



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定



国家卫生和计划生育委员会“十二五”规划教材
全国高等医药教材建设研究会“十二五”规划教材
全国高职高专院校教材

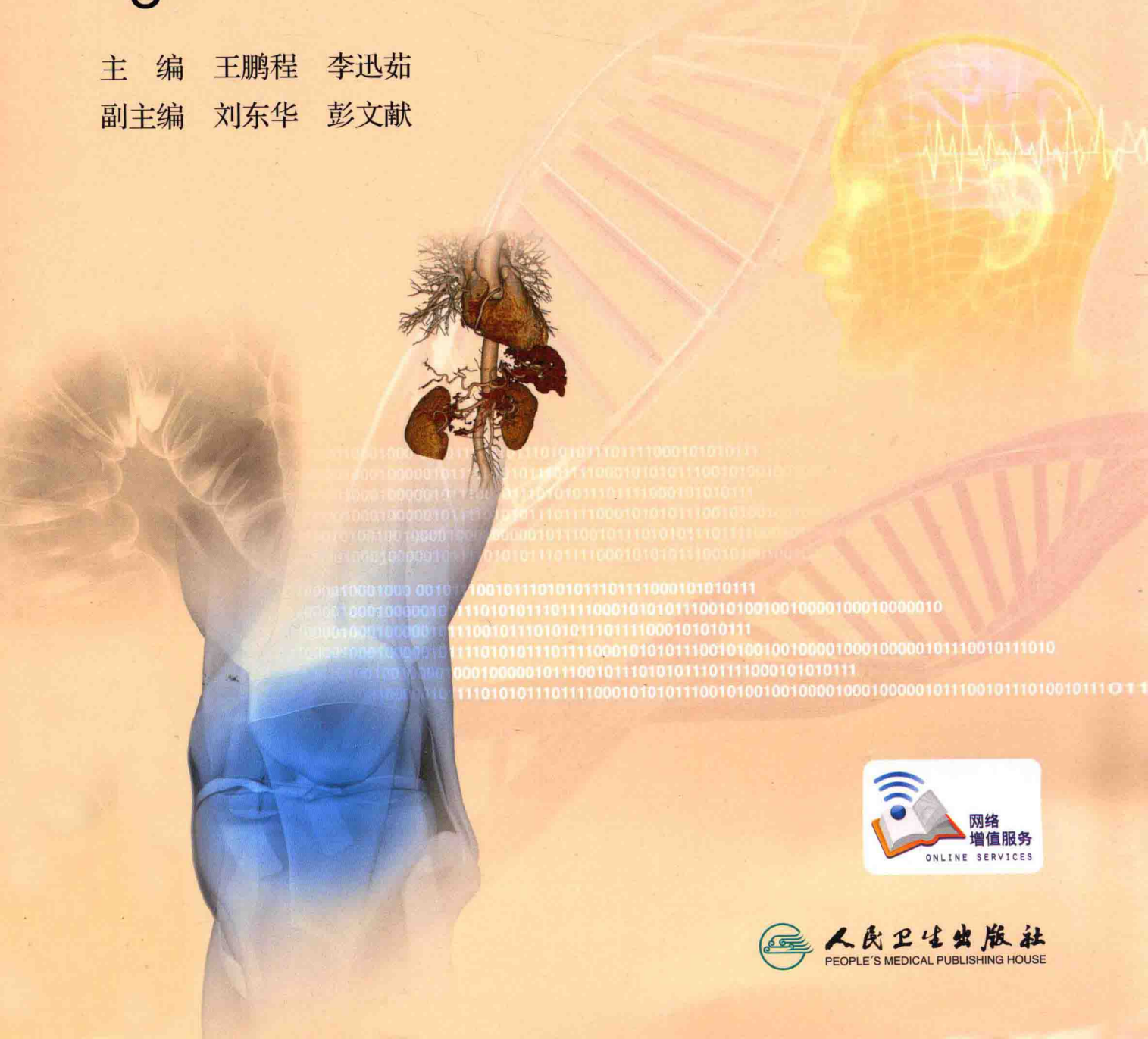
供医学影像技术专业用

放射物理与防护

第3版

主 编 王鹏程 李迅茹

副主编 刘东华 彭文献



人民卫生出版社
PEOPLE'S MEDICAL PUBLISHING HOUSE



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定



国家卫生和计划生育委员会“十二五”规划教材
全国高等医药教材建设研究会“十二五”规划教材
全国高职高专院校教材

供医学影像技术专业用

放射物理 与防护

第3版

主 编 王鹏程 李迅茹

副 主 编 刘东华 彭文献

编 者 (以姓氏笔画为序)

