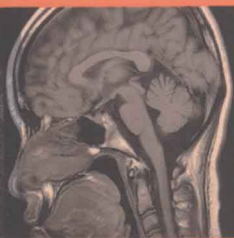
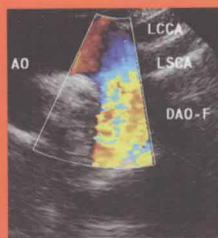


全国高等学校配套教材
供医学影像和预防医学专业用

医用放射防护学



主编 洪 洋 谢晋东



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

全国高等学校教材
医学影像学系列教材

医用放射防护学

主编 王 宇 副主编 王 宇

人民卫生出版社

全国高等学校配套教材
供医学影像和预防医学专业用

医用放射防护学

主 编 洪 洋 谢晋东

编 委 (以姓氏笔画为序)

王亚平 (辽宁医学院)	张 翼 (右江民族医学院)
王佐周 (中国医科大学)	张惠英 (华北煤炭医学院)
仇 惠 (牡丹江医学院)	胡克微 (中国医科大学)
甘 平 (重庆医科大学)	洪 洋 (中国医科大学)
刘东华 (新乡医学院)	盖立平 (大连医科大学)
李绍新 (广东医学院)	谢晋东 (泰山医学院)
吴晓波 (南京医科大学)	

人民卫生出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

医用放射防护学/洪洋等主编. —北京: 人民卫生出版社, 2011. 3

ISBN 978 - 7 - 117 - 14005 - 8

I. ①医… II. ①洪… III. ①放射医学 - 辐射防护 - 教材 IV. ①R14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 001919 号

门户网: www.pmph.com	出版物查询、网上书店
卫人网: www.ipmph.com	护士、医师、药师、中医师、卫生资格考试培训

版权所有, 侵权必究!

医用放射防护学

主 编: 洪 洋 谢晋东

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 - 67605754 010 - 65264830

010 - 59787586 010 - 59787592

印 刷: 北京机工印刷厂

经 销: 新华书店

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 13

字 数: 307 千字

版 次: 2011 年 3 月第 1 版 2011 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

标准书号: ISBN 978 - 7 - 117 - 14005 - 8/R · 14006

定 价: 23.00 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销售中心联系退换)

前 言

本教材的编写,正值临床医学影像设施不断更新,微创、介入等医疗手段被广泛应用的今天,我们看到借助于电离辐射的诊断和治疗技术更为迅速地发展,已成为现代医学的重要组成部分。然而值得警惕的是,对于放射性医学实践的防护意识、概念及专业知识,不仅现在的临床医学专业学生近乎空白,而且对可能接触到放射线的非放射影像专业医护人员也是普遍缺乏的。此外,即便是医学影像和预防医学专业的学生,虽然大多数学校已开设电离辐射防护课程,但教学内容、要求和课程设置都很难规范,有的学校由医学物理、公共卫生专业的教师承担;还有的是放射科、核医学科的医生讲授;也有学校干脆将课程拆散到各单科影像课中。同时,医用放射防护类课程也缺少合适的教材。因此,有必要加强医用放射防护学课程建设和教材的规范化建设,在专业人才培养过程中搭建起更为系统、合理的知识结构,以适应现代医学发展的需求。

放射防护学属于预防医学的一个分支,是一门近代综合性交叉学科。它主要研究人类避免或减少放射性危害的理论依据、技术手段和实践方法。医用放射防护学则重点研究在临床医学大幅增加使用电离辐射诊治频率的今天,如何科学地在医疗实践中进行放射防护,避免或减少医疗照射对人类造成的危害和损伤。

