

高等医药院校规划教材

供医学影像技术及相关专业使用

# 放射物理与防护

主 编 刘小艳



科学出版社

高等医药院校规划教材

供医学影像技术及相关专业使用

# 放射物理与防护

主 编 刘小艳  
副主编 徐 明 李君霖  
编 委 (按姓氏汉语拼音排序)  
樊 冰 南阳医学高等专科学校  
胡潺潺 承德医学院附属医院  
黄小燕 黔东南民族职业技术学院  
李君霖 赣南卫生健康职业学院  
李丽丽 包头医学院职业技术学院  
李萌萌 南京医科大学康达学院  
刘小艳 南通大学附属医院  
陆 伟 唐山职业技术学院  
罗雪莲 铜陵职业技术学院  
王 锐 承德医学院附属医院  
王晶晶 苏州卫生职业技术学院  
徐 明 辽宁医药职业学院  
学术秘书 李萌萌



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书采用“大影像观”概念,详细讲述了放射物理与防护的相关法律法规、医用物理学知识、X 射线基础知识、常用辐射量及其相关测量、医学成像的安全防护、放射治疗剂量学等方面的内容,是来自全国 10 余所高等院校及教学医院从事医学影像临床、教学、科研、管理的一线专家、学者集体编创的成果。

本书适用于从事医学影像技术及其相关领域的学生及同仁使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

---

放射物理与防护 / 刘小艳主编. —北京: 科学出版社, 2019.6

高等医药院校规划教材

ISBN 978-7-03-059762-5

I. 放… II. 刘… III. ①放射医学-物理学-医学院校-教材②放射医学-辐射防护-医学院校-教材 IV. ①R811.1②R14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 276011 号

---

责任编辑: 丁海燕 田轶静 / 责任校对: 彭珍珍

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 蓝正设计

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>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019 年 6 月第 一 版 开本: 850×1168 1/16

2019 年 6 月第一次印刷 印张: 9 3/4

字数: 300 000

定价: 35.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 前 言

德国物理学家伦琴教授于1895年11月8日发现X射线并将其应用于医学，为广大患者的诊疗带来了福音。特别是Housfield发明了CT以来，医学影像技术的进步丰富、发展、完善了临床诊断方法，为疾病的早发现、早诊断、早治疗奠定了基础，为大数据背景下的精准医疗与循证医学的发展做出了不可磨灭的贡献。

然而，医学影像在为患者诊疗带来巨大价值的同时，也存在着诸多隐患，甚至有的已逐步上升为社会问题。这就需要权衡各类成像方式的利弊，合理地加以应用。要在合理使用低剂量的前提下，使图像质量、诊断价值最大化，这就是我们编写本书的初衷。

为此，本书编写得到了科学出版社及全体编委的积极响应，全体编委在百忙之中齐聚北京，共同探讨本书的编写目录与大纲，大家畅所欲言、献计献策，在极短的时间内完成初稿并交叉审阅。编委们努力站在时代所能给予的高度，努力达到零差错。

本书采用“大影像观”概念，详细讲述了放射物理与防护的相关法律法规、医用物理学知识、X射线基础知识、常用辐射量及其相关测量、医学成像的安全防护、放射治疗剂量学等方面的内容。本书适用于从事医学影像技术及其相关领域的学生及同仁使用。

然而，因水平有限，可能存在诸多不足，还请广大同行将自己的见解和在教学过程中所遇到的问题反馈给我们，以帮助我们做得更好。

刘小艳

2018年12月20日

# 目 录

## 总论 / 1

- 第一节 医学影像相关法律 / 1
- 第二节 医学影像相关法规 / 3

## 第一章 医用物理学知识 / 7

- 第一节 物质的结构 / 7
- 第二节 放射性核素 / 15
- 第三节 磁学基础 / 21
- 第四节 激光学基础 / 27

## 第二章 X射线基础知识 / 41

- 第一节 X射线基础概述 / 41
- 第二节 X射线与物质的相互作用 / 52
- 第三节 X射线的吸收与衰减 / 61

## 第三章 常用辐射量及其相关测量 / 76

- 第一节 辐射量和单位 / 76
- 第二节 电离辐射对人体的危害 / 86
- 第三节 放射线的测量 / 94

## 第四章 医学成像的安全防护 / 106

- 第一节 X射线的防护知识 / 106
- 第二节 常规X射线摄影的防护 / 112
- 第三节 床边X射线摄影的防护 / 116
- 第四节 介入放射学的防护 / 118
- 第五节 CT检查的防护 / 121
- 第六节 核医学检查的辐射防护 / 122
- 第七节 放射治疗的放射防护 / 123
- 第八节 放射监测 / 126
- 第九节 磁共振成像的安全保证 / 126
- 第十节 激光成像的安全保证 / 130

## 第五章 放射治疗剂量学 / 138

- 第一节 放射治疗剂量学基本概念 / 138
- 第二节 放射治疗剂量计算实例 / 143
- 第三节 近距离放射治疗剂量学 / 145

## 参考文献 / 149

## 思考与练习选择题参考答案 / 150

# 总 论

自 1895 年伦琴发现 X 射线并将其应用于医学,特别是 1971 年 Hounsfield 发明 CT 以来,医学影像得到了迅猛发展。因此,就更需要规范化作业、规范化管理、全面质量控制与安全管理,从而使受检者以最小的伤害获得最大利益的诊断和治疗,以达到各级医院影像诊断互认。而医学影像相关的法律、法规就是这个时代不可或缺的基本准则。