王文红 (天津市人民医院)

王鹏程 (泰山医学院)

刘东华 (新乡医学院)

李 伟 (山东医学高等专科学校)

李迅茹 (北京卫生职业学院)

侯立霞 (泰山医学院)

彭文献 (浙江医学高等专科学校)

人民卫生出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

放射物理与防护 / 王鹏程, 李迅茹主编. —3 版.
—北京: 人民卫生出版社, 2014

ISBN 978-7-117-18839-5

I. ①放… II. ①王…②李… III. ①放射医学 - 物理学 - 高等职业教育 - 教材②放射医学 - 辐射防护 - 高等职业教育 - 教材 IV. ① R811.1 ② R14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 066157 号

人卫社官网	www.pmph.com	出版物查询, 在线购书
人卫医学网	www.ipmph.com	医学考试辅导, 医学数据库服务, 医学教育资源, 大众健康资讯

版权所有, 侵权必究!

放射物理与防护

第 3 版

主 编: 王鹏程 李迅茹

出版发行: 人民卫生出版社 (中继线 010-59780011)

地 址: 北京市朝阳区潘家园南里 19 号

邮 编: 100021

E - mail: pmph@pmph.com

购书热线: 010-59787592 010-59787584 010-65264830

印 刷: 尚艺印装有限公司

经 销: 新华书店

开 本: 850 × 1168 1/16 印张: 11

字 数: 303 千字

版 次: 2002 年 8 月第 1 版 2014 年 7 月第 3 版

2014 年 10 月第 3 版第 2 次印刷 (总第 15 次印刷)

标准书号: ISBN 978-7-117-18839-5/R · 18840

定 价: 25.00 元

打击盗版举报电话: 010-59787491 E-mail: WQ@pmph.com

(凡属印装质量问题请与本社市场营销中心联系退换)

出版说明

为了认真贯彻落实十八届三中全会“加快现代职业教育体系建设,深化产教融合、校企合作,培养高素质劳动者和技能型人才”,和国务院常务会议关于“发展职业教育是促进转方式、调结构和民生改善的战略举措”精神,全国高等医药教材建设研究会和人民卫生出版社在教育部、国家卫生和计划生育委员会的领导和支持下,成立了新一届全国高职高专医学影像技术专业教育教材建设评审委员会,并启动了全国高职高专医学影像技术专业第三轮规划教材修订工作。

按照《医药卫生中长期人才发展规划(2011—2020年)》、《教育部关于“十二五”职业教育教材建设的若干意见》等文件精神,随着我国医药卫生事业和卫生职业教育事业的快速发展,高职高专医学学生的培养目标、方法和内容有了新的变化,教材编写也要不断改革、创新,健全课程体系、完善课程结构、优化教材门类,进一步提高教材的思想性、科学性、先进性、启发性、适用性。为此,第三轮教材修订紧紧围绕高职高专医学影像技术专业培养目标,突出专业特色,注重整体优化,以“三基”为基础强调技能培养,以“五性”为重点突出适用性,以岗位为导向、以就业为目标、以技能为核心、以服务为宗旨,力图充分体现职业教育特色,进一步打造我国高职高专医学影像技术专业精品教材,推动专业发展。

全国高职高专医学影像技术专业卫生部规划教材第一轮共8种于2002年8月出版,第二轮教材共10种于2010年9月出版,均为教育部、卫生部国家级规划教材。第三轮教材是在上一轮教材使用基础上,经过认真调研、论证,结合高职高专的教学特点进行修订的。第三轮教材修订坚持传承与创新的统一,坚持教材立体化建设发展方向,突出实用性,力求体现高职高专教育特色。在坚持教育部职业教育“五个对接”基础上,教材编写进一步突出医学影像技术专业教育和医学教育的“五个对接”:和人对接,体现以人为本;和社会对接;和临床过程对接,实现“早临床、多临床、反复临床”;和先进技术和手段对接;和行业准入对接。注重提高学生的职业素养和实际工作能力,使学生毕业后能独立、正确处理与专业相关的临床常见问题。

