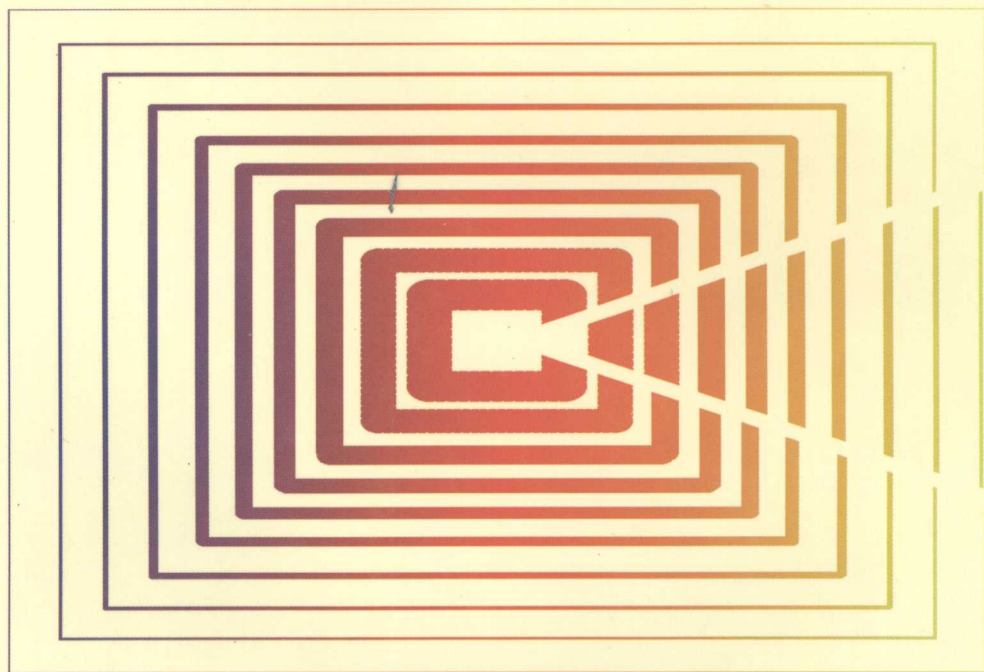


借
卫生部规划教材
全国高等职业技术教育教材
供高职、高专医学影像技术专业用

放射物理与防护

主编 李迅茹



人民卫生出版社

卫生部规划教材
全国高等职业技术教育教材
供高职、高专医学影像技术专业用

放射物理与防护

主 编 李迅茹

编 者 (以姓氏笔画为序)

王鹏程 (泰山医学院)

吉 强 (天津医科大学)

李迅茹 (北京卫生学校)

人 民 卫 生 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

放射物理与防护/李迅茹主编. —北京:
人民卫生出版社, 2002
ISBN 7-117-05088-8

I. 放… II. 李… III. ①放射医学: 物理学 - 高等学校: 技术学校 - 教材②放射医学 - 辐射防护 - 高等学校: 技术学校 - 教材 IV. ①R811.1②R14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 056833 号

本书内封采用黑色水印防伪标识印制。请注意识别。

放射物理与防护

主 编: 李 迅 茹

出版发行: 人民卫生出版社(中继线 67616688)

地 址: (100078)北京市丰台区方庄芳群园 3 区 3 号楼

网 址: <http://www.pmph.com>

E - mail: pmph@pmph.com

印 刷: 北京市卫顺印刷厂

经 销: 新华书店

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 10.75

字 数: 239 千字

版 次: 2002 年 8 月第 1 版 2002 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

标准书号: ISBN 7-117-05088-8/R·5089

定 价: 17.00 元

著作权所有, 请勿擅自用本书制作各类出版物, 违者必究
(凡属质量问题请与本社发行部联系退换)

全国高等职业技术教育医学影像专业 规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神,落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设的要求,满足高等职业技术教育医学影像技术专业的教学需要,卫生部教材办公室组织全国具有医学影像和医学影像技术专业教学经验和编写水平的教师,根据高等职业技术教育的培养目标,对其主干课程进行了规划和编写。