纵观近 30 年来与医学影像相关的各级别的法律、法规及各项规章,通常可分为 3 个层面进行理解,一是法律层面,由中华人民共和国国务院及以上行政机构颁布;二是法规层面,通常由国家卫生健康委员会颁布;三是标准与规范层面,通常由行业内组织讨论制订。

## 第一节 医学影像相关法律

到目前为止,医学影像相关法律级别最高的为《中华人民共和国职业病防治法》,为中华人民共和国主席令第 52 号,由中华人民共和国第十一届全国人民代表大会常务委员会第二十四次会议于 2011 年 12 月 31 日第一次修正,自公布之日起施行(2019 年修订)。由国务院及以上行政机构颁布的法令有:1989 年颁布的《放射性药品管理办法》(2017 年修订)、2000 年颁布的《医疗器械监督管理条例》(2017 年修订)。《医疗纠纷预防和处理条例》于 2018 年 6 月 20 日国务院第 13 次常务会议通过,自 2018 年 10 月 1 日起施行,国务院令第 701 号。《中华人民共和国药品管理法实施条例》自 2002 年 9 月 15 日起施行,为国务院令第 360 号(2019 年修订)。2005 年颁布的《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》(2014 年修订)等。

### 一 放射性药品管理

《放射性药品管理办法》(以下称《药品管理法》)于 1989 年 1 月 13 日国务院令第 25 号发布施行,2017 年修订。放射性药品具体使用如下:

(1) 医疗单位设置核医学科、室(同位素室),必须配备与其医疗任务相适应的并经核医学技术培训的技术人员。非核医学专业技术人员未经培训,不得从事放射性药品使用工作。

(2) 医疗单位使用放射性药品,必须符合国家有关放射性同位素安全和防护的规定。所在地的省、自治区、直辖市药品监督管理部门,应当根据医疗单位核医学技术人员的水平、设备条件,核发相应等级的《放射性药品使用许可证》,无许可证的医疗单位不得临床使用放射性药品。《放射性药品使用许可证》有效期为 5 年,期满前 6 个月,医疗单位应当向原发证的主管部门重新提出申请,经审核批准后,换发新证。

(3) 医疗单位配制、使用放射性制剂,应当符合《药品管理法》及其实施条例的相关规定。

(4) 持有《放射性药品使用许可证》的医疗单位,必须负责对使用的放射性药品进行临床质量检验,

收集药品不良反应等工作，并定期向所在地药品监督管理、卫生行政部门报告。由省、自治区、直辖市药品监督管理、卫生行政部门汇总后分别报国务院药品监督管理、卫生行政部门。

(5) 放射性药品使用后的废物（包括患者排出物），必须按国家有关规定妥善处理。

## 二 放射性同位素与射线装置安全和防护

《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》于 2005 年 8 月 31 日国务院第 104 次常务会议通过，自 2005 年 12 月 1 日起施行，为国务院令 449 号，2014 年修订。条例从许可和备案、安全和防护、辐射事故应急处理、监督检查、法律责任等方面进行阐述。

### （一）定义

放射性同位素，是指某种发生放射性衰变的元素中具有相同原子序数但质量不同的核素。放射源，是指除研究堆和动力堆核燃料循环范畴的材料以外，永久密封在容器中或者有严密包层并呈固态的放射性材料。射线装置，是指 X 线机、加速器、中子发生器以及含放射源的装置。非密封放射性物质，是指非永久密封在包壳里或者紧密地固结在覆盖层里的放射性物质。辐射事故，是指放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素和射线装置失控导致人员受到意外的异常照射。

### （二）行政管理

条例规定由国务院环境保护主管部门对全国放射性同位素、射线装置的安全和防护工作实施统一监督管理。国务院公安、卫生等部门按照职责分工和本条例的规定，对有关放射性同位素、射线装置的安全和防护工作实施监督管理。县级以上地方人民政府环境保护主管部门和其他有关部门，按照职责分工和本条例的规定，对本行政区域内放射性同位素、射线装置的安全和防护工作实施监督管理。

条例明确了国家对放射源和射线装置实行分类管理。根据放射源、射线装置对人体健康和环境的潜在危害程度，从高到低将放射源分为 I 类、II 类、III 类、IV 类、V 类，具体分类办法由国务院环境保护主管部门制定；将射线装置分为 I 类、II 类、III 类，具体分类办法由国务院环境保护主管部门商国务院卫生主管部门制定。

### （三）许可证及其有效期

除医疗使用 I 类放射源、制备正电子发射计算机断层扫描用放射性药物自用的单位外，生产放射性同位素、销售和使用 I 类放射源、销售和使用 I 类射线装置的单位的许可证，由国务院环境保护主管部门审批颁发。除国务院环境保护主管部门审批颁发的许可证外，其他单位的许可证，由省、自治区、直辖市人民政府环境保护主管部门审批颁发。国务院环境保护主管部门向生产放射性同位素的单位颁发许可证前，应当将申请材料印送其行业主管部门征求意见。环境保护主管部门应当将审批颁发许可证的情况通报同级公安部门、卫生主管部门。