在全国卫生职业教育教学指导委员会、全国高等医药教材建设研究会和全国高职高专医学影像技术专业教育教材建设评审委员会的组织和指导下,对第三轮教材内容反复修改,对体例形式也进行统一规范,并设置了学习目标、本章小结、思考题等模块,同时鼓励各教材结合自身内容特点在正文中以插入文本框的形式增设一定篇幅的拓展内容,如“知识拓展”、“课堂互动”、“案例分析”等,以便于教师开展形式多样的教学活动,拓宽学生视野,提升教学效果。为了帮助学生有效掌握课本知识,熟练操作技能,增强学习效果,适应各级各类考试,本轮教材配套了实训与学习指导。此外,本轮教材还配套了网络增值服务内容,在人卫医学网教育频道(edu.ipmph.com)平台上,大量难以在纸质教材中表现出来的内容围绕教材形成便捷的在线数字化资源教学包,为教师提供教学素材支撑,为学生提供学习资源服务。

本轮修订全国高职高专医学影像技术专业规划教材共11种,其中新增《医学影像解剖学》。全部为国家卫生和计划生育委员会“十二五”国家规划教材,5种为教育部“十二五”职业教育国家规划教材,将于2014年6月陆续出版。

教材目录

序号	教材名称	版次	主编	配套教材
1	影像电子学基础	3	鲁雯 曹家龙	√
2	放射物理与防护*	3	王鹏程 李迅茹	
3	医学影像解剖学	1	刘秀平 赵江民	√
4	医学影像成像原理*	3	张晓康 张卫萍	√
5	医学影像设备学	3	黄祥国 李燕	√
6	医学影像检查技术*	3	李萌 樊先茂	√
7	医学影像诊断学*	3	夏瑞明 刘林祥	√
8	超声诊断学	2	周进祝 李彩娟	√
9	介入放射学基础	2	卢川 杜耀明	√
10	核医学	2	王辉	√
11	放射治疗技术*	3	姚原	√

注:*者为教育部“十二五”职业教育国家规划教材

全国高职高专医学影像技术专业教育教材建设 评审委员会名单

主任委员 周进祝 李 萌
副主任委员 赵汉英 吕国荣 王鸣鹏 石明国 余建明
秘书长 窦天舒
委 员 (按姓氏汉语拼音排序)
樊先茂 李迅茹 路 阳 唐陶富 徐秀芳
薛敏娜 殷国生 张卫萍 张晓康 张雪君
秘 书 裴中惠

网络增值服务（数字配套教材）编者名单

主 编 侯丽霞 李迅茹

副主编 刘东华 彭文献

编 者（以姓氏笔画为序）

王文红（天津市人民医院）

王鹏程（泰山医学院）

刘东华（新乡医学院）

李 伟（山东医学高等专科学校）

李迅茹（北京卫生职业学院）

侯丽霞（泰山医学院）

彭文献（浙江医学高等专科学校）

《放射物理与防护》是医学影像技术专业的专业基础课之一,其教学任务是为后续专业课程及继续教育奠定必要的知识基础。教材内容涉及放射物理学基础、辐射剂量学基础以及放射防护的基本标准与知识。

《放射物理与防护》首轮教材由原卫生部教材办公室规划,2002年首版教材出版,2009年第2版出版发行。由于该教材内容充实,体例编排适合高职高专学生教学与学习,被确定为教育部普通高等教育“十一五”国家级规划教材,同时该教材成为国家卫生和计划生育委员会大型设备操作技能考核及职称晋升考试的重要参考书。近年来,国内医学影像技术职业教育发展迅速,越来越多的高职高专院校采用了本教材,在充分调研及征求各校老师对教材使用建议的基础上,编者对本教材进行了第三轮修订。

1. 根据医学影像技术发展对放射物理与防护专业基础知识的要求,特别是考虑到高等职业技术教育的特点,对教材编写体例进行了修改,文中增加了“知识拓展”等内容,便于学生拓展专业视野,更好地掌握专业技能。