本教材由全国 11 所高等医学院校的一线专业教师共同编写。全书根据新时期科学发展对医学影像和预防医学专业人才的要求,从新的视角全面介绍了放射卫生学基础理论和医学影像中的辐射防护知识。包括:放射物理学的基本概念和规律;电离辐射与物质作用的特征性质;放射防护中的电离辐射评价与测量;电离辐射的生物学效应;放射防护法律法规及其基本原则和方法等内容。该书从辐射发生的原子物理学和核物理基础理论出发,一直延伸到不久前 ICRP 第 103 号出版物及其建议书颁布的最新放射防护体系。其内涵集基础理论、实验技术和法规标准于一体,为医学物理、影像技术、核医学、预防医学和监审管理多学科交叉的专业性及综合性教材。这种基础与前沿同位并重的专业特征要求我们尽可能地拓宽知识广度,注重理论与实践相结合,以完成培养相应专业合格的应用技术人才的目标。

2 年前 ICRP 第 103 号出版物颁布到中国。此间编者认真领会了新建议书的内涵,并将此融入本教材编写中,包括一些新定义、新方法和新数据。希望能体现出电离辐射防护的时代特征。全书着力体现“教材”的模式,更适合于课堂教学和学生阅读理解。比如,在书中各章的前面都分三个层次(熟练掌握、掌握理解和了解)介绍了本章的教学要求;每章的后面都加设了习题及参考答案,以便于学生消化、理解和复习应用。该部教材内容

由浅入深,循序渐进,既考虑到学生的起点,又注重新知识的介绍。

本教材所适用的理论课教学学时范围为 20 ~ 48 学时,用书单位可根据本学校、本专业特色以及与其他课程的总体知识分布格局进行调整。该教材适用于医学影像专业和预防医学专业的本科及高职技术专科学学生作为专业必修课教材,也可以作为临床医学和生物工程或生物技术等专业学生的选修课教材,以及医护人员和生物医学技术人员作为参考用书使用。

本教材编写期间,中国医科大学的俞航老师、周玲老师和杨金有老师均做了大量工作,在此一并致谢!作为新时期医学院校放射防护教学改革的一种尝试,我们真诚地希望得到各位专家、教授、同行的支持与帮助。由于编者水平有限,书中的缺点和错误在所难免,恳请广大读者给予指正。

编 者

2010 年 10 月

目 录

第一章 原子物理基础	1
教学基本要求	1
第一节 原子结构	1
一、卢瑟福的原子模型	2
二、玻尔的氢原子模型	3
三、核外电子结构	7
第二节 原子核	9
一、原子核的稳定性	9
二、放射性核素的衰变类型	11
三、放射性核素的衰变规律	15
四、人工放射性核素	19
习题一	21
第二章 X射线的产生	23
教学基本要求	23
第一节 X射线的基本特性	23
一、X射线的特征	23
二、X射线的本质	25
第二节 X射线发生装置	25
一、X射线管的阴极与阳极	27
二、X射线管的焦点	28
第三节 X射线的产生机制	29
一、电子与物质的相互作用	29
二、连续X射线	30
三、标识X射线	32
第四节 X射线辐射场的空间分布	34
一、X射线强度	34
二、X射线强度的空间分布	36
习题二	38
第三章 电离辐射与物质的相互作用	40

教学基本要求	40
第一节 电离辐射的来源与分类	40
一、电离辐射的来源	40
二、电离辐射的分类	42
第二节 带电粒子与物质的相互作用	43
一、带电粒子与物质相互作用的主要方式	43
二、总质量阻止本领	44
三、质量角散射本领	44
四、射程	44
五、传能线密度	45
第三节 X(γ)射线与物质的相互作用	46
一、光电效应	47
二、康普顿效应	49
三、电子对效应	52
四、X(γ)射线与物质的其他相互作用过程	52
五、各种相互作用的相对权重	53
第四节 X(γ)射线在物质中的衰减	54
一、X(γ)射线与物质相互作用系数	54
二、X(γ)射线在物质中的衰减规律	57
三、X(γ)射线在人体内的衰减	60
习题三	63
第四章 辐射量与单位	65
教学基本要求	65
第一节 描述辐射场性质的辐射量	65
一、粒子注量	65
二、能量注量	66
三、粒子注量与能量注量的关系	67
第二节 照射量	67
一、照射量及其单位	67
二、照射量与能量注量的关系	68
第三节 比释动能和吸收剂量	69
一、比释动能及其单位	69
二、吸收剂量及其单位	69
第四节 吸收剂量、比释动能与照射量间的关系	71
一、电子平衡	71
二、照射量与比释动能的关系	72
三、照射量与吸收剂量的关系	72
四、比释动能与吸收剂量的关系	74