许可证有效期为 5 年。有效期届满，需要延续的，持证单位应当于许可证有效期届满 30 日前，向原发证机关提出延续申请。原发证机关应当自受理延续申请之日起，在许可证有效期届满前完成审查，符合条件的，予以延续；不符合条件的，书面通知申请单位并说明理由。

### （四）人员资质

生产、销售、使用放射性同位素和射线装置的单位，应当对直接从事生产、销售、使用活动的工作人员进行安全和防护知识教育培训，并进行考核；考核不合格的，不得上岗。辐射安全关键岗位应当由注册核安全工程师担任。辐射安全关键岗位名录由国务院环境保护主管部门商国务院有关部门制定并公布。

### （五）健康管理

生产、销售、使用放射性同位素和射线装置的单位，应当严格按照国家关于个人剂量监测和健康管理的规定，对直接从事生产、销售、使用活动的工作人员进行个人剂量监测和职业健康检查，建立个人剂量档案和职业健康监护档案。

### （六）辐射事故应急处理

根据辐射事故的性质、严重程度、可控性和影响范围等因素，从重到轻将辐射事故分为特别重大辐射事故、重大辐射事故、较大辐射事故和一般辐射事故四个等级。

（1）特别重大辐射事故，是指Ⅰ类、Ⅱ类放射源丢失、被盗、失控造成大范围严重辐射污染后果，或者放射性同位素和射线装置失控导致3人以上（含3人）急性死亡。

（2）重大辐射事故，是指Ⅰ类、Ⅱ类放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素和射线装置失控导致2人以下（含2人）急性死亡或者10人以上（含10人）急性重度放射病、局部器官残疾。

（3）较大辐射事故，是指Ⅲ类放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素和射线装置失控导致9人以下（含9人）急性重度放射病、局部器官残疾。

（4）一般辐射事故，是指Ⅳ类、Ⅴ类放射源丢失、被盗、失控，或者放射性同位素和射线装置失控导致人员受到超过年剂量限值的照射。

发生辐射事故时，生产、销售、使用放射性同位素和射线装置的单位应当立即启动本单位的应急方案，采取应急措施，并立即向当地环境保护主管部门、公安部门、卫生主管部门报告。发生辐射事故的单位应当立即将可能受到辐射伤害的人员送至当地卫生主管部门指定的医院或者有条件救治辐射损伤病人的医院，进行检查和治疗，或者请求医院立即派人赶赴事故现场，采取救治措施。

## 第二节 医学影像相关法规

这里所说的法规通常为国家卫生健康委员会（原卫生部）制定，这里面包含：《医疗机构管理条例实施细则》（1994年8月29日卫生部令第35号，2017年第3次修订）、《医疗技术临床应用管理办法》（卫医政发〔2009〕18号）、《医院评审暂行办法》（卫医管发〔2011〕75号）等。

与医学影像密切的法规有：《放射卫生技术服务机构管理办法》（卫监督发〔2012〕25号）、《放射卫生技术评审专家库管理办法》（卫监督发〔2012〕25号）、《放射诊疗建设项目卫生审查管理规定》（卫监督发〔2012〕25号）、《关于发布2018—2020年大型医用设备配置规划的通知》（国卫财务发〔2018〕41号）、《关于印发甲类大型医用设备配置许可管理实施细则的通知》（国卫规划发〔2018〕14号）、《关于印发大型医用设备配置与使用管理办法（试行）的通知》（国卫规划发〔2018〕12号）、《关于发布大型医用设备配置许可管理目录（2018年）的通知》（国卫规划发〔2018〕5号）等。

### 一

### 大型医用设备配置许可管理目录

#### （一）甲类（国家卫生健康委员会负责配置管理）

（1）重离子放射治疗系统。

（2）质子放射治疗系统。

（3）正电子发射型磁共振成像系统（英文简称PET/MR）。

（4）高端放射治疗设备。指集合了多模态影像、人工智能、复杂动态调强、高精度大剂量率等精确放疗技术的放射治疗设备，目前包括X线立体定向放射治疗系统（英文简称Cyberknife）、螺旋断层放射治疗系统（英文简称Tomo）HD和HDA两个型号、Edge和Versa HD等型号直线加速器。

（5）首次配置的单台（套）价格在3000万元人民币（或400万美元）及以上的大型医疗器械。

#### （二）乙类（省级卫生健康委员会负责配置管理）

（1）X线正电子发射断层扫描仪（英文简称PET/CT，含PET）。

（2）内窥镜手术器械控制系统（手术机器人）。

（3）64排及以上X线计算机断层扫描仪（64排及以上CT）。

（4）1.5T及以上磁共振成像系统（1.5T及以上MR）。



- (5) 直线加速器(含 X 刀, 不包括列入甲类管理目录的放射治疗设备)。
- (6) 伽马射线立体定向放射治疗系统(包括用于头部、体部和全身)。
- (7) 首次配置的单台(套)价格在 1000 ~ 3000 万元人民币的大型医疗器械。

## 二

### 2018~2020 年大型医用设备配置规划

以省级区域或跨省域为规划单位, 综合考虑经济社会发展水平、区域功能定位、医疗服务能力、配置需求、社会办医发展等因素, 合理规划配置数量。到 2020 年底, 全国规划配置大型医用设备 22548 台, 其中新增 10097 台, 分 3 年实施, 甲类大型医用设备根据工作需要按年度实施, 乙类大型医用设备由省级卫生健康部门制订年度实施计划。为社会办医配置预留合理空间。具体为:

#### (一) 甲类大型医用设备

(1) 重离子放射治疗系统。加强对在用设备使用状况的跟踪和评价, 本规划期内暂不制订新增配置规划。

(2) 质子治疗肿瘤系统。全国总体规划配置控制在 10 台内, 全部为新增配置。按区域功能定位、医疗服务辐射能力和医疗机构诊疗水平等实际情况, 到 2019 年底前, 在华北、华东、中南、东北、西南、西北 6 个区域各配置 1 台; 到 2020 年底在人口密集, 医疗辐射能力强, 集中京津冀、长三角、珠三角和成渝经济区的华北、华东、中南、西南再各规划配置 1 台。

(3) 正电子发射型磁共振成像系统(PET/MR)。加强对在用设备使用状况的跟踪和评价。到 2020 年底, 全国暂规划配置 33 台, 按华北、东北、华东、中南、西南、西北 6 个区域配置, 其中新增 28 台。

(4) 高端放射治疗设备。到 2020 年底, 全国规划配置 216 台, 其中新增 188 台。

#### (二) 乙类大型医用设备

(1) X 线正电子发射断层扫描仪(PET/CT, 含 PET)。到 2020 年底, 全国规划配置 710 台内, 其中新增 377 台。

(2) 内窥镜手术器械控制系统(手术机器人)。到 2020 年底, 全国规划配置 197 台内, 其中新增 154 台。

(3) 64 排及以上 X 线计算机断层扫描仪(64 排及以上 CT)。到 2020 年底, 全国规划配置 8119 台内, 其中新增 3535 台。

(4) 1.5T 及以上磁共振成像系统(1.5T 及以上 MR)。到 2020 年底, 全国规划配置 9846 台内, 其中新增 4451 台。

(5) 直线加速器(含 X 刀)。到 2020 年底, 全国规划配置在 3162 台内, 其中新增 1208 台。

(6) 伽玛射线立体定向放射治疗系统。到 2020 年底, 全国规划配置 254 台内, 其中新增 146 台。

## 三

### 放射诊疗建设项目

放射诊疗建设项目按照可能产生的放射性危害程度与诊疗风险分为危害严重和危害一般两类。

(1) 危害严重类的放射诊疗建设项目包括立体定向放射治疗装置( $\gamma$ 刀、X 刀等)、医用加速器、质子治疗装置、重离子治疗装置、钴-60 治疗机、中子治疗装置与后装治疗机等放射治疗设施, 正电子发射计算机断层显像装置(PET)与单光子发射计算机断层显像装置(SPECT)及使用放射性药物进行治疗的核医学设施。其他放射诊疗建设项目为危害一般类。

(2) 危害严重类的放射诊疗建设项目职业病危害放射防护预评价报告在申请卫生行政部门审核前, 应当由承担评价的放射卫生技术服务机构组织 5 名以上专家进行评审, 其中从放射卫生技术评审专家库中抽取的专家应不少于专家总数的 3/5。

立体定向放射治疗装置、质子治疗装置、重离子治疗装置、中子治疗装置和正电子发射计算机断层显像装置等项目预评价报告的评审, 从国家级放射卫生技术评审专家库抽取的专家应不少于专

家总数的 2/5。

危害一般类的放射诊疗建设项目职业病危害放射防护预评价报告是否需要专家审查由省级卫生行政部门确定。

评审专家的组成、专家评审意见、评审意见处理情况及专家组复核意见等内容应作为预评价报告的附件。

## 四 放射卫生技术服务机构人员配置的条件

### (一) 基本条件

- (1) 应当有与其申请技术服务项目相适应的管理、技术和质量控制人员。
- (2) 专业技术人员应当掌握相关法律、法规、标准和本单位质量管理体系文件。
- (3) 专业技术负责人应当掌握本专业业务，专业技术人员的专业与申请的技术服务项目相一致。
- (4) 专业技术人员必须经正规系统培训并考核合格。

### (二) 具体条件

(1) 申请放射诊疗建设项目职业病危害放射防护评价甲级资质的，放射卫生专业技术负责人应当具有高级技术职称；从事相关专业工作 5 年以上，是本单位职工且未在其他放射卫生技术服务机构中任职。放射卫生专业技术人员中，高级技术职称人员不少于 3 人，中级以上技术职称的人数不少于总数的 60%，技术人员总数不少于 10 人。

(2) 申请放射防护器材和含放射性产品检测资质的，放射卫生专业技术负责人应当具有高级专业技术职称，从事相关专业工作 5 年以上，是本单位职工且未在其他放射卫生技术服务机构中任职。放射卫生专业技术人员中，高级技术职称人员不少于 2 人，中级以上技术职称的人数不少于总数的 40%，技术人员总数不少于 7 人。

(3) 申请放射诊疗建设项目职业病危害放射防护评价乙级资质的，放射卫生专业技术负责人应当具有高级专业技术职称，从事相关专业工作 5 年以上，是本单位职工且未在其他放射卫生技术服务机构中任职。放射卫生专业技术人员中，中级以上技术职称人数不少于 3 人，技术人员总数不少于 5 人。