2. 对近年来国家新近颁布的有关放射防护标准、法规,以及国际相关机构发表的关于医疗照射的辐射防护概念进行了更新。

3. 考虑到职业教育特点,删除了部分理论性较强的教学内容,增加了部分图表,使教材的易教、易学性更加突出。

本教材建议教学 54 学时,理论授课 44 学时,实验教学 10 学时。

在修订过程中,我们采纳了多数院校同行对教材的意见与建议,但是由于编者水平所限,书中难免存在缺点与不足,恳请使用本教材的师生及阅读本书的同行提出宝贵意见,以便下次修订、完善。

王鹏程 李迅茹

2014年2月

目 录

第一章 物质的结构	1
第一节 原子结构	1
一、揭示原子结构的实验基础	1
二、玻尔的原子模型	3
三、原子核外的电子结构	7
第二节 原子核结构	8
一、原子核组成	8
二、原子核结合能	9
三、原子核能级	10
四、原子核自旋与核磁矩	10
第三节 磁共振	11
一、核磁矩在静磁场中的进动	11
二、磁共振现象	12
三、核自旋弛豫	14
第四节 磁共振现象的医学应用	15
一、磁共振波谱分析技术	15
二、磁共振成像技术	15
第二章 核转变	17
第一节 放射性核素衰变类型	17
一、 α 衰变	17
二、 β 衰变	18
三、 γ 衰变和内转换	19
第二节 原子核的衰变规律	19
一、衰变规律	19
二、衰变平衡	21
第三节 医用放射性核素的生产与制备	23
一、放射治疗常用放射性核素及其生产	23
二、核医学常用放射性核素及其生产	24
第四节 放射性核素的临床应用	25
一、放射性核素在肿瘤放射治疗中的应用	25
二、放射性核素在核医学检查中的应用	26
第三章 X射线的产生	28
第一节 X射线的发现及用途	28
一、X射线的发现过程	28
二、X射线的用途	29

第二节	X射线的本质与特性	29
一、	X射线的本质	29
二、	X射线的基本特性	30
第三节	X射线的产生条件与装置	31
一、	X射线的产生条件	31
二、	X射线的发生装置	31
第四节	X射线的产生原理	32
一、	电子与物质的相互作用	32
二、	两种X射线的产生原理	33
第五节	X射线的量与质	38
一、	概念及其表示方法	38
二、	影响X射线量与质的因素	39
第六节	X射线的产生效率	40
第七节	X射线强度的空间分布	41
第四章	X(或γ)射线与物质的相互作用	45
第一节	概述	45
一、	X射线与物质相互作用的几率	46
二、	射线的衰减	46
三、	能量转移和吸收	47
第二节	X射线与物质相互作用的主要过程	48
一、	光电效应	48
二、	康普顿效应	50
三、	电子对效应	53
第三节	X射线与物质相互作用的其他过程	54
一、	相干散射	54
二、	光核作用	55
第四节	各种作用发生的相对几率	55
一、	X射线引发效应总结	55
二、	Z 和 $h\nu$ 与三种基本作用的关系	55
三、	在诊断放射学中各种基本作用发生的相对几率	56
第五章	X(或γ)射线在物质中的衰减	57
第一节	单能X射线在物质中的衰减规律	57
一、	窄束X射线在物质中的衰减规律	57
二、	宽束X射线在物质中的衰减规律	59
第二节	连续X射线在物质中的衰减规律	60
一、	连续X射线在物质中的衰减特点	60
二、	影响X射线衰减的因素	61
三、	X射线的过滤	62
第三节	医学放射学中X射线的衰减	64
一、	人体的构成元素和组织密度	64
二、	X射线通过人体的衰减规律	65