第五节 辐射防护中使用的辐射量	75
一、当量剂量	76
二、有效剂量	77
三、集体当量剂量和集体有效剂量	79
四、待积当量剂量和待积有效剂量	79
习题四	80
第五章 电离辐射的基本测量	82
教学基本要求	82
第一节 电离室工作的基本原理	82
一、自由空气电离室	82
二、指形电离室	84
三、电离室的工作特性	85
四、特殊电离室	87
第二节 电离室测量吸收剂量的原理	88
一、中低能 X(γ) 射线吸收剂量的测量	88
二、高能辐射吸收剂量的测量	89
三、吸收剂量测量的校准	90
第三节 吸收剂量的其他测量方法	92
一、量热法	92
二、化学剂量计法	93
三、热释光剂量计法	94
四、胶片剂量测定法	95
五、半导体剂量计法	96
第四节 放射性计数测量	97
一、放射性探测器	97
二、GM 计数管	97
三、闪烁计数器	98
习题五	100
第六章 电离辐射的生物效应	101
教学基本要求	101
第一节 辐射对人体的影响	101
一、随机效应和确定效应	102
二、躯体效应和遗传效应	104
三、近期效应和远期效应	105
四、小剂量电离辐射的生物效应	106
五、辐射危险性的估计	107
第二节 辐射损伤效应及影响因素	108

一、胎儿出生前的受照影响	109
二、急、慢性放射病	110
三、外照射致放射损伤	111
四、影响辐射损伤的物理、化学因素	112
五、影响辐射损伤的生物学因素	115
第三节 电离辐射损伤机制	117
一、直接作用与间接作用	117
二、原初过程与时间进程	118
三、辐射与自由基	120
四、靶理论	121
五、生物靶的调节作用	122
习题六	125
第七章 电离辐射防护的基本原则和标准	127
教学基本要求	127
第一节 放射防护法规与标准	127
一、放射防护法规与标准的概念	127
二、放射防护标准的建立	128
第二节 电离辐射防护的基本原则	131
一、辐射防护的目的	131
二、辐射防护的基本原则	132
三、医疗照射防护的基本原则	133
第三节 放射防护体系	134
一、照射情况分类	134
二、照射群类别	135
三、照射和潜在照射剂量约束	136
四、医疗照射防护体系	136
习题七	140
第八章 外照射防护	142
教学基本要求	142
第一节 外照射防护基本方法	142
一、时间防护	142
二、距离防护	142
三、屏蔽防护	143
第二节 外照射防护的屏蔽设计	143
一、辐射类型	143
二、屏蔽材料	144
三、影响屏蔽厚度的因素	145

四、计算屏蔽厚度的方法	147
第三节 医用诊断 X 射线防护	152
一、受检者剂量评估与控制	152
二、减少职业照射的防护	155
三、X 射线防护设施	155
第四节 介入放射学的安全与防护	156
一、介入放射环境的辐射剂量及估算方法	157
二、介入放射学的防护内涵	160
习题八	163
第九章 内照射防护	164
教学基本要求	164
第一节 内照射剂量特征	164
一、放射治疗使用的源及照射方式	164
二、核医学用放射性核素的特点	165
三、体内照射——近距离放射治疗的剂量分布	166
第二节 内照射剂量的估算	168
一、内照射途径	168
二、放射性核素摄入量的估算方法	169
三、内照射剂量的估算方法	172
第三节 核医学诊断的医疗照射参考水平	173
第四节 内照射防护的基本措施与方法	175
一、内照射防护的基本措施	175
二、放射性工作场所及工作条件	176
习题九	178
第十章 放射防护的监测与管理	180
教学基本要求	180
第一节 放射防护监测	180
一、医疗照射场所的防护监测	180
二、个人剂量监测	181
三、剂量监测方法	182
第二节 放射防护管理机构	182
第三节 申请许可制度	183
一、许可登记管理制度	183
二、从事放射工作单位的必备条件	183
第四节 放射防护管理的内涵	184
一、放射防护知识培训	184
二、放射器材的使用与管理	184