(4) 申请放射卫生防护检测资质的，放射卫生专业技术负责人应当具有中级以上专业技术职称，从事相关专业工作 3 年以上，是本单位职工且未在其他放射卫生技术服务机构中任职。放射卫生专业技术人员中，中级以上技术职称人数不少于 2 人，技术人员总数不少于 5 人。

(5) 申请个人剂量监测资质的，放射卫生专业技术负责人应当具有中级以上专业技术职称，从事相关专业工作 3 年以上，是本单位职工且未在其他放射卫生技术服务机构中任职。放射卫生技术人员总数不少于 3 人。

省级卫生行政部门在其批准权限内可根据实际情况细化具体条件。

## 五 放射卫生技术评审专家库管理办法

放射卫生技术评审专家库成员由放射防护、放射卫生检测、放射诊疗与核事故医学应急和放射卫生监督管理等放射卫生相关专业领域的专家组成。

### (一) 国家级放射卫生技术评审专家库专家应当具备的条件

- (1) 坚持原则、客观公正，具有良好的专业素质、科学态度和职业道德。
- (2) 具有相关专业高级技术职务任职资格，从事放射卫生相关专业 10 年以上。
- (3) 熟悉放射卫生相关的法律法规、规范与技术标准。
- (4) 健康状况良好，能够胜任工作。

省级放射卫生技术评审专家库专家的条件由省级卫生行政部门参照上述条件自行制定。

(二) 专家库专家的主要职责

- (1) 参加放射诊疗建设项目职业病危害放射防护评价的卫生审查活动。
- (2) 参加放射卫生技术服务机构资质审定工作。
- (3) 为卫生行政部门的放射卫生监督提供技术支持。
- (4) 承担卫生行政部门指定的其他工作。

(三) 专家库专家应当遵守的规定

- (1) 按照国家有关法律法规、标准与规范开展工作，独立、客观地提出意见。
- (2) 认真履行职责，廉洁自律。
- (3) 遵守相关保密规定。
- (4) 不得参与有碍公正性的活动。
- (5) 不得以专家库专家的名义进行商业活动。
- (6) 主动申请回避与自身有利害关系的放射卫生技术评审活动。

(刘小艳 李萌萌)

# 第一章 医用物理学知识

## 学习目标

1. 掌握：卢瑟福的  $\alpha$  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、放射性核素的衰变类型、原子核的衰变规律。
2. 熟悉：原子的核外电子结构。
3. 了解：放射性核素长期平衡与暂时平衡的区别。
4. 掌握：拉莫尔进动、拉莫尔频率、纵向弛豫、横向弛豫。
5. 熟悉：共振和磁共振现象、原子核自旋的条件、原子核磁矩。
6. 了解：磁共振技术及其在医学中的应用。
7. 掌握：激光的特性。
8. 熟悉：激光的原理。
9. 了解：激光的产生及其在医学中的应用，以及医用激光器。

## 第一节 物质的结构

### 一 原子及其核外结构

在二十世纪初，从实验事实获知电子是原子的组成部分。物质通常是中性的，足见原子中还有带正电的部分。从电子的荷质比 ( $e/m$ ) 测量得知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两千分之一。又根据不同方法测得各种原子的半径是不同的，但其数量级都是  $10^{-10}$  m。这些实验结果和当时的经典理论是基于原子结构模型的基础。

J.J.汤姆孙 (J.J.Thomson) 最早提出了原子结构模型，他根据上述资料，设想原子的带正电部分是一个如原子本身大小的、具有弹性的、冻胶状的球体，正电荷均匀分布，负电子镶嵌于球内或球体表面，这些电子能在它们的平衡位置上做简谐振动。

但勒纳 (Lenard) 从 1903 年起，经过多年的努力，通过电子在金属膜上的散射实验证明了汤姆孙模型的不足，他发现较高速度的电子很容易穿透原子，后者不像是具有  $10^{-10}$  m 那样半径的实体球。 $\alpha$  粒子散射实验否定了汤姆孙模型，建立了核式模型。

#### (一) 原子结构实验

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

1909 年，在卢瑟福 (E. Rutherford) 等进行的  $\alpha$  粒子散射实验中观察到一个重要现象，绝大多数  $\alpha$  粒子如以前所观察到的，平均只有  $2^\circ \sim 3^\circ$  的偏转，但大约有  $1/8000$  的  $\alpha$  粒子偏转大于  $90^\circ$ ，甚至有接近  $180^\circ$  的偏转。

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  $\alpha$  粒子源，发射的  $\alpha$  粒子经过一纤细的通道后，形成一束射线，撞击在铂的薄膜上。放大镜 M，带着一片荧光屏 S，可以旋转到不同的方向对散射的  $\alpha$  粒子进行观察。荧光屏是在玻璃片上涂以荧光物硫化锌制成的，使用时，将涂有硫化锌的一面朝向散射物 F。当被散射的  $\alpha$  粒子打在荧光屏上时，就会发生微弱的闪光。通过放大镜观察闪光就可记下某一时间内在某一方向散射的  $\alpha$  粒子数。从  $\alpha$  粒子源到荧光屏这段路程是在真空中进行的。