这套教材全面贯彻了素质教育的思想,从社会发展对高素质技术型人才需要的实际出发,重视对学生实践能力和创新精神的培养,突出实用性。教材编写过程中,在理论体系、内容结构和阐述方法等方面也做了一些尝试。特别注重和要求教材的内容要兼顾不同学制学生的水平和能力,要与助理执业医师考试及学生毕业后的实际工作相衔接。教材编写注重启发性,并注意到全套教材的整体优化。

本套教材共 8 种,其中《医学影像诊断学》、《医学影像检查技术》和《影像电子学基础》为教育部高职高专规划教材。

医学影像成像原理	主 编 李月卿
	副主编 李 萌
医学影像设备学	主 编 徐 跃
	副主编 黄泉荣
医学影像设备管理	主 编 李林枫
* 医学影像诊断学	主 编 祁 吉
	副主编 刘林祥
* 医学影像检查技术	主 编 袁聿德
	副主编 贾树春
放射物理与防护	主 编 李迅茹
放射治疗技术	主 编 王瑞芝
* 影像电子学基础	主 编 陈武凡
	副主编 邱松耀

* 教育部高职高专规划教材

前 言

本教材是由卫生部教材办公室规划并组织编写的全国高等职业技术教育医学影像技术专业教材。高等职业教育的培养目标是培养具有必要的理论知识和一定的实践技能的实用型技术人才，本书在编写过程中紧紧围绕这一培养目标，充分体现“基本知识必需、够用，强调技能”的教育特色，融传授知识、培养能力、提高素质为一体。

《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的专业课及继续教育奠定必要的基础。教材内容涉及学生将来工作所需的放射物理学、放射剂量学和放射防护学的知识。其中放射物理学是从物理的角度阐述放射线的发生、性质及与物质作用的规律，它是医学影像技术专业学生所必备的物理学基础。对于这部分知识，既要保证理论知识的够用，也要尽量避免内容过多、过深。放射剂量学除介绍辐射防护中所涉及的剂量、测量、监测等内容，还根据医学影像学科的发展加进了放射治疗剂量学的内容。放射线给人类带来巨大利益的同时，也带来了一定的危害，从事放射线工作的人员应了解放射线的这一特性，熟知国家的法规、标准，掌握自身和被检者的防护方法。所以本教材介绍了国际权威组织和我国现行的防护法规和标准。本教材建议教学 54 学时，其中理论 46 学时，实验 8 学时。各校可根据实际情况做适当调整。

本教材在编写过程中着重注意了以下几个方面：

1. 着眼于整个医学影像技术领域，涉及面广。不仅为毕业生从事普通 X 线摄影工作打下坚实的物理、防护学基础，也为学生将来从事医学影像的其他技术工作提供必不可少的知识。
2. 重视基本理论和基本实践技能的培养，重视培养学生分析问题和解决问题的能力。
3. 紧跟医学影像技术的发展，力争体现本专业的新知识、新技术、新概念及新法规。
4. 考虑高职学生的知识结构，编写时在保证教材有一定深度的基础上，注意内容安排由浅入深，循序渐进。

在本教材编写过程中，得到了多位专家的指导和同行的帮助，特别是中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所尉可道研究员，泰山医学院袁聿德教授和谢晋东博士对本教材的编写提出了许多宝贵意见。在此，谨向所有关心、支持、帮助和指导本书编写工作的同志们致以诚挚的谢意。

由于本书是医学影像技术专业第一轮高等职业规划教材，缺乏可借鉴的经验，而内容所涉及的专业知识又非常广泛，书中难免存在缺点和不足，恳请使用本教材的教师、学生以及广大从事本专业工作的同志批评指正。

