告。当时他认为, 能产生这种新射线的不是加速的电粒子流, 而是玻璃中的荧光粉。他知道一种产生荧光的好办法, 就是选择某种化学物质, 放在太阳光下曝晒, 之后它会产生荧光, 再用荧光产生 X 射线。他的实验就是将化学物质用黑纸包好, 放在盖好的底片上, 再放在太阳光下, 他估计产生的 X 射线将会使底片感光。可是, 他试验了多种荧光物质, 均未成功。最后, 他买了最贵的荧光化合物——硫酸钾铀酰做试验, 终于获得成功: 太阳光照过的铀化合物使包好的底片感光了。贝可勒尔认为自己发现了一种能产生 X 射线的新方法, 不用再在阴极射线管上施加高压了。出于谨慎, 他还想重复一下试验。可是, 连续几天都是阴天, 他无法进行试验, 铀化合物和底片就

都放在抽屉里。贝可勒尔没做成试验，就想不妨将底片冲洗出来，作为一种反证——证明没有太阳光，就没有 X 射线，底片也不会感光。但是，使他大为惊奇的是，底片居然出现了搁在上面的铀化合物粉末的影子。这样看来，即使没有荧光，铀化合物也能主动发出射线，而且这种射线能穿透黑纸，使底片感光。这是人类第一次发现放射性（图 1-1）。铀是一种具有天然放射性的物质，它能放出多种射线。这些射线看不见、摸不着，有的带电，有的不带电，它们都带有能量，有的还有很强的穿透性。

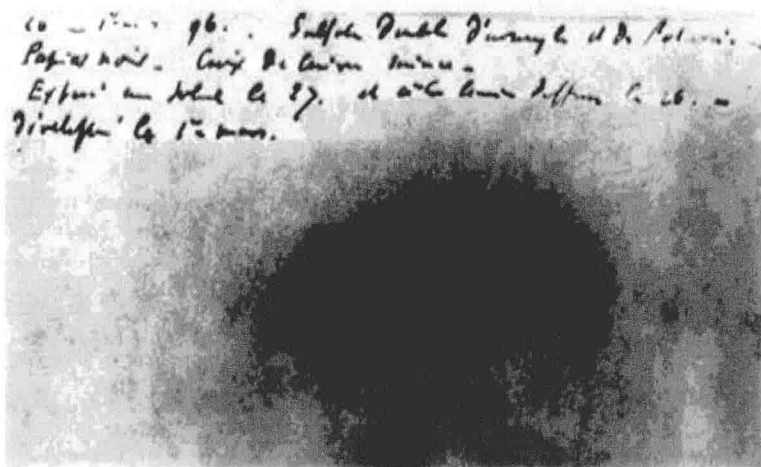


图 1-1 贝可勒尔首次发现放射性。照相底片中有铀盐的痕迹

1.2 电子的发现

伦琴和贝可勒尔的发现为一大批惊人的科学发现开了个头，在英国剑桥大学卡文迪许实验室（Cavendish Laboratory），约瑟夫·约翰·汤姆孙爵士（Joseph John Thomson, 1856 ~ 1940）正集中全力研究阴极射线。阴极射线带有负电荷，将其引出真空管，会在静电场或磁场中发生偏转。对阴极射线在高压电下的偏转角度的分析表明，这种微粒的质量很小，几乎可以忽略不计。这证明，阴极射线由微小的带电粒子组成。原子失去这些带负电的微粒



后，剩下较重的带正电荷的剩余物，所带正电荷的量与原子失去的负电荷的量相等。据此，汤姆孙推理出被称为“面包葡萄干”的原子模型，即原子是带正电荷的大微粒，上面镶嵌有带负电的小微粒。这是个大胆的推论，它推翻了自古以来人们认为原子是不可分的陈旧观念，为近代物理学开辟了道路。他发现的带负电的微粒，被称为“电子”。汤姆孙因此获得 1906 年的诺贝尔物理学奖。

1.3 居里夫人与放射性

贝可勒尔发现的铀的放射性，究竟是铀特有的，还是别的元素也有呢？在法国，年轻的居里夫人（玛丽·居里，Marie Curie, 1867 ~ 1934）在思考着这个问题。当时，原子核还不为人知，核衰变的概念也没建立，只知道原子中有正电荷和负电荷。为了研究铀发出的射线，居里夫人及其丈夫皮埃尔·居里（Pierre Curie, 1859 ~ 1906）弄来了 1 吨沥青，这是一种含铀矿渣，它确实会产生贝可勒尔发现的射线，不论是铀的何种化合物，不论铀以什么状态存在，也不论温度、压力如何，都会有射线产生，射线的多寡只取决于铀的含量。居里夫人觉得射线很像是从铀原子的中心发出来的。于是她提出，贝可勒尔发现的射线是放射线，是辐射能。这是人类首次认识放射性。

1898 年，居里夫人发现另一种元素也有放射性，这就是钍。这使她更坚信，辐射并非只有铀才具有，而是一类原子的特性。于是居里夫妇加紧工作，用化学法提炼了一桶又一桶的沥青，将沥青中含量极微的放射性元素提炼出来，他们发现提炼出来的物质中还含有两种新的放射性元素。居里夫妇将其中一种新元素取名为钋，以纪念她的祖国波兰；将另一种取名为镭，因为它的放射性很强。居里夫妇经过 1400 天的努力，成功地从 8 吨沥青铀矿中提取了 0.1 克的纯净的氯化镭，并测定了它的原子量为 225 ± 1 （现为 226.0254）。镭会在黑夜里发出美丽的蓝光。由于发现放射性以及对放射性的研究，居里夫妇与贝可勒尔获得了 1903 年诺贝尔物理学奖。

居里夫人的最大贡献在于她创建了一门新的学科——放射化学。它研究