

人类生存发展与核科学

刘洪涛 郑春开 姚淑德 编著
哈鸿飞 蔡建新 唐任寰

北京大学出版社
北 京

图书在版编目(CIP)数据

人类生存发展与核科学/刘洪涛等编著. —北京: 北京大学出版社, 2001
ISBN 7-301-04772-X

I. 人… II. 刘… III. 核技术应用—基本知识 IV. TL99

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 76022 号

书 名: 人类生存发展与核科学

著作责任者: 刘洪涛 等

责任编辑: 郭佑民

标准书号: ISBN 7-301-04772-X/TL·3

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn>

电 话: 出版部 62752015 发行部 62754140 编辑部 62752038

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

排 版 者: 兴盛达打字服务社 62549189

印 刷 者: **中国科学院印刷厂**

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.5 印张 390 千字

2001 年 2 月第 1 版 2001 年 2 月第 1 次印刷

定 价: 25.00 元

内 容 简 介

本书从原子核和放射性的基本知识出发,结合人类生存发展的主题,论述了核科学技术在能源、材料、生物、医学和工农业生产等领域中的重要、独特的、甚至不可替代的作用;同时也阐明了放射性照射人体可能产生的效应,以及人们现在是怎样在高度安全地使用着放射性,避其害、取其利、造福于人类的。

本书主要面向大学生(文理科)读者,强调科学知识、科学素质和社会文化修养的提高;亦可供对核科学和人类生存发展感兴趣的其他读者阅读参考。

序 言

放射性的发现、核科学的诞生和迅速发展,打开了人类探索微观世界的大门,使物理学发生了革命性的转变,开创了科学技术发展的新时代。1939年核裂变的发现向人们展示了原子核内所蕴藏的巨大能量,预示着核能的有效利用将空前地提高人类认识世界和改造世界的能力。原子弹的爆炸证明了核能的巨大威力,同时,也给人们留下了灾难和恐惧。热爱和平的国家和人民强烈谴责利用核能制造武器,与核垄断、核威胁进行了不懈的斗争。另一方面,二次世界大战以来,原子核科学技术有了飞速的发展。它不仅广泛地与科学技术的各个领域相结合,发展了许多交叉学科,诸如核天体物理学、核化学、核固体物理与材料科学、核生物学、核农学、核医学、核电子学、辐射化学等等,有力地推动了科学技术的发展,并在经济建设的各个领域里得到了广泛的应用,成为20世纪人类最辉煌的成就之一。从1954年世界上第一座核反应堆发电成功至今,核发电量已占世界总发电量的五分之一。虽然目前关于核裂变能发电的看法和决策存有一些争议,但面对传统能源的枯竭和全球环境的恶化,核能作为一种重要的“洁净”的新型能源已为世人所公认,核能的进一步开发和利用是解决人类能源危机最有希望的手段之一。

人们在发展核科学的过程中,开拓出许多新型高科技领域。今天计算机的二进位电路单元和信息网络,最初都是在核科技的发展中诞生的。核科技所孕育的其他技术,如核分析技术、辐射生物技术、辐射材料加工技术与核示踪技术等,在医学和工农业生产中的应用是如此之广泛,以至于可以说它们是无所不在的,并且在越来越多的领域创造出新的发展、创造出可观的经济效益和社会效益。一个调查显示:在美国上述多种核技术创造的经济效益和就业机会已明显超过核能发电等大型项目。可以说,人类生存发展与核科学已变得密不可分。值得注意的是这种密切关系不仅反映在科技工作者之间,而且也日益深入到新闻报道、文学艺术、法律法规、政策制度等社会生活的各个角落。人们会遇到这样或那样的“核”问题,小到一次例行的肺部透视,大到对某项核技术应用的想法或决定相关的政策、法规;一个人可能自觉或不自觉地享受着核技术带来的成果,也可能因核恐惧心理而拒绝使用核技术。正因为如此,在科学技术高度发展的社会里,了解和掌握核科学技术的基本知识已成为人们学习、工作和生活的必需。尤其是对于当代大学生群体,核科学不仅能够扩充他们的知识宝库,而且也能够提高他们的科学素质,增强他们的科学研究能力。

1998年,北京大学技术物理系刘洪涛等人开设的“人类生存发展与核科学”的课程和编写的讲义正是适应了这种需要而做出的有益尝试。三年来在北大文理科学生和外国留学生中开设此课程的结果表明这种尝试是成功的。本教材是总结三年教学经验,听取了学生、教师 and 校内外有关专家的意见重新修订而成。目前,我国有关核科学技术论著、文献资料和译著等书籍也不少,但适用于高等学校文理科共同使用的教材却不多见。本教材的出版一定会对核科学技术知识的推广和普及起到积极的作用。