目 录

三、放射工作人员健康追踪	185
四、放射事故处理	187
五、质量保证	189
六、档案管理	190
习题十	190
参考文献	192
索引	194

原子物理基础

教学基本要求

1. 熟练掌握放射性衰变的基本类型和基本规律。
2. 确切理解源于原子核内外放射线产生的原子物理基础。
3. 理解卢瑟福的原子模型结构、玻尔氢原子理论和原子核的稳定性与放射性的关系。
4. 了解多电子原子的核外电子结构和状态参量的物理意义。

放射线是怎样产生的？为什么有些物质具有放射性，而有些物质没有？这些均取决于组成物质的最基本单元的结构、状态等物理性质。因此，我们认识放射性的本质需从原子物理学基础入手。

古希腊哲学家认为物质由简单的、不可分割的基本单元构成，即“原子”，这是原始的原子学说。1666年牛顿发现光谱，这一物理方法成为探索原子结构的重要手段。但原子物理学的重要进展是在19世纪。1808年道耳顿从化学定比定律上，开启了原子学说的门径；1833年法拉第电解定律的提出，显示了电荷存在基本单元；而光谱资料在19世纪最后20年得以大量积累，尤其是1885年巴耳末发现氢光谱线系的规律，以及1897年汤姆逊证明电子的存在等。1900年，普朗克把多人关于黑体辐射的研究成果进一步研究后，提出了量子论；1907年，汤姆逊提出“葡萄干蛋糕”式原子结构模型；1911年，卢瑟福提出并证实了原子的核式结构；1913年，玻尔又发表了氢原子理论，这些理论和实验都为人们科学地认识原子结构奠定了基础。

第一节 原子结构

20世纪初叶，原子是组成物质的最小微粒已被证实，但是原子内部是怎样的结构呢？实验发现，电子是一切原子的组成部分，可见原子并非不可再分割。由于物质通常是中性的，原子中一定有带正电的部分。通过对电子的荷质比 e/m 的测量，可知电子的质量差不多是原子质量的 $1/2000$ 。1907年英国科学家汤姆逊(J. J. Thomson)根据上述资料，提出了原子的“葡萄干蛋糕模型”。他认为原子中的带正电部分是一个具有弹性的、冻胶状的、半径为 10^{-10}m 的实球体，正电荷均匀分布其中，在球内或球上有负电子嵌着，电子能在它们的平衡位置上作简谐振动。但其后几年勒纳特(Lenard)等进行了电子在金属膜上的散

射等多次实验,试图证实汤姆逊模型均未成功。1909年,卢瑟福(E. Rutherford)通过 α 粒子散射实验则否定了汤姆逊葡萄干蛋糕假说,并于1911年提出了原子核式结构模型。

一、卢瑟福的原子模型

(一) α 粒子的散射实验

卢瑟福及其一同工作者盖革(H. Geiger)和马斯顿(E. Marsden)等同样为验证汤姆逊的模型,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 粒子偏转角度大于 90° ,其中有个别粒子偏转角度接近 180° 。

α 粒子散射实验所用仪器装置如图1-1所示。其中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。M为一带有荧光屏S的放大镜,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质硫化锌制成的,使用时,把涂有硫化锌的一面朝向散射物T。当被散射的 α 粒子打在荧光屏上,就会发出微弱的闪光。通过放大镜M观察闪光就可记下在某一时间内某一方向散射的 α 粒子数。从 α 粒子源到荧光屏之间呈真空状态。