编 者

2002 年 7 月

目 录

第一章 物质的结构	1
第一节 原子结构	1
一、初期理论的实验基础	1
二、玻尔的原子模型	3
三、核外的电子结构	7
第二节 原子核结构	9
一、原子核组成	9
二、原子核结合能	9
第二章 核转变	12
第一节 放射性核素衰变类型	12
一、 α 衰变	12
二、 β 衰变	13
三、 γ 衰变和内转换	14
第二节 原子核的衰变规律	15
一、衰变规律	15
二、衰变平衡	17
第三章 X线产生	20
第一节 X线的发现	20
第二节 X线的本质与特性	21
一、X线的本质	21
二、X线的基本特性	22
第三节 X线的产生装置	23
一、X线的产生条件	23
二、X线的产生装置	23
第四节 X线的产生原理	24
一、电子与物质的相互作用	24
二、X线的产生原理	25
第五节 X线的量与质	31
一、概念及其表示方法	31
二、影响X线量和质的因素	32
第六节 X线的产生效率	34

第七节 X 线强度的空间分布	35
一、薄靶周围 X 线强度的空间分布	35
二、厚靶周围 X 线强度的空间分布	36
第四章 X (或 γ) 射线与物质的相互作用	39
第一节 概述	39
一、X 线与物质相互作用的几率	40
二、射线的衰减	40
三、能量转移和吸收	42
第二节 X 线与物质相互作用的主要过程	43
一、光电效应	43
二、康普顿效应	46
三、电子对效应	49
第三节 X 线与物质相互作用的其他过程	50
一、相干散射	50
二、光核作用	51
第四节 各种作用发生的相对几率	51
一、X 线引发效应总结	51
二、Z 和 $h\nu$ 与三种基本作用的关系	51
三、在诊断放射学中各种基本作用发生的相对几率	52
第五章 X (或 γ) 射线在物质中的衰减	54
第一节 单能 X 线在物质中的衰减规律	54
一、窄束 X 线在物质中的衰减规律	54
二、宽束 X 线在物质中的衰减规律	56
第二节 连续 X 线在物质中的衰减规律	57
一、连续 X 线在物质中的衰减特点	57
二、影响 X 线衰减的因素	58
三、X 线的滤过	60
第三节 诊断放射学中 X 线的衰减	63
一、人体的构成元素和组织密度	63
二、X 线通过人体的衰减规律	63
第六章 常用的辐射量和单位	66
第一节 描述电离辐射的常用辐射量和单位	66
一、描述辐射场性质的量	66
二、照射量	68
三、比释动能	69
四、吸收剂量	70

501	五、吸收剂量、比释动能及照射量之间的关系和区别	71
502	第二节 辐射防护中使用的辐射量和单位	74
503	一、当量剂量	74
	二、有效剂量	75
504	三、集体当量剂量和集体有效剂量	77
505	四、待积当量剂量和待积有效剂量	78
506	第七章 放射线的测量	79
507	第一节 照射量的测量	79
508	一、自由空气电离室	79
509	二、实用型电离室	80
510	三、电离电荷测量电流	82
511	第二节 吸收剂量的测量	82
512	一、吸收剂量的基本测量法	82
513	二、电离室测量法	83
514	三、吸收剂量的其他测量方法	87
515	第三节 射线质的测定	89
516	一、400kV 以下 X 线质的测定	89
517	二、高能 X 线能量的测定	89
518	三、高能电子束能量的测定	90
519	第八章 放射线对人体的影响	91
520	第一节 放射线在医学上的应用	91
521	一、X 线在诊断方面的应用	91
522	二、放射线在治疗方面的应用	94
523	三、放射性核素在诊断和治疗方面的应用	94
524	第二节 放射线产生的生物效应	95
525	一、确定性效应	95
526	二、随机性效应	96
527	第三节 胎儿出生前受照效应	99
528	一、胚胎死亡	99
529	二、畸形	99
530	三、智力低下	99
531	四、诱发癌症	99
532	第四节 皮肤效应	100
533	一、急性放射性皮肤损伤	100
534	二、慢性放射性皮肤损伤	100
535	三、放射性皮肤癌	101
536	第五节 影响放射损伤的因素	102