第四节	X射线的临床应用	66
一、	常规 X 射线摄影技术	66
二、	介入放射技术	67
三、	计算机断层成像技术	68
四、	利用 X 射线的肿瘤放射治疗技术	68
第六章	常用的辐射量和单位	70
第一节	描述电离辐射的常用辐射量和单位	70
一、	描述辐射场性质的量	70
二、	照射量	72
三、	比释动能	73
四、	吸收剂量	73
五、	吸收剂量、比释动能及照射量之间的关系和区别	74
第二节	辐射防护中使用的辐射量和单位	77
一、	当量剂量	77
二、	有效剂量	78
三、	集体当量剂量和集体有效剂量	80
四、	待积当量剂量和待积有效剂量	81
第七章	放射线的测量	83
第一节	照射量的测量	83
一、	自由空气电离室	83
二、	实用型电离室	84
三、	电离电荷测量电流	85
第二节	吸收剂量的测量	86
一、	吸收剂量的基本测量法	86
二、	电离室测量法	87
三、	吸收剂量的其他测量方法	90
第三节	射线质的测定	91
一、	400kV 以下 X 射线质的测定	91
二、	高能 X 射线能量的测定	92
三、	高能电子束能量的测定	92
第四节	医用诊断 X 射线检查技术的辐射剂量学评价	92
第八章	放射治疗剂量学	96
第一节	放射治疗剂量学基本概念	96
一、	放射治疗常用的放射源及照射方式	96
二、	放射治疗物理学有关的名词	97
三、	射线中心轴上百分深度剂量	98
四、	射线中心轴上组织空气比	100
五、	组织最大剂量比	101
第二节	放射治疗剂量计算实例	102
第三节	近距离放射治疗剂量学	103

一、辐射源	103
二、放射源周围的剂量分布	104
三、腔内治疗剂量学	105
四、组织间治疗剂量学	106
第九章 放射线对人体的影响	108
第一节 放射线的生物学效应	108
一、放射生物学基础	108
二、辐射生物效应分类	110
三、胎儿出生前受照效应	114
四、皮肤效应	115
第二节 影响放射损伤的因素	116
一、与电离辐射有关的因素	116
二、与机体有关的因素	117
三、环境因素	118
第十章 放射防护法规与标准	119
第一节 放射防护法规	119
第二节 放射防护标准	120
一、标准的概念	120
二、放射防护基本标准的制定	121
第三节 放射防护标准介绍	121
一、ICRP 1990 年建议书内容介绍	121
二、我国放射防护基本标准的主要内容	124
第四节 放射防护标准与法规的贯彻实施	127
一、放射工作单位自主管理	127
二、卫生行政部门监督管理	128
第十一章 放射线的屏蔽防护	130
第一节 外照射防护的基本方法	130
一、时间防护	130
二、距离防护	130
三、屏蔽防护	130
第二节 射线屏蔽材料	131
一、对屏蔽材料的要求	131
二、常用屏蔽防护材料	131
第三节 射线屏蔽厚度的确定方法	133
一、确定屏蔽厚度的依据	133
二、屏蔽厚度的计算	134
第十二章 医疗照射的辐射防护	140
第一节 医用诊断 X 射线的防护	140
一、防护原则	140

二、诊断 X 射线机防护性能的要求	140
三、X 射线计算机断层摄影(CT 机)放射防护要求	141
四、放射防护设施	141
五、医用 X 射线诊断防护安全操作要求	142
六、CT 操作中的防护要求	143
七、妇女 X 射线检查的防护	144
八、儿童 X 射线检查的防护	144
第二节 肿瘤放射治疗的放射防护	145
一、医用电子直线加速器的卫生防护	146
二、医用 γ 照射远距离治疗的防护	146
三、外照射放射治疗中对患者的防护	147
第三节 核医学检查的辐射防护	147
一、临床核医学场所的放射防护要求	147
二、放射性药物操作的放射防护要求	148
三、临床核医学治疗的放射防护要求	148
第四节 放射防护监测	148
一、场所放射防护监测	149
二、个人剂量监测	149
第十三章 医疗照射的辐射防护管理	151
第一节 放射防护管理机构	151
第二节 放射性工作申请许可制度	151
一、放射诊疗的设置与批准	151
二、放射工作单位必备的条件	152
第三节 放射防护管理内容	153
一、放射性同位素与射线装置的生产、销售及使用的	153
二、射线防护器材	154
三、防护知识培训	154
四、职业健康管理	155
五、医疗照射的质量保证	155
六、档案管理	156
实验	157
实验一 X 射线特性的验证	157
实验二 X 射线半价层的测量	157
实验三 X 射线机输出量的测量	158
实验四 透视 X 射线机防护区照射量率的测试	158
实验五 X 射线屏蔽材料铅当量的测量	160
中英文名词对照索引	162