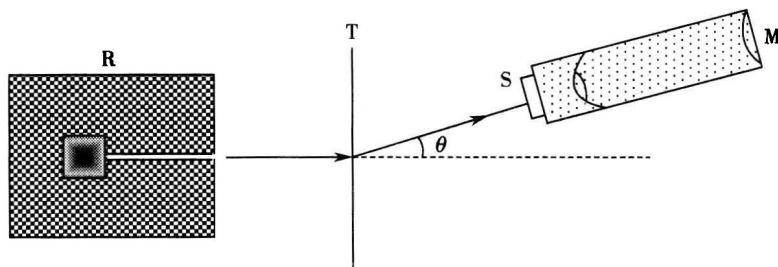


图1-1 观测 α 粒子散射的仪器装置示意图

(二) 卢瑟福的核式模型

α 粒子是从放射性物体中发射出来的快速粒子,后来证明它就是氦原子核,是电子质量的7300倍。按照汤姆逊的模型,正电荷是均匀的, α 粒子的散射主要是受电子的作用,而电子的质量与 α 粒子的相比是很小的, α 粒子只经受很小的偏转。大角散射不可能解释为都是偶然性的小角散射的累积,这种可能性要比 $1/8000$ 小得多。绝大多数散射是一次碰撞的结果,这不可能在汤姆逊模型那样的原子中发生。此时,卢瑟福考虑到,大角散射只能是原子中正电物质引起的,并且原子的所有正电荷会不会集中在原子的中心,只占有一个很小的范围呢?如果这样,鉴于原子对 α 粒子的作用力为库仑力, α 粒子愈靠近原子的中心,作用力越大。大角散射,正是 α 粒子靠近原子中心所发生的。

基于以上的分析,卢瑟福于1911年提出一个符合散射实验的假定:原子的所有正电荷以及原子的几乎全部质量都集中在原子中心一个很小的范围内,这个很小的范围就是原子核;原子的体积实际是电子的分布范围。电子围绕核转动,类似大行星绕太阳转动。这种模型叫作原子的核式模型,又称行星模型。

当 α 粒子接近原子时,它受电子作用引起运动的改变不大,但它受正电体的作用就不同了。由于正电体很小, α 粒子进入原子区域,但它还在正电体之外,整个正电体对它

起作用,因此受正电体的力是

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

式 1-1 中 r 为电子与正电体之间的距离, e 为电子电量, Z 为原子序数, ϵ_0 为真空中的介电常数。由于正电体很小, 所以 r 可以很小, 力 F 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, 根据他的理论, 从实验观察到的散射角可以推算带正电体的大小, 结果得出值很小, 约为 $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{ m}$, 而原子半径为 10^{-10} m , 所以称为原子核。

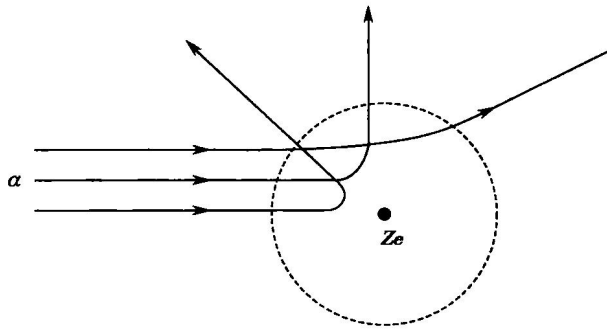


图 1-2 α 粒子在原子的核式模型中的散射

二、玻尔的氢原子模型

(一) 氢原子光谱的规律性

原子有核模型建立以后, 人们更想知道电子如何在原子核外运动, 以及这些运动规律与已经知道的原子光谱规律性间的联系。光谱的观察为此项研究提供了大量资料。

光谱是电磁辐射(包括可见区或在可见区以外)的波长成分和(或)强度分布的记录。光谱分为线状谱、带状谱和连续谱。原子光谱为线状谱, 每条谱线代表一个波长。从氢气放电管可获得氢原子光谱, 该光谱的很多谱线构成一个有规律的系统, 谱线的间隔和强度都向着短波方向递减。图 1-3 是氢原子的光谱的一个谱线系, 即巴耳末系。其中 H_α 是明亮的红线, H_β 、 H_γ 、 H_δ 分别是黄绿线、蓝线和紫线, 其余谱线在紫外区。