陈佳涛

2000年12月

前 言

核科学从诞生之日起就与人类的生存发展密切相关；时至今日，它越来越多地进入我们的生活，解决或正在解决人类面临的一些难题，成为影响当今人类生存发展的重要因素之一。比如，核能已成为人类所需能源的一个重要来源之一；核医学诊断和治疗传统医学难以诊治的疾病；核辐射加工制造出了许多高质量产品；核技术帮助航空公司侦破恐怖炸弹，帮助人们制造新的材料、新的器件……，这一切都在改善着人类的工作条件和生存质量，人类现在以及未来的生存发展需要核科学。

核技术也存有危险，使用不当或发生错误会给人们带来危害、破坏，甚至是灾难，这是无可争辩的事实。但是，由于长期的“核讹诈”政策和公众缺乏对核技术的了解，造成了人们普遍的核恐惧心理。实际上，核技术同人类创立的其他先进技术一样，有两重性。现在人们有能力保证非常安全地使用核技术，其风险比人们通常习惯的吸烟或开汽车低得多。

随着“和平核活动”的开展，现代社会公众会越来越多地遇到这样或那样的“核”问题：或者使用它解决工作中的疑难，或者享用由它得到的优质产品，或者为了社会和公众的利益对核技术问题进行分析、报道或决策，这都需要对核科学技术有一个基本的了解，知道它的利与弊，进行社会、经济和技术的综合分析，发表见解，作出理智的判断和正确的选择。本教材将为大学生（文、理、工、社会、经济、语言和艺术等）提供这样的能力，增强高科技素质修养。阅读本教材不要求对核科学技术有事先的了解，而只要求读者愿意打开自己思想的边界，愿意追求新知识，愿意对所遇到的“核”问题参与讨论发表意见。

本教材是在1998年讲义的基础上，经过教学实践、听取学生和多名专家的意见和建议后修改而成的。核物理学家胡济民院士生前非常支持在大学生中开设此课程，提出了许多宝贵的意见和建议，为1998年的讲义写了绪论并亲自进行了讲授，受到了学生们高度赞扬。不幸，他于1998年9月病逝。作为纪念，我们仍将胡济民先生为讲义写的绪论作为本书的绪论。书中各章的编写者：刘洪涛（第一章、第四章）、郑春开（第二章）、姚淑德（第三章）、哈鸿飞（第五章）、蔡建新（第六章）和唐任寰（第七章）。

江栋兴教授审校了第一章，王传英教授审校了第二章，赵渭江教授审校了第三章，郭秋菊教授审校了第四章，伊敏教授审校了第五章，金永杰教授审校了第六章，高宏成教授审校了第七章。他们审稿细致、严谨、认真负责，提出了不少有益的意见和建议，对保证本书质量起了积极的作用，编者深表谢忱！

在本教材（包括1998年的讲义）的编写过程中，北京大学卢希庭教授、江栋兴教授、叶沿林教授、高宏成教授和石进元教授；清华大学李全风教授、陈伯显教授，北京师范大学吴瑜光教授，中国核信息研究所吕延晓教授，中国原子能科学院周书华教授，中国农业科学院原子能利用研究所施培新教授，北京辐射防护研究所林莲卿教授等提出了不少宝贵意见和建议；同时，国家有关部门和北京大学也给予了积极的支持。编者在此一并表示衷心的感谢！

由于本书编者学识所限，书中难免有缺点和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2000年10月

目 录

绪论	(1)
第一章 原子核与放射性	(6)
第一节 原子与原子结构	(6)
1.1.1 物质构造——原子的挑战	(6)
1.1.2 原子结构	(7)
第二节 原子核与原子核的基本性质	(8)
1.2.1 原子核的组成	(8)
1.2.2 原子核的基本性质	(10)
1.2.3 核子的夸克模型	(13)
第三节 放射性衰变和衰变规律	(15)
1.3.1 放射性衰变及其表示	(15)
1.3.2 放射性衰变基本类型	(15)
1.3.3 放射性衰变基本规律	(18)
第四节 原子核反应	(19)
1.4.1 核反应概念和基本类型	(19)
1.4.2 核反应举例	(20)
第五节 核辐射通过物质时的作用与效应	(21)
1.5.1 α 射线通过物质	(22)
1.5.2 β 射线通过物质	(24)
1.5.3 γ 射线通过物质	(25)
1.5.4 中子通过物质	(28)
第六节 核辐射的量度及其单位	(28)
1.6.1 放射性活度(A)	(29)
1.6.2 吸收剂量(D)	(29)
1.6.3 剂量当量(H)	(29)
第七节 核科学的基本工具与测量	(31)
1.7.1 人类观测事物的工具	(31)
1.7.2 加速器	(32)
1.7.3 粒子探测器	(35)
1.7.4 放射性的测量	(36)
思考题	(37)
参考书目与文献	(37)
第二章 核能利用与核武器	(39)
第一节 裂变能利用原理与核电站	(39)