15	一、与电离辐射有关的因素	102
15	二、与机体有关的因素	102
15	三、环境因素	103
25		
	第九章 放射治疗剂量学	104
	第一节 基本概念	104
	一、放射治疗常用的放射源及照射方式	104
95	二、放射治疗物理学有关的名词	105
95	三、射线中心轴上百分深度剂量	105
95	四、射线中心轴上组织空气比	108
08	五、组织最大比	109
5	第二节 放射治疗剂量计算实例	110
5	第三节 近距离放射治疗剂量学	111
13	一、辐射源	111
13	二、放射源周围的剂量分布	112
13	三、腔内治疗剂量学	113
13	四、组织间治疗剂量学	115
98		
	第十章 放射防护法规与标准	116
04	第一节 放射防护法规	116
	第二节 放射防护标准	116
10	一、标准的概念	116
10	二、标准的发展	117
10	三、医用放射防护标准	117
44	第三节 放射防护标准介绍	118
40	一、我国现行放射防护标准	118
20	二、ICRP 1990 年建议书关于放射防护标准的建议	120
20	三、IBSS 限值	121
60	第四节 放射防护法规与标准的贯彻实施	121
09	一、放射工作单位自主管理	121
09	二、卫生行政部门监督管理	122
60		
	第十一章 放射线屏蔽防护	124
04	第一节 外照射防护的基本方法	124
001	一、时间防护	124
001	二、距离防护	124
001	三、屏蔽防护	124
10	第二节 屏蔽材料	125
101	一、对屏蔽材料的要求	125

二、常用屏蔽防护材料	125
第三节 屏蔽厚度的确定方法	127
一、确定屏蔽厚度的依据	127
二、屏蔽厚度的计算	128
第十二章 医用放射线的防护	134
第一节 医用诊断 X 线的防护	134
一、防护原则	134
二、诊断 X 线机防护性能要求	134
三、放射防护设施	135
四、防护操作	137
五、妇女 X 线检查的防护	138
六、儿童 X 线检查的防护	140
第二节 医用治疗放射线的防护	140
一、医用加速器的防护	140
二、医用 γ 照射远距离治疗的防护	141
三、放射治疗中对患者的防护	142
第三节 放射防护监测	143
一、场所放射防护监测	144
二、个人剂量监测	144
第十三章 放射防护管理	147
第一节 防护管理机构	147
第二节 申请许可制度	147
一、许可登记管理制度	147
二、放射工作单位必备的条件	148
第三节 防护管理内容	148
一、X 线机的生产	148
二、射线防护器材	149
三、防护知识培训	149
四、健康管理	150
五、放射事故管理	151
六、质量保证	153
七、档案管理	154
实验一 半价层的测量	155
实验二 X 线机输出量的测量	156
实验三 透视 X 线机防护区照射量率的测试	157
实验四 铅当量的测量	159

第一章 物质的结构

第一节 原子结构

一、初期理论的实验基础

在二十世纪初，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二分之一。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，它具有氢原子那样的质量，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。

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，卢瑟福等人进行了 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。

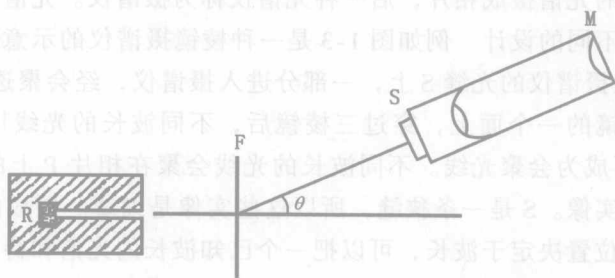


图 1-1 观测 α 粒子散射的仪器装置示意图

α 粒子散射实验所用仪器的装置大致如图 1-1 所示。R 为被一铅块包围的 α 粒子源，它发射的 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。荧光屏是玻璃片上涂荧光物硫化锌制成的，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就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。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 为电子与正电体的距离。