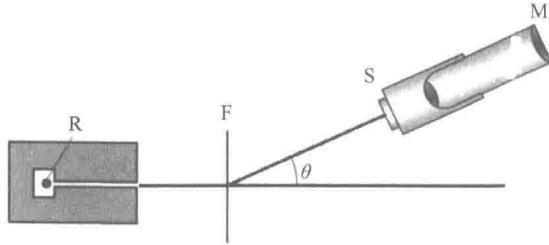


图 1-1 观测  $\alpha$  粒子散射的仪器装置示意图

大角散射并不都是偶然性小角散射的累积，这种可能性要比 1/8000 小得多，绝大多数是一次碰撞的结果。但这不可能在汤姆孙模型那样的原子中发生。卢瑟福针对汤姆孙模型不能符合实验事实的情况，在 1911 年提出另一个模型。他设想原子中带正电部分体积很小，电子存在于带正电部分的外围。这样， $\alpha$  粒子接近原子时，它受电子的作用引起运动的变化，如上文所说，还是不大，受正电体的作用就不同了。此时正电体很小， $\alpha$  粒子进入原子区域，但仍在正电体之外，整个正电体对它起作用，因此受正电体的作用力是

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

式中， $Z$  为原子序数； $e$  为电子的电量； $\epsilon_0$  为真空中的介电常数； $r$  为  $\alpha$  粒子与正电体的距离。

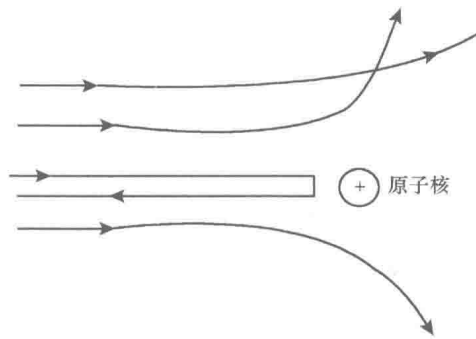


图 1-2  $\alpha$  粒子在原子核式模型中的散射

由于正电体很小，所以  $r$  可以很小，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。按他的理论，从实验观察到的散射角可以推算带正电体的大小，算得的这种正电体是很小的，所以称为原子核，因而，他提出的原子模型被称为核式模型。在这个结构中，有一个带正电的中心体原子核，所带正电的数值是原子序数乘以单元电荷值。原子核的半径在  $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{ m}$ 。原子核外围散布着带负电的电子。但原子质量的绝大部分是原子核的质量。

## (二) 玻尔的原子模型

1. 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，但还不清楚原子核外电子的具体情况，所以需要进一步研究。对光谱的观察为我们提供了很多资料，这些资料是关于原子核外结构知识的重要来源。

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。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 A 会聚在摄谱仪的光缝 S 上，一部分进入摄谱仪，经会聚透镜 B 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

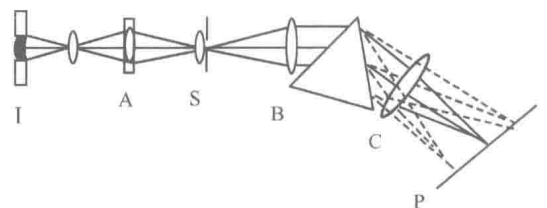


图 1-3 棱镜摄谱仪示意图

同的偏转角射出, 经过透镜 C 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。

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。

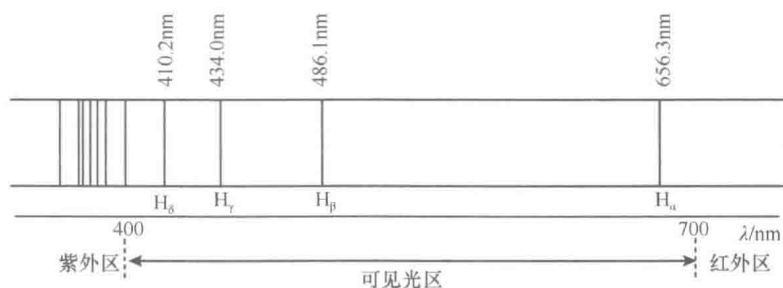


图 1-4 氢原子光谱的巴耳末系及其系限外的连续光谱

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:

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

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

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

或

$$\tilde{\nu} = R_{\text{H}} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

式中, 常数  $R_{\text{H}} = \frac{4}{B}$ , 称里德伯常数。从氢光谱的更精密测量可获得

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

氢原子光谱的其他谱线系也先后被发现, 一个在紫外区, 由莱曼发现, 还有 3 个在红外区, 分别由帕邢、布拉开、普丰德发现。这些谱线系也可用一个通式表达为

$$\tilde{\nu} = R_{\text{H}} \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (1-1)$$

式中,  $k=1, 2, 3, \dots$ ; 对每一个  $k$ ,  $n=k+1, k+2, k+3, \dots$ , 构成一个谱线系。

以上是氢原子光谱的情况, 可以小结为: ①光谱是线状的, 谱线有一定位置。这就是说, 有确定的波长值, 而且彼此是分立的。②谱线间有一定的关系, 例如, 谱线构成一个谱线系, 它们的波长可以用一个公式表达出来。不同系的谱线有些也有关系, 例如, 有共同的光谱项。③每一谱线的波数都可以表达为两光谱项之差。

2. 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  $10^{-10} \text{m}$  的原子中有 1 个带正电的核, 它的半径是  $10^{-15} \text{m}$  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  $10^{-10} \text{m}$  的数量级。在这样一个原子模型的基础上, N.玻尔 (N.Bohr) 在 1913 年发展了氢原子的理论。