2.1.1	原子核裂变及裂变能利用	(39)
2.1.2	裂变链式反应与核反应堆	(42)
2.1.3	核电站与核动力反应堆	(44)
2.1.4	核燃料生产与制造	(46)
2.1.5	核燃料资源的有效利用与快堆核电站	(47)
第二节	聚变能的利用	(48)
2.2.1	聚变反应与聚变能	(48)
2.2.2	实现聚变能利用的条件	(49)
2.2.3	实现受控热核反应的途径	(50)
2.2.4	聚变能利用的前景与展望	(52)
第三节	核电在世界能源中的地位与作用	(53)
2.3.1	人类生存与社会发展正面临能源的严峻挑战	(53)
2.3.2	核能将为人类生存发展提供长期稳定的能源	(53)
2.3.3	核电是一种经济清洁安全的新能源	(54)
2.3.4	核能的多方面应用	(57)
第四节	世界核电发展形势与中国核电发展战略	(60)
2.4.1	世界核电发展形势和前景展望	(60)
2.4.2	我国发展核电战略	(60)
第五节	核武器与美国的“曼哈顿工程”	(62)
2.5.1	核武器的基本原理	(62)
2.5.2	美国的“曼哈顿工程”	(64)
第六节	中国原子弹制造	(69)
2.6.1	战略决策	(69)
2.6.2	铀的挑战	(70)
2.6.3	核燃料生产	(71)
2.6.4	原子弹制造	(73)
2.6.5	罗布泊与第一次核试验	(75)
2.6.6	氢弹制造	(78)
2.6.7	核军备竞赛与全面禁止核试验条约	(80)
	思考题	(82)
	参考书目与文献	(82)
第三章	高灵敏的核分析与核检测	(83)
第一节	核分析——不可替代的现代分析方法	(83)
3.1.1	新型的现代分析技术	(83)
3.1.2	当代科学技术的发展迫切需要核分析核检测技术	(84)
3.1.3	核分析技术的分类及特点	(85)
第二节	几种常用的核分析方法	(86)
3.2.1	中子活化分析	(86)
3.2.2	弹性散射分析	(92)

3.2.3	加速器质谱分析	(96)
3.2.4	带电粒子核反应分析	(99)
3.2.5	X 射线荧光分析	(102)
第三节	现代化工业生产的尖兵——放射性同位素核检测	(105)
3.3.1	极限值指示和料位测量	(106)
3.3.2	厚度测量与密度测量	(108)
3.3.3	水分含量测量和材料成分测定	(109)
3.3.4	核分析核检测在工业和其他领域的综合应用	(110)
	思考题	(110)
	参考书目与文献	(111)
第四章	电离辐射人体效应与安全防护	(112)
第一节	电离辐射对人体的作用	(112)
4.1.1	电离辐射对人体细胞的作用	(112)
4.1.2	生物效应的分类	(113)
4.1.3	低剂量下电离辐射危险性估计	(115)
第二节	人类受到的核辐射照射和水平	(116)
4.2.1	来自天然放射源的照射	(117)
4.2.2	来自人工放射源的照射	(121)
第三节	核辐射防护的原则、剂量限值和评价	(123)
4.3.1	核辐射防护的目的和原则	(124)
4.3.2	核辐射防护剂量当量限值及评价	(124)
第四节	核辐射安全防护方法与剂量监测	(126)
4.4.1	内照射的防护	(126)
4.4.2	外照射特点与防护	(126)
4.4.3	核辐射标志和个人剂量监测	(129)
	思考题	(129)
	参考书目与文献	(129)
第五章	电离辐射技术在工农医中的应用	(131)
第一节	导论	(131)
5.1.1	辐射化学、辐射加工工艺学与核农学	(131)
5.1.2	辐射种类与量度单位	(132)
5.1.3	辐射化学基本过程	(133)
5.1.4	辐射源	(135)
第二节	聚烯烃绝缘材料辐射交联改性	(136)
5.2.1	聚合物的辐射交联与降解	(136)
5.2.2	辐射交联电线电缆	(137)
5.2.3	辐射交联热收缩材料	(140)
5.2.4	辐射交联发泡材料	(142)
第三节	医疗用品的辐射消毒	(142)