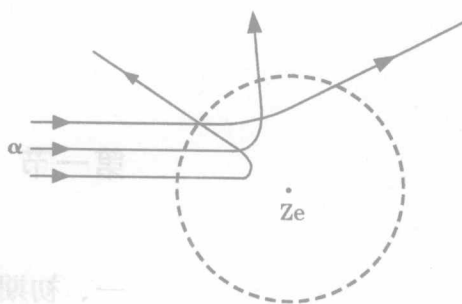


图 1-2 α 粒子在原子的核式模型中的散射

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为 $10^{-15} \sim 10^{-14}$ 米，而原子半径是 10^{-10} 米，所以称为原子核。他提出的原子模型因而称核式模型。

(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，落在三棱镜的一个面上，穿过三棱镜后，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 上形成一系列的 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，测出两光谱的谱线的位置，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。

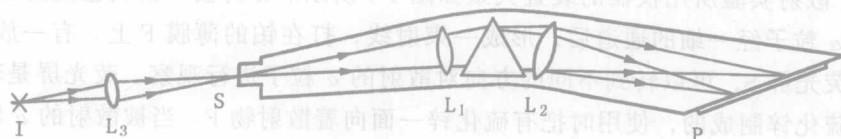


图 1-3 棱镜摄谱仪示意图

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)的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。

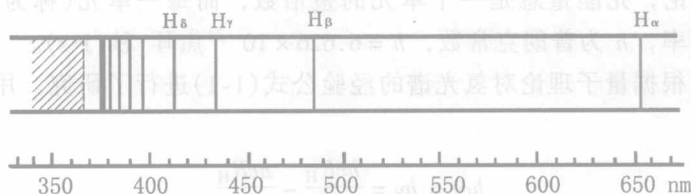


图1-4 氢原子光谱的巴耳末系和系限外边的连续谱

在1885年从某些星体的光谱中观察到的氢光谱线已达14条。这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 $B = 364.56$ 纳米(nm)。后人称这公式为巴耳末公式,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,巴耳末公式可改列如下

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

或

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

式中的常数 $R_H = 4/B$, 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;还有三个在红外区,分别由帕邢、布喇开、普丰特发现。这些谱线系可用一个通式表达为

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

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。

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是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年原子的核式结构被证实后,人们了解到半径大约为 10^{-10} 米的原子中有一个带正电的核,它的半径是 10^{-15} 米的数量级。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,这样就自然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} 米的数量级。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， $h = 6.626 \times 10^{-34}$ 焦耳·秒(J·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(1-1)式就得到

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

上式显出清楚的物理意义。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，用上式与(1-2)式比较可以得到这样简单关系：

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

n 是整数，上式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

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

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：

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

体系的势能：

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

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，那么：

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

原子的能量等于(原子核的动能等于零)：

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

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(1-6)式可见， r 越大 E 越大(绝对值越小)，半径大的轨道代表大能量。(1-6)式只表示了 E 和 r 的关系，对 r 值，乃至对 E 值，没有其他任何限

制。

由(1-4)和(1-6)二式可得

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

由上式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一个光子的能量如(1-3)式所示。

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 、……，当原子处在任一稳定能态时，电子绕原子核作圆周运动，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 \hbar 的整数倍的那些轨道才是可能的，即

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

式中， $n = 1, 2, 3, \dots$ 称为量子数； $\hbar = h/2\pi$ 。上式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，其频率由下式决定

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

此式称为波尔的频率条件。

波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 ……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。

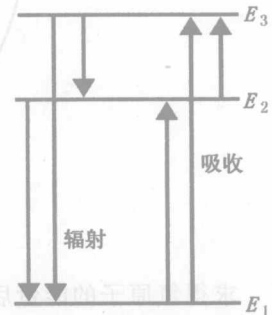


图 1-5 原子状态间的跃迁

(二) 氢原子的波尔理论

波尔的假定是否正确，即原子内部的规律性是否就象波尔假定的那样，需进一步证明。因此，必须在假定基础上建立理论，去解释原子光谱的实验规律。

(1-8)式与(1-5)式联立消去速度 v ，可得电子运动的轨道半径

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

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 $r_2 = 4a_1$ ， $r_3 = 9a_1$ ， $r_4 = 16a_1$ ，……，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(1-10)式代入(1-6)式得：