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

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

式中， $m$  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  $r \rightarrow \infty$  时的势能，它的数值可以随意选定。如果把  $r \rightarrow \infty$  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）

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2r} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2r} \quad (1-3)$$

这里能量出现负值是由于把  $r \rightarrow \infty$  时的势能定为零。不是必须这样做，但这样可使公式最简单。由式 (1-3) 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 (1-3) 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。

式 (1-3) 是根据经典电动力学的原理推得的，它不能说明原子光谱的事实。这就是说，所引用的宏观物理中的理论不能用在原子这样的微观客体上，须另寻途径。

那么按照量子理论，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  $\nu$  是光的频率， $h$  为普朗克常量， $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ 。

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

$$hc\bar{\nu} = h\nu = \frac{hcR_{\text{H}}}{k^2} - \frac{hcR_{\text{H}}}{n^2} \quad (1-4)$$

式 (1-4) 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  $E_1$  ( $E_1 < E_2$ )，那么放出的能量为

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1-5)$$

如果原子的能量仍采用负值，用式 (1-5) 与式 (1-4) 比较可以得到这样的简单关系：

$$E = -\frac{hcR_{\text{H}}}{n^2} \quad (1-6)$$

$n$  是整数，式 (1-6) 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。

由式 (1-3) 和式 (1-6) 可得

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

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，原子的能量就大变小，多余的能量就放出称为 1 个光子的能量，如式 (1-5) 所示。

根据上述考虑，玻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  $P_\phi$  等于  $\eta$  整数

倍的那些轨道才是可能的，即

$$P_{\phi} = mvr = n\hbar \quad (1-8)$$

式中， $n=1,2,3,\dots$ ，称为量子数， $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ，此式称为玻尔的角动量量子化条件。

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（1-5）决定：

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

式（1-9）称为玻尔的频率条件。

玻尔的量子假定可用图 1-5 表示。当原子处在稳定状态  $E_1, E_2, E_3, \dots$  时，不向外辐射能量。当原子从低能态向高能态跃迁时，必须吸收光子才能实现。相反，原子从高能态向低能态跃迁时，将辐射出光子。

原子内部的规律性是否就像玻尔假定的那样，需进一步证明，必须在假定基础上建立理论，去解释原子光谱的实验规律。

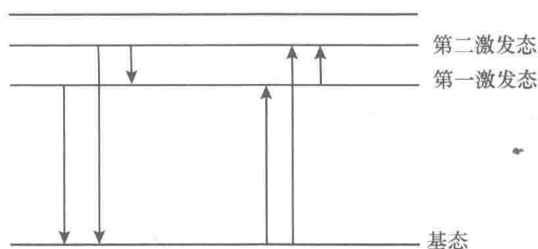


图 1-5 原子状态间的跃迁

式（1-8）与式（1-2）联立消去速度  $v$ ，可得电子运动的轨道半径：

$$r_n = 4\pi\epsilon_0 \frac{n^2 \hbar^2}{mZe^2}, \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (1-10)$$

对于  $Z=1$  的氢原子，在  $n=1$  时， $r_1 = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2}{mZe^2}$  称为第一轨道半径，通常用  $a_1$  表示。当  $n=2,3,4,\dots$  时，电子的轨道半径分别为  $r_2 = 4a_1, r_3 = 9a_1, r_4 = 16a_1, \dots$ ，电子的轨道半径只能取如此一系列的不连续值。

下面再计算与每一个圆形轨道相对应的原子的总能量。为此将式（1-10）代入式（1-3）得

$$E_n = -\frac{1}{(4\pi\epsilon_0)^2} \frac{m(Ze^2)^2}{2n^2 \hbar^2}, \quad n=1, 2, 3, 4, \dots \quad (1-11)$$

式中， $E_n$  是氢原子的内部能量，式（1-11）表示能量的数值是分隔的。电子在不连续的轨道上运动，原子所具有的能量也不是连续的，这种不连续的能量状态称为原子的能级（energy level）。