5.3.1	概论	(142)
5.3.2	化学消毒法与辐射消毒法	(143)
5.3.3	辐射消毒的生物化学基础	(144)
5.3.4	辐射消毒中的辐射源装置	(145)
4.4	辐射固化	(148)
5.4.1	辐射固化概况	(148)
5.4.2	EB 固化涂料的主要成膜物质	(150)
5.4.3	EB 固化涂料配方原则与实例	(152)
5.4.4	辐射固化的主要化学过程	(154)
5.4.5	EB 固化设备与工艺	(155)
4.5	核农业	(156)
5.5.1	植物辐射诱变育种	(156)
5.5.2	害虫辐射不育技术	(157)
5.5.3	低剂量辐照刺激生物生长	(158)
5.5.4	常用的射线类型和辐照装置	(159)
5.5.5	食品辐照	(159)
4.6	其他应用领域	(166)
5.6.1	工业三废的辐射净化	(167)
5.6.2	橡胶的辐射硫化	(167)
5.6.3	木塑复合材料的辐射制备	(167)
5.6.4	辐射技术在生物医学与生物工程中的应用	(168)
5.6.5	辐射技术在保护和改善古文物中的应用	(168)
	思考题	(168)
	参考书目与文献	(169)
第六章	放射诊断治疗与核医学	(170)
1.1	放射诊断学	(170)
6.1.1	概述	(170)
6.1.2	X 射线透视与摄影技术	(170)
6.1.3	X 射线造影和影像增强技术	(171)
6.1.4	医用 X 射线电视技术	(171)
6.1.5	数字化 X 射线技术	(172)
1.2	X 射线计算机断层成像系统	(172)
6.2.1	XCT 发展概况	(172)
6.2.2	XCT 对 X 射线的测量	(173)
6.2.3	XCT 建像原理和方法	(175)
6.2.4	XCT 扫描系统的结构	(178)
1.3	放射治疗学	(180)
6.3.1	概述	(180)
6.3.2	放射治疗设备	(181)

6.3.3	医用加速器	(183)
6.3.4	立体定向放射治疗	(184)
6.3.5	硼中子俘获癌症治疗(BNCT)	(189)
第四节	核医学概论	(190)
6.4.1	引言	(190)
6.4.2	核医学的发展史和现状	(192)
6.4.3	我国核医学的基本情况	(193)
6.4.4	核医学的必备物质条件	(193)
6.4.5	核医学与国际机构	(195)
第五节	核医学影像设备	(196)
6.5.1	概述	(196)
6.5.2	闪烁 γ 照相机	(197)
6.5.3	单光子发射计算机断层(SPECT)	(198)
6.5.4	正电子发射计算机断层(PET)	(199)
第六节	核医学的临床应用	(201)
6.6.1	概述	(201)
6.6.2	放射免疫分析	(201)
6.6.3	放射性核素显像	(202)
6.6.4	放射性非显像检查法	(203)
6.6.5	核医学诊断应用领域	(203)
6.6.6	放射性核素治疗(治疗核医学)	(204)
	思考题	(205)
	参考书目与文献	(206)
第七章	科学之晨星——核示踪	(207)
第一节	示踪法特性	(207)
7.1.1	示踪法前提	(207)
7.1.2	示踪剂的选择	(208)
第二节	放射性核素在化学中的演示	(209)
7.2.1	化学反应机理	(209)
7.2.2	分析化学方法	(210)
7.2.3	物化性质探原	(211)
第三节	生物科学中的放射性示踪物	(212)
7.3.1	放射性碳示踪光合作用	(212)
7.3.2	体内物质运输	(213)
7.3.3	蛋白质生物合成	(214)
7.3.4	核糖核酸结构读解	(214)
第四节	当代疑难病的解药——核药物	(217)
7.4.1	核药物分类	(217)
7.4.2	医用放射性核素来源	(218)

7.4.3	母牛——放射性核素发生器	(220)
7.4.4	首选 ⁹⁹ Tc ^m 放射性药物.....	(221)
7.4.5	放射性碘药物	(223)
7.4.6	其他放射性药物	(223)
7.4.7	放射免疫分析及药盒	(224)
7.4.8	正电子发射短寿命核药物	(225)
第五节	放射性标记化合物.....	(226)
7.5.1	制备要求	(226)
7.5.2	化学合成标记	(227)
7.5.3	生物合成标记	(228)
7.5.4	同位素交换标记	(229)
7.5.5	单克隆抗体标记	(229)
第六节	核示踪评估.....	(230)
7.6.1	标记化合物的质量控制	(230)
7.6.2	放射性药物的性能评价	(231)
7.6.3	核示踪的锋芒	(232)
	思考题.....	(234)
	课外参考读物.....	(234)

绪 论

开这门课的目的是要向同学们介绍核科学技术以及它和人们生存发展的关系。我们都面临着 21 世纪,你们将是跨世纪的人才。在下世纪各科技部门必定会更迅速地发展,各民族、各国家和各跨国集团之间,既有密切的合作交流,也会发生激烈的竞争。这是一个机遇和挑战,发展与危机相互交织的世纪,科学不发展,或者发展得较慢,就无法在这个世界上立足,也无法应付在生存发展中遇到的难题,所以我们党和政府提出了科教兴国的战略方针。科教兴国,并不仅仅是科学界和教育界的事,而是全民共同奋斗的纲领。大家都要关心科教事业,都要用科学精神和科学方法来办事,都要在自己的事业中充分利用现代科学技术的最新成就。作为大学生,就更有必要了解当代科学技术的主要成就,而核科学就是其中一个重要的方面,这也就是我们开这门介绍核科学的选修课的目的。