第一章 物质的结构



学习目标

1. 掌握: 卢瑟福的 α 粒子散射实验的现象及重要意义; 玻尔理论的基本假设; 原子核结构。
2. 熟悉: 核外电子结构。
3. 了解: 核磁矩在外磁场中的进动; 磁共振现象及核自旋弛豫; 磁共振现象的医学应用。

第一节 原子结构

一、揭示原子结构的实验基础

在 20 世纪初, 从实验事实已经知道电子是一切原子的组成部分。但物质通常是中性的, 足见原子中还有带正电的部分。又从电子的荷质比(e/m)的测量, 知道电子的质量比整个原子的质量要小得多, 当时已经知道一个电子的质量差不多是氢原子质量的 $1/2000$ 。这些实验结果和当时的经典理论是考虑原子结构模型的基础。

(一) α 粒子的散射实验

α 粒子是放射性物体中发射出来的快速粒子, 它具有氦原子那样的质量, 是电子质量的 7300 倍。 α 粒子带两个单位的正电荷, 后来证明它就是氦原子核。

汤姆逊在 1904 年提出过一个原子结构模型, 为了验证这个模型, 卢瑟福等进行了 α 粒子散射实验, 在 1909 年观察到一个重要现象, 就是 α 粒子受铂的薄膜散射时, 绝大多数平均只有 $2^\circ \sim 3^\circ$ 的偏转, 但有 $1/8000$ 的 α 粒子偏转大于 90° , 其中有接近 180° 的。

α 粒子散射实验所用仪器的布置大致如图 1-1 所示。R 为被一铅块包围的 α 粒子源, 发射的 α 粒子经一细的通道后, 形成一束射线, 打在铂的薄膜 F 上。有一放大镜 M, 带着一片荧光屏 S, 可以转到不同的方向对散射的 α 粒子进行观察。荧光屏是由玻璃片上涂荧光物硫化锌制成的,

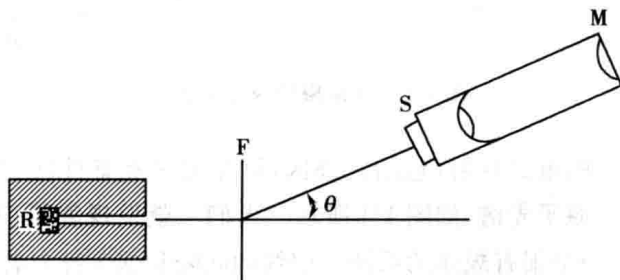


图 1-1 观测 α 粒子散射的仪器装置示意图



使用时把有硫化锌一面向着散射物 F。当被散射的 α 粒子打在荧光屏上,就会发生微弱的闪光。通过放大镜观察闪光即可记下某一时间内在某个 θ 方向散射的 α 粒子数。为了避免 α 粒子与空气分子的碰撞,从 α 粒子源到荧光屏这段路程是在真空中的。

汤姆逊模型不能说明实验中 大角散射的事实,卢瑟福在 1911 年提出另一个模型。他设想原子中带正电部分很小,电子在带正电部分的外边。这样, α 粒子接近原子时,它受电子的作用引起运动的改变不大,而它受正电体的作用就不同了,此时正电体很小, α 粒子进了原子区域,但还在正电体之外,整个正电体对它起作用。因此受正电体的作用力为

$$F = \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

其中, e 为电子的电量; Z 为原子序数; ϵ_0 为真空中的介电常数; r 为 α 粒子与正电体的距离。

由于正电体很小,所以 r 可以很小,因而所受的力可以很大,因此就能产生大角散射,如图 1-2 所示。卢瑟福还提出了可以由实验验证的理论。按照他的理论,从实验观察到的散射角可以推算出带正电体的大小为 $10^{-15} \sim 10^{-14}$ m,而原子半径是 10^{-10} m,所以称为原子核(atomic nucleus)。他提出的原子模型因而称核式模型。

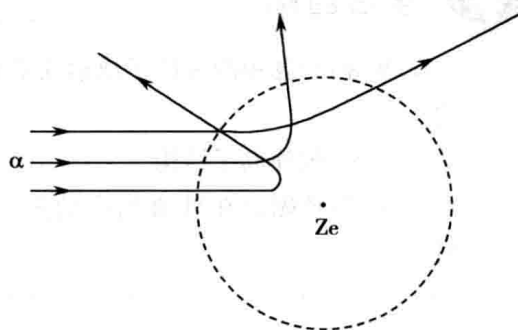


图 1-2 α 粒子在原子核式模型中的散射

(二) 氢原子光谱的实验规律

原子的核式模型建立,只肯定了原子核的存在,但还不知道原子核外边的电子的具体情况,需要进一步研究。在这方面的 发展中,光谱的观察提供了很多资料,这些资料是关于原子核外结构知识的重要源泉。