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

E_n 是氢原子的内部能量，此式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。现在我们把(1-10)式表示的可能的轨道和(1-11)式表示的可能的能量用图 1-6 和图 1-7 表示出来。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(1-11)式看出，能量仅是量子数 n 的函数，当 $n \rightarrow \infty$ 时， $r \rightarrow \infty$ [见公式(1-10)]，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； $n=2$ 的能量状态称第一激发态， $n=3$ 的能量状态称第二激发态等等。处于激发态的原子，不太稳定，容易跃迁到低激发态或基态。又邻近轨道的间距随 n 的增加而增加，而邻近的能级的间隔随 n 的增加而渐减，趋近于零。

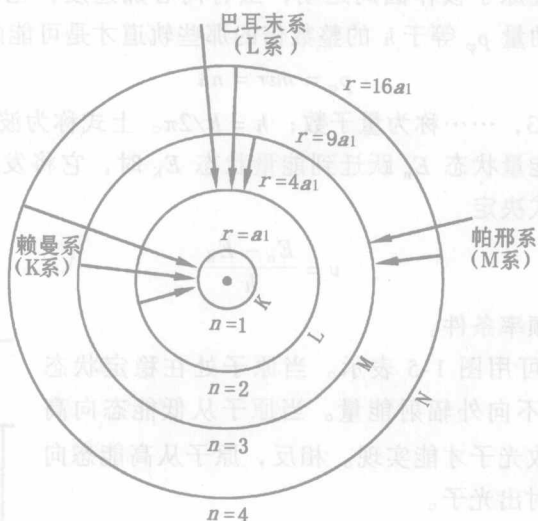


图 1-6 氢原子的电子轨道

求得氢原子的能量后，将(1-11)式代入(1-9)式求出波数的公式如下

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

与(1-1)式比较得知德伯常数

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

这与实验所得的 $R_H = 1.0967758 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ 值符合很好。对于赖曼系 $K=1$ ， $n=2, 3, 4, \dots$ ，就是说，当氢原子从 $n=2, 3, 4, \dots$ 各个能级跃迁到 $n=1$ 的能级时辐射出赖曼系的各条谱线。应用玻尔理论所得的公式(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。

必须了解，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，这原子只具

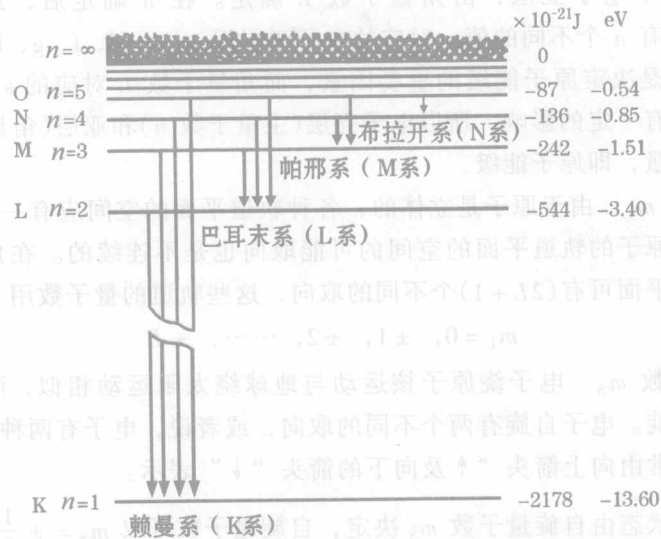


图 1-7 氢原子的能级

有与这运动对应的一个数值的能量，也就是只是一个能级。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。这就是说，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、核外的电子结构

(一) 空间量子化

1. 主量子数 n 原子核外的电子云是分层排布的，电子壳层可用主量子数表示。主量子数 n 取 1, 2, 3, ……等数值时，相应的电子壳层也可用 K、L、M、N、O、P、Q 等符号表示。 n 愈大，说明电子距核愈远，原子能级愈高。因此，主量子数是决定原子能级的主要因素。

2. 角量子数 L 原子中的任何一个电子在原子核附近空间出现的几率大小是有规律的，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，其能量也稍有不同。根据在同一电子壳层中电子所具有的能量及运动形式