核科学和人类的生存与发展有着十分密切的关系。为了说明核科学在下一世纪面临的前景和将起的作用,不妨回顾一下核科学在本世纪的发展和所起的作用。这是一个很长的故事,这里不能详述。各式各样核技术有趣的应用,将在本课程以后的章节中详细介绍,也用不着在这里多说。在这里,编著者想做的是通过核科学技术发展的轮廓来说明,我们如何从核科学的基础研究发现了核技术的重要应用,又通过这些应用,推进和发展了基础研究。

I 放射性和原子核

在 19 世纪,人们根本不知道原子核,当然也没有核科学。1896 年贝可勒尔偶然地发现了含铀的矿物晶体能使用纸包着的照相底片感光。作为一个高明的科学家,他通过仔细实验来研究这一新的现象。他发现,只有含铀的物体,才能发出这种具有穿透能力的射线,这种射线有一部分能为磁场偏转,不是 X 射线,他称这种射线为放射性射线。元素铀能发射放射性射线,被称为放射性元素。这种发射放射性射线的性质称为放射性,人们把放射性的发现看成是核科学的开端,这是因为它它是人们认识的第一个核性质,也因为此后关于原子核的基础研究和核技术的应用大都和放射性有关。

难道只有铀具有放射性吗?很快,居里夫妇就发现铀矿渣甚至具有比铀更强的放射性。这当然不是铀的放射性。对矿渣的一般分析表明,当时已知的元素除铀外都没有放射性,可见这种强的放射性属于一种或几种含量极微的新元素。当时的化学方法不能分析出来,因此迟迟未能发现,他们利用这些元素的放射性,用一种全新的化学方法才把这些微量的化学元素分离出来,他们的工作不但发现了镭和钋两种新的放射性元素,还开创了放射化学这门新的学科,发展了放化分析分离的技术,在此后核科学的发展和核技术的应用中起了关键性的作用。

放射性的发现以及居里夫妇等人的研究工作引起了人们广泛的兴趣,卢瑟福等人对此作出了突出的贡献。他们的工作进一步确立了放射性射线发自原子内部,而且通过发射射线,一元素会转变为另一元素,他们从实验上确立了这种变化的规律,这是人们第一次从实验上确立了元素变化的规律。他们还用实验证明了放射线中带正电的成分(称为 α 射线,形成射线的粒

子称为 α 粒子)为带两个正电荷(以电子的电荷为电荷单位)的氦离子。

卢瑟福和他的学生们的另一项重大贡献是用 α 粒子来研究原子结构。他们用 α 粒子轰击金属薄膜,来观测穿过膜后粒子飞行方向的分布。他们发现除了大部分偏折较小以外,有少量 α 粒子在穿过薄膜受到很大的偏折。根据理论分析,只有假设原子的质量和正电荷都集中在原子中央很小的区域内才能解释这种大角度的偏折。如认为这电荷和质量集中的区域的半径小于 10^{-14} 米,那么理论计算的偏折角度分布可与实验结果相符。这电荷和质量集中的区域就是原子核,而电子则绕核飞行,这就是有名的卢瑟福原子模型。应该指出,根据当时通行的经典力学和电动力学,这种电子轨道是不稳定的,在其上飞行的电子一定会不断发射电磁波而跌落到核中去。如果不是有强有力的实验证据,这种模型是很难为当时的物理学家们接受的。这一发现,不但为原子物理和核物理奠定了基础,而且是新的力学,量子力学的催生婆。只有量子力学才能解释上述电子轨道运动和电磁辐射的矛盾。

卢瑟福等人的工作还开创了一条用射线束来研究物质结构的途径。这一方法对核物理的基础研究和核技术的应用都起了很大作用。即使在核科学发展的初期,这方法也起了很大的作用,除前面已经提到的原子核模型的建立(1911年),还在1919年用 α 粒子轰击氮,打出了质子,首次实现了人工核反应。用 α 粒子轰击铍,又在1932年导致中子的发现。在1934年用 α 粒子轰击铝,首次合成了人工放射性元素磷,在核科学中,这些都是里程碑式的成就。

从1896到1934年可看成核科学发展的以放射性为主的第一阶段,在这一阶段中我们发现和研究了放射性,并利用放射性射线研究了原子的结构,发现了原子核、中子和人工核反应及人工放射性元素。在实验技术方面初步建立了射线探测技术和放射化学技术。应该指出,即使在核科学发展的第一阶段,它的应用已受到人们广泛的注意,这主要是镭和钋的放射性在医疗方面的应用,居里夫人和约里奥居里夫妇就是因为在放射化学和医学上的贡献而被选为法国医学科学院院士的,居里夫人所创建的镭学研究所,也一直把医学研究作为一项主要研究方向。早在人们实现了首例人工核反应时,就有人推测核反应所释放的能量也许可以利用。此后不久,在1938年,贝特推测太阳就是靠核能而不断释放能量的。