光谱是电磁辐射(不论在可见区或在可见区以外)的波长成分和强度分布的记录;有时只是波长成分的记录。用光谱仪可以把光按波长展开,把不同成分的强度记录下来,或把按波长展开后的光谱摄成相片,后一种光谱仪称为摄谱仪。光谱仪用棱镜或光栅作为分光器,有各种不同的设计。例如图 1-3 是一种棱镜摄谱仪的示意图。光源 I 所发的光经透镜 L_3 会聚在摄谱仪的光缝 S 上,一部分进入摄谱仪,经会聚透镜 L_1 后,成为平行光线,落在棱镜片的一个面上,穿过棱镜片后,不同波长的光线以不同的偏转角射出,经过透镜 L_2 再成为会聚光线。不同波长的光线会聚在相片 P 上的不同点,在 P 上形成一系列 S 的实像。S 是一条狭缝,所以这些实像是细线。摄成的光谱相片,可以进行测量。谱线的位置决定于波长,可以把一个已知波长的光谱和待测的光谱并排地摄在相片上,测出两光谱的谱线位置进行比较,从而测定各线的波长。从相片上谱线的浓度也可以定出光谱各成分的强度。

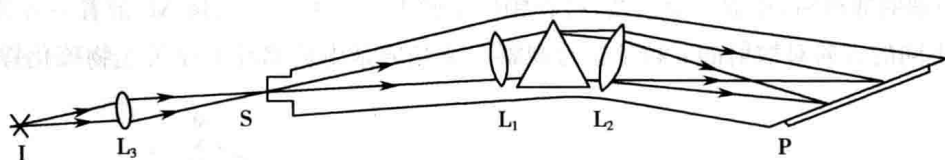


图 1-3 棱镜摄谱仪示意图

原子光谱是原子发射的电磁辐射(包括红外区,可见光区和紫外区)强度随着波长的分布。从氢气放电管可以获得氢原子光谱,如图 1-4 所示。人们早就发现氢原子光谱在可见区和近紫外区有好多条谱线,构成一个很有规律的系统。谱线的间隔和强度都向着短波方向递减。

在 1885 年从某些星体的光谱中观察到的氢光谱线已达 14 条。同年,巴耳末发现这些谱线的波长可以纳入下列简单的关系中

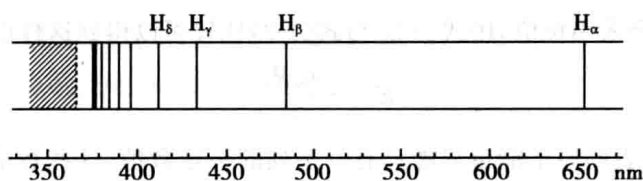


图 1-4 氢原子光谱的巴耳末线系及其系限外的连续光谱

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

式中常数 $B = 364.56 \text{ nm}$ 。后人称这一公式为巴耳末公式,它所表达的一组谱线称作巴耳末系。

如果令 $\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda}$, $\bar{\nu}$ 称波数,巴耳末公式可改列如下:

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{B} \frac{n^2 - 4}{n^2} = \frac{4}{B} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

或

$$\bar{\nu} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

式中的常数 $R_H = \frac{4}{B}$, 称里德伯常数。从氢光谱的更精密测量,获得

$$R_H = 1.0967758 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

氢原子光谱的其他谱线系也先后被发现,一个在紫外区,由赖曼发现;还有 3 个在红外区,分别由帕邢、布喇开、普丰特发现。这些谱线系也可用一个通式表达为:

$$\bar{\nu} = R_H \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (1-1)$$

式(1-1)中, $k = 1, 2, 3, \dots$; 对每一个 k , $n = k + 1, k + 2, k + 3, \dots$, 构成一个谱线系。