现在我们把式（1-10）表示的可能轨道和式（1-11）表示的可能能量用图 1-6 和图 1-7 表示出来。

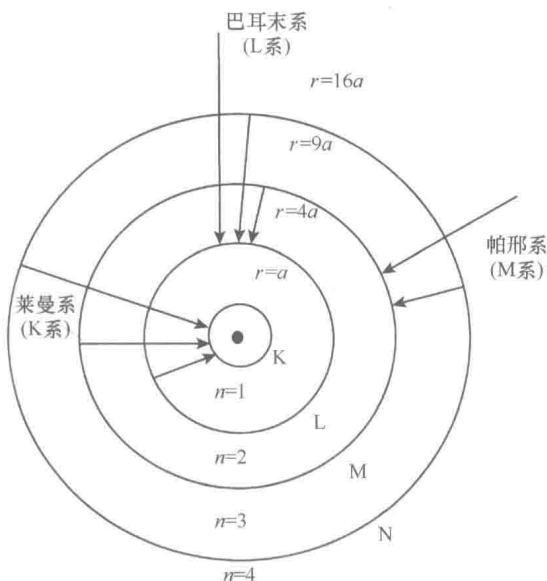


图 1-6 氢原子的电子轨道

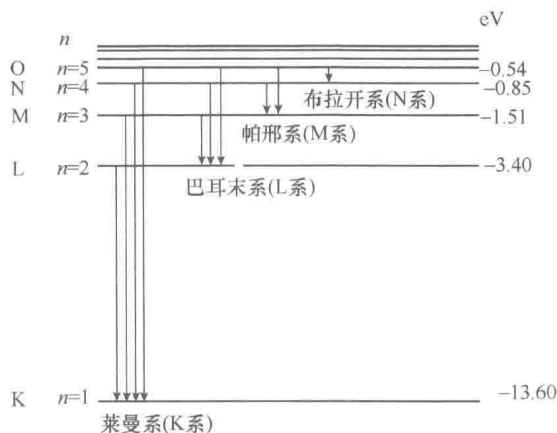


图 1-7 氢原子的能级



图 1-7 中每一条横线代表一个能级，横线之间的距离表示能级的间隔，即能量的差别。两图中每一能级与轨道的对应关系以同一量子数  $n$  表示出来。由推得的公式可知，轨道半径与  $n^2$  成正比，而能量  $E$  的绝对值与  $n^2$  成反比。由式 (1-11) 看出，能量仅是量子数  $n$  的函数，当  $n \rightarrow \infty$  时， $r \rightarrow \infty$ ，而  $E \rightarrow 0$ 。

当原子处于  $n=1$  的状态时，能量最低，也最稳定，称为基态 (ground state)； $n=2$  的能量状态称第一激发态 (excitation state)， $n=3$  的能量状态称第二激发态，…。处于激发态的原子不太稳定，容易跃迁到低激发态或基态。邻近轨道的间距随  $n$  的增加而增加，而邻近能级的间隔随  $n$  的增加而渐减，趋近于零。

求得氢原子的能量后，将式 (1-11) 代入式 (1-9)，求出波数的公式如下：

$$\tilde{\nu} = \frac{E_n - E_k}{hc} = \frac{2\pi^2 m (Ze^2)^2}{(4\pi\epsilon_0)^2 h^3 c} \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (1-12)$$

与式 (1-1) 比较得里德伯常数

$$R_H = \frac{2\pi^2 m e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 h^3 c} = 1.097373 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

这与实验所得的  $R_H = 1.0967758 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$  值符合较好。对于莱曼系  $k=1, n=2,3,4,\dots$ ，就是说，当氢原子从  $n=2,3,4,\dots$  各个能级跃迁到  $n=1$  的能级时辐射出莱曼系的各条谱线。应用玻尔理论所得的式 (1-12) 算出的氢原子光谱的波数与实验测得的值符合较好，这说明玻尔理论在解释氢原子光谱的实验规律方面是非常成功的。反过来也说明玻尔假定真实地反映了氢原子的内部情况。

我们要清楚，在图 1-6 上画出的那些轨道是可能的轨道，在图 1-7 上表示的那些能级是可能的能级。在任何时刻，一个原子中实现的只是一个轨道的电子运动，这个原子只具有与这个运动对应的一个数值的能量，也就是只有一个能级。电子从某一轨道跳到另一轨道的跃迁，也可以说原子从前一状态跃迁到后一状态。在进行实验时，实际观察的是大量原子。各种轨道的电子运动可以在不同的原子中分别实现，相应的各种能级在不同的原子上同时存在，各种轨道间，也就是对应的各种能级间的跃迁也可以在不同的原子中发生。况且观察总是持续一段时间，因此各种能级间的跃迁都可以观察到。所以说，各种光谱线看起来是同时出现的。

在两个图中都画出了各种谱线系的跃迁。从能级图可以看到各种谱线系的能级跃迁间距的差别，跃迁间距大，所发光的波长就短。这说明了为什么这些谱线系落在光谱的不同区域。在同一谱线系中，也是跃迁的能级间隔越大，谱线的波长越短，但随着跃迁间隔的增加，每次的增加量逐渐减少，趋近于零。这说明了为什么每一谱线系中谱线的间隔向着短波方向递减。

### (三) 核外电子结构

1. 原子的结构决定元素的性质 具体说就是原子中电子所处的状态。电子状态的具体内容由以下四个量子数所代表。

(1) 主量子数  $n$ ：原子核外的电子云是分层排布的，可用主量子数表示电子壳层。主量子数  $n$  取 1,2,3,⋯时，相应的电子壳层也可用 K、L、M、N、O、P、Q 等符号表示。 $n$  越大，说明电子距核越远，原子能级越高。因此，主量子数是决定原子能级的主要因素。

(2) 轨道角动量子数  $l$ ：原子中的任何一个电子在原子核附近空间出现的概率是有规律的，因此，电子云的大小形状也是有规律的。

实验表明：处于同一电子壳层中的电子，由于电子间的相互作用，可以有几种不同的运动状态，其能量会稍有不同。根据在同一电子壳层中电子所具有的能量及运动形式不同，又分成若干电子亚层，由轨道角动量子数  $l$  确定。在  $n$  确定后  $l$  可取 0,1,2,⋯,( $n-1$ )，有  $n$  个不同的值。对应的电子亚层用 s、p、d、f、g、h 等符号来表示。

主量子数  $n$  是决定原子能级的重要因素，而轨道角动量子数  $l$  对应的 s、p、d、f、g、h 等对原子能级也有一定的影响。所以电子壳层 (主量子数  $n$ ) 和亚层 (轨道角动量子数  $l$ ) 决定了原子所具有