II 中子核反应 裂变和核能

中子不带电,进入原子核时不会受到电力的排斥,因此更容易引起核反应。另一方面,中子源也比较容易获得,例如用镭或钋和铍粉,就可以做成流强较大的中子源。就在1934年,在人工放射性发现后不久,费米和他的同事们就开始研究中子引起的核反应,他们用中子来轰击从轻到重各种元素制成的靶,在短短几个月中,就获得了60多种新的人工放射性元素,在这些实验中,他们都能用化学方法确定所获得的是什么元素。但是当他们用中子去轰击铀和钍的靶时,得到了很复杂的结果,他们获得了多种放射性。考虑到铀和钍是当时所知最重的元素,本身也有放射性,出现一些较复杂的情况,并不奇怪。当时并且推测,铀原子核电荷数为92(即带有92个正电荷),是已知元素中电荷数最大的元素。如果铀吸收中子,经过放射一个电子(称为 β 衰变)就会成为93号元素,发射两个电子,甚至会形成94号元素,这些不仅是新的放射性元素,而且是在自然界不存在的超铀元素,这种可能性引起了很多研究者,特别是化学家的兴趣,得出了各种不同的结果和疑问,这种状况一直持续到1938年。显然,如果不把反应产物分离出来,并进行严格的化学鉴定,这问题是无法解决的。最后,哈恩和斯特拉斯曼终于证明了反应产

物中有和钡及镭性质相似的放射性元素。如果在重元素中找化学性质与钡和镭相似的元素,那就是镭和钋。但是镭比钍的核电荷数要小4,钍在吸收中子后要放出两个 α 粒子,才会变成镭,这样的反应很不容易发生,因此有人怀疑这种解释。1939年他们经过一系列繁复的化学实验,证明了这种被当成镭的产物其化学性质和钡十分相似,这种放射性元素不是镭就是钡,只有这两种可能。为了最终确定是镭还是钡,他们进行了能区别这两者的镭钡分离实验,出乎研究者的预料,新的放射性竟然和钡出现在一起,从而证明了,中子轰击钍产生的一种放射性元素竟然是钡,其质量只比钍的一半略多一些!实验事实迫使他们不得不作出结论,钍在吸收中子后,有可能分裂为两个大小相当的碎片,这种分裂过程被称为裂变,同年迈特纳和弗里施建议用带电液滴分裂来解释裂变现象,弗里施并用实验证明了,由于电排斥作用,两碎块共具有动能约两亿电子伏的能量(电子伏为能量单位,电子经一伏电压差所得能量为1电子伏)。也在同一年,玻尔和惠勒用原子核的液滴模型和统计理论,系统地研究了原子核的裂变过程,奠定了裂变的理论基础。

前面已指出,自从发现了核反应,人们就想到利用核能。但是大规模地引起核反应,释放核能,只是在星体中才能实现,实验室中很难做到。而一次裂变,释放的能量比通常的核反应大得多,而且同时又会放出两个以上的中子,在适当的条件下,这些中子中的一部分又可能引起裂变,形成所谓链式反应。这种反应如不加约束,就会愈演愈烈,发生爆炸,即原子弹。如果对链式反应加以控制,就可以使反应在一定速率下进行,有控制地释放能量,而形成原子锅炉,即反应堆。反应堆的能量可用来发电,供暖,或作其他应用,这就是核能的和平利用。

核能的利用,开辟了一个取之不尽的新能源,是核科学对人类社会最重要的贡献,将在以后的章节中详细介绍。这里要着重指出的是以下几点:(1)这项发现是从纯基础研究开始的,如果不是孜孜不倦的科学精神,关于钍钍等少数元素吸收中子后的例外行为,原也可以放着不管的。然而就是这些看来并不重要的复杂现象,导致了一项重大的发现和重要的应用。(2)从1939年裂变发现到1945年做成第一颗原子弹,并在此前做成了反应堆,前后不到六年。在这样短时间里完成这样大规模的从科研到生产的转换,也是史无前例的,它象征着我们已进入了一个科研和应用更加紧密联系的时代。(3)核能的利用是一项紧密依赖于理论计算和科学实验,科学家和技术人员相互协作的大型科学工程。在本世纪的下半个世纪,人们愈来愈频繁地遇到了这一类的大科学工程,其中很多与核科学有关。

III 核物理研究的进展

核能的利用使核科学受到极大的重视。一方面,核能的有效利用,需要大量有关原子核的数据,特别是有关中子和核相互作用的数据。这些数据的精确测定或计算都和基础理论研究有密切的关系。另一方面原子核本身是物质结构的一个层次。研究这一层次,本身就有重大的科学意义。研究原子核,一般仍沿用以射线束轰击原子核的办法。作为探针,需用不同能量,不同种类、不同强度的射线束。单用放射性源不能满足实验的要求。早在30年代,人们已经发明了几种能加速质子(氢原子的原子核)或 α 粒子到几个兆电子伏的加速器。在50年代以后,由于研究和应用的需要,加速器得到迅速的发展,能量达到几十个兆电子伏的加速器已发展成商品生产。使用加速器,人们已能提供进行核物理研究和核技术应用所需的各种稳定的射线束和少量放射性束,到下世纪初,我们将会得到更多种的放射性束。在射线探测方面也取得了很大的