上述各式虽然都是由实验得出的经验公式,但这些公式都准确地描述了原子光谱的规律性,这也说明原子光谱反映了原子内部结构的规律性。所以氢原子光谱的实验规律成为探索原子结构的重要资料,它对于原子结构理论的发展起了很大的作用。

二、玻尔的原子模型

自从 1911 年原子的核式结构证明后,人们了解到半径约为 10^{-10} m 的原子中有 1 个带正电的核,它的半径是 10^{-15} m 的数量级。但原子是中性的,从而推想原子核之外必定还有带负电的结构,这样就很自然地想到有带负电的电子围绕着原子核运动,电子活动区域的半径应该是 10^{-10} m 的数量级。在这样一个原子模型的基础上,玻尔在 1913 年发展了氢原子的理论。

(一) 玻尔假设

按照量子理论,光能量总是一个单元的整倍数,而每一单元(称为光量子)是 $h\nu$, 这里 ν 是光的频率, h 为普朗克常数, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

1913 年,玻尔根据量子理论对氢光谱的经验公式(1-1)进行了研究。用 hc 乘以式(1-1)就得到

$$hc\bar{\nu} = h\nu = \frac{hcR_H}{k^2} - \frac{hcR_H}{n^2} \quad (1-2)$$

式(1-2)显示出清楚的物理意义。左边是发出光的能量,右边两项也必然是能量,而且应该是原子辐射前后的能量之差。如果原子在辐射前的能量是 E_2 , 经辐射,它的能量变成 E_1 ($E_1 < E_2$), 那么放出的能量:

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1-3)$$



如果原子的能量仍采用负值,用式(1-3)与式(1-2)比较可以得到这样的简单关系:

$$E = -\frac{hcR_H}{n^2} \quad (1-4)$$

n 是整数,式(1-4)所代表的原子能量只能具有一系列的一定数值,这些数值是彼此分隔的,不能连续变化。

考虑电子在原子核外做圆周运动的情况。由于氢核的质量是电子质量的 1836 倍,所以在运动过程中可近似认为原子核不动。电子绕原子核运动的向心力为原子核对电子的库仑引力,即:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2} \quad (1-5)$$

其中, m 为电子的质量, v 为电子的速度。由此可得电子的动能:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2r}$$

体系的势能:

$$U = K - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}$$

式中 K 是 $r = \infty$ 时的势能,它的数值可以随意选定。如果把 $r = \infty$ 时的势能定为零,则

$$U = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r}$$

原子的能量等于(原子核的动能等于零):

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2r} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2r} \quad (1-6)$$

这里能量出现负值是由于把 $r = \infty$ 时的势能定为零的结果。这不是必须这样做的,但这样可使公式最简单。由式(1-6)可见, r 越大时 E 越大(绝对值越小),半径大的轨道代表大能量。式(1-6)只表示了 E 和 r 的关系,对 r 值乃至对 E 值,没有其他任何限制。

由式(1-4)和式(1-6)两式可得

$$r = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{n^2 Ze^2}{2hcR_H} \quad (1-7)$$

由式(1-7)可知与能量联系的电子轨道也是分隔的,它的半径有一定数值,不能连续变化。

以上说明从实验事实推知:①氢原子中的电子只能在一定大小的、彼此分隔的一系列轨道上运动;电子在每一这样的轨道运动时,原子具有一定的能量。②如果氢原子中的电子从一个大轨道上运动跳到小轨道上运动,原子的能量就从大变小,多余的能量就放出成为 1 个光子的能量,如式(1-3)所示。

根据上述考虑,波尔提出了两个基本假定。

第一,在原子内部存在一系列稳定的能量状态 E_1, E_2, E_3, \dots , 当原子处在任一稳定能态时,电子绕原子核做圆周运动,虽有向心加速度,也不向外辐射能量。而且,只有当电子的角动量 p_φ 等于 η 整数倍的那些轨道才是可能的,即

$$p_\varphi = mvr = n\hbar \quad (1-8)$$

式(1-8)中 $n=1, 2, 3, \dots$, 称为量子数, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ 。式(1-8)称为波尔的量子化条件。

第二,当原子从能量状态 E_n 跃迁到能量状态 E_k 时,它将发射(或吸收)一个单色的光子,其频率由式(1-9)决定

$$\nu = \frac{E_n - E_k}{h} \quad (1-9)$$

式(1-9)称为波尔的频率条件。