进展,找到了能精确测定能量的固体探测器。特别是计算技术的发展,使我们能轻易地一次获取几十种数据并进行复杂的处理,可以更准确地研究复杂的核过程。顺便指出,在核科学发展初期,要计数每秒成千上万次的射线粒子是很困难的;只能记录累计的效应,后来发明了一种二进位的计数器,才能用电子仪器把每秒粒子数记录下来。这种进位器在北京大学技术物理系刚开办时,还是一项主要的实验设备,而它正是后来电子计算机的雏形。

利用这些设备,我们对原子核的认识已有很大的进展。天然和人工合成的核素已达两千个,其中 1500 多个已测定了质量和寿命。我们已经对核内粒子间的相互作用和运动方式有了基本了解。对核的密度分布,各种反应和衰变机制也有了可靠的模型。然而必须指出,我们对原子核的认识还停留在模型阶段,有不少基本理论问题,还有待于澄清。比起原子和分子来,我们对原子核这一层次的认识还有相当大的差距。从应用的角度看,虽然核能和核技术的应用方面已取得很大的进展,但推广应用的余地依然很大,要解决的问题还很多,这里难以详述。

IV 粒子物理学的发展

在 1936 年前,我们确切知道,组成物质的粒子只有三种:中子、质子和电子。在 1936 年,人们首先在宇宙射线中发现了 μ 子(当时称为 μ 介子)。在二次大战后,50 年代前后,又陆续在宇宙线中发现了 π 介子, K 介子, Δ^0 、 $\Sigma^{\pm 0}$ 和 Ξ^- 超子。宇宙射线是一种在星际空间飞向地球的高能粒子,其确切的来源尚不清楚。既然从这些高能粒子中发现了这些寿命较短的粒子,那么在实验室中用高能加速器,一定也会产生这些新粒子,并进行较详细的研究。概括地说,这些研究发现的粒子可分为三类,一类是与质子和中子相似的重子(除质子和中子外均可称为超子),超子可以和质子及中子共同组成超核(即含超子的原子核),一类是介子,一类是轻子(电子、中微子, μ 子, μ 中微子, τ 子和 τ 中微子),重子和介子统称为强子,它们之间存在着强相互作用,并且有很多共振态(即激发态),轻子间没有强相互作用,而弱作用则普遍存在于各种粒子之间,荷电粒子之间则都有电磁相互作用。用高能粒子轰击强子,发现强子是有内部结构的,根据适用于强作用的量子色动力学和对称性的要求,可以推测所有强子都是由六种夸克组成的,重子由三夸克组成,而介子均由两夸克组成。根据量子色动力学,夸克之间通过胶子场相互作用,这样一来,追本穷源,复杂的强子系统又可归结为六种夸克,虽然有些实验支持这种模型,但是自由夸克始终未发现,而且理论还预言有一种禁闭势,阻止自由夸克的出现。但是理论也预言当体系在极小的空间内集中了很大的能量,则可能出现所谓夸克胶子等离子体,即不分强子界限的夸克和胶子的混合体。人们正在努力建造更高能量的加速器来检验这一预测。

V 核科学的各科技部门

几十年来,由于基础研究的需要和核能及核技术应用的发展,核科学已发展成为一个多学科的综合性的科技领域。这里只能罗列一些学科的名称,做一些最简略的解释。除了上面已经提到的核物理和粒子物理外,核科学还可以包括如下的内容。

(1) 放射化学 上面已经提到过,这是核物理的姊妹科学,对于研究原子核起了重要的作用,在核能利用方面,它是核燃料的制备以及使用过的燃料的后处理的主要技术。在同位素应用方面,它是同位素制备的必要技术,同位素示踪在各方面有广泛的应用,也是放射化学的用

武之地。

(2) 辐射化学 这也是一门具有广泛应用的核科学,它研究高能电磁辐射对物质的影响,将在第五章作详细的介绍。

(3) 反应堆物理及技术 本学科研究如何安全有效地利用核能,处理核废料,以及设计建造有特殊用途的反应堆,如高中子通量的反应堆等。

(4) 等离子体物理及聚变能的利用 处于极高温(例如几百万度)下的物质,都处于电离状态,为了保持电中性,正离子在单位体积内所带的正电荷,应该和负离子及电子所带的总的负电荷相等。这样的物质处于等离子体态。当轻核要发生聚变释放聚变能时,物质一定是处在等离子体态,因此等离子体研究是应用聚变能的前提条件。此外,等离子体也还有不少其他的应用。

(5) 加速器物理与技术 加速器的功能是利用电磁场加速荷电粒子,形成所要求的射线束。加速器在基础研究所起的作用在前面已经简略地提到,这里要指出的是加速器,特别是高能加速器或对撞机,已发展为高度精密大型的科学与工程;其次是为了某种应用,如生产同位素而建造的加速器已发展成高效率的工业生产装置;最后应该指出,为了应用而设计建造的大型加速器,如同步辐射装置,也越来越受到人们的重视。

(6) 核辐射剂量与防护 最后还应指出,核辐射如超过一定的剂量,对人体是有害的,这也造成了一些人的恐核心理,反对应用核能或核技术,当然对核能及核技术应用进行严格的剂量监测和采取充分的防护措施这是完全必要的。正因为这样,辐射的剂量与防护成为一门重要的分支学科,对有效的防护与监测手段进行深入的研究。在这些条件下,核事故和超剂量辐照的危险实际上比别的事实的危险小得多。

VI 各交叉学科

(1) 核天体物理学 天体演化是自然科学三大问题之一(其他两个问题是生命起源和物质结构)。处于高温下的天体内部是核过程进行的良好环境,同时核过程也是促使天体演化的必要因素。人们还可以通过对天体的辐射(如中微子流)和自然界同位素丰度的观测,获得关于天体中核过程的信息。由于天体中的条件和实验室提供的条件差别很大,因此核天体物理学也是一门较难的研究学科。它更多地依赖于可靠的理论分析与外推。

(2) 核固体物理与核材料科学 它研究射线束与固体表面及晶格的作用,研究射线应用于结构分析,离子注入以及材料分析等方面。

(3) 核生物学 它研究射线的生物效应以及应用射线研究生物大分子的结构等。在核农学方面的应用有放射性育种,射线除虫等,在核医学方面应用射线及同位素作为诊断及治疗的手段。

此外,核科学在地质、探矿、考古等方面也有不少的应用。由于核科学所需要的理论基础比较深,应用又很广泛。在这门短短的课程中,我们只能选一些比较长见的应用,做一些简单的介绍,大的科学与工程,虽然引人入胜,确不是短短的课程所能涉及的。

第一章 原子核与放射性

第一节 原子与原子结构

1.1.1 物质构造——原子的挑战

古时候人们就发出疑问：世界上的万物是由什么组成的？古希腊人德谟克利特（约公元前460~370年）思辨性地给出了回答：万物是由最小的、不可分割的、不可改变的粒子所组成，这种粒子被称做原子（atom 来源于希腊文 $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$ ，原意为“不可分割”）；无限数目的原子在运动中，相互碰撞造成原子的结合和分离而生成万物，因此，构成万物的基础是原子。这是最早的古代原子论。后来由于亚里士多德（公元前384~322年）等人的反对和他们物质无限可分学说的影响，德谟克利特等人的原子论思想沉睡了两千多年，经过欧洲文艺复兴时代以及后来的物理与化学元素学说的发展，到19世纪初叶，英国化学家道尔顿（1766~1844年）等才把德谟克利特思辨性原子论学说发展成定量的化学原子论：元素是构成物质的模块，元素模块的基本单元是看不见的微小粒子——原子，原子像是一个坚实的小硬球^[1]，如图1.1.1(a)所示，不能创造，不能消灭，不能再分割。同一种元素的所有原子，其形状、质量和性质都是相同的；而不同元素的原子，在形状、质量及性质上是各不相同的。原子量是元素的基本特征；在化学反应中，原子是保持元素化学性质的基本个体，不同元素的原子以不同数目的比例相结合形成各种化合物。这里原子被认为是“基本粒子”，几十种元素的原子构成了现实生活的物质世界。这样的认识解释了当时化学和热学上的许多现象，例如，质量守恒、当量守恒、定量组成和倍比定律等，人们感到相当满意。但是到了19世纪末期，对原子的这种认识遇到了强烈的挑战：1895年德国科学家伦琴发现X射线，1896年法国科学家贝克勒尔发现了铀元素化合物发射出神秘的射线，1897年英国科学家汤姆逊发现阴极射线实际上是从物质原子中出来的带负电的电子；这些发现动摇了人们对原子不可分的传统认识，意识到原子不再是不可分的粒子，而可能存在于某种结构。由此，人们对这一问题开始了新的思考和探索。

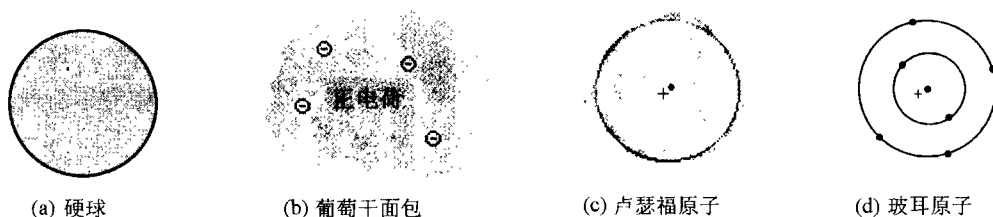


图 1.1.1 原子结构模型的发展和比较