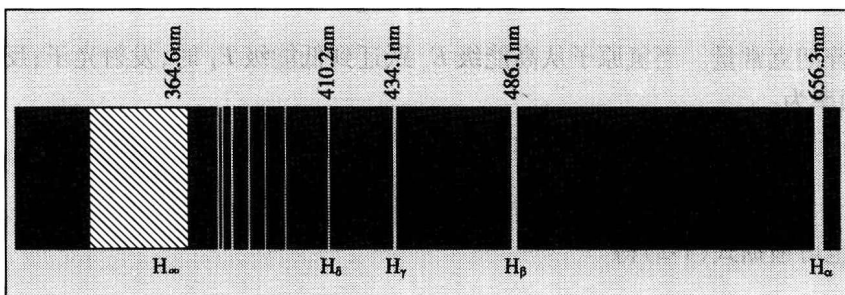


图 1-3 氢原子光谱的巴耳末系和系限外的连续谱

1885年,巴耳末首先发现了氢原子的可见光部分的光谱经验公式。氢原子光谱的其他线系也先后被发现,这些谱线系也像巴耳末系一样可用类似的公式表达。氢原子光谱的经验公式可以表达为

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

式中 $\tilde{\nu}$ 是波长 λ 的倒数,称为波数; $R_H = 1.0967758 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$,称为里德伯常数; $m = 1, 2, 3, \dots$,对于每一个 $m, n = m + 1, m + 2, m + 3, \dots$,构成一个谱线系。比如: $m = 1, n = 2, 3, 4, \dots$ 的谱线分布在紫外区,称作赖曼系; $m = 2, n = 3, 4, 5, \dots$ 为可见光部分,称作巴耳末系;还有三个在红外区,分别为帕邢系 $m = 3, n = 4, 5, 6, \dots$;布喇开系 $m = 4, n = 5, 6, 7, \dots$ 和普丰特系 $m = 5, n = 6, 7, 8, \dots$ 。

令 $T(m) = \frac{R_H}{m^2}, T(n) = \frac{R_H}{n^2}$,则有 $\tilde{\nu} = T(m) - T(n)$, T 称为光谱项。

由上分析可知,氢原子光谱具有如下特征:

1. 氢原子光谱是线状的,谱线有一定位置,有确定的波长值,而且是彼此分立的。
2. 谱线间有一定的关系。
3. 每一谱线的波数都可以表达为两光谱项之差。

(二) 玻尔假设

按照经典理论,卢瑟福原子模型的电子应绕核旋转,作加速运动。这样,电子将不断向四周辐射电磁波,它的能量不断减小,从而将逐渐靠近原子核,最后落入原子核中。所以经典理论的原子是一个不稳定系统。其中的轨道及转动频率不断变化,辐射电磁波频率也是逐渐改变的,原子光谱应是连续谱。但氢原子光谱实验表明原子相当稳定,原子光谱也是不连续的谱线。

为了解决上述困难,1913年玻尔(N. Bohr)在卢瑟福核式模型基础上,将普朗克的量子化概念应用到原子系统,结合光谱项定义,提出3个基本假设:

1. 定态假设 原子系统只能处于一系列分立的能量状态。在这些状态下,电子绕核作加速运动,但并不辐射电磁波。这些状态称为原子系统的稳定状态,简称定态。相应的能量分别是 $E_1, E_2, E_3, \dots (E_1 < E_2 < E_3 < \dots)$ 。

2. 频率条件 原子从一个定态向另一个定态跃迁时,要辐射或吸收电磁波,其频率由两定态的能级差决定,即

$$h\nu = E_n - E_k \quad (1-3)$$

式中 h 为普朗克常量。当氢原子从高能级 E_n 跃迁到低能级 E_k 时,发射光子;反之吸收光子,光子频率为

$$\nu = \frac{E_n - E_k}{h} \quad (1-4)$$

光子频率也可根据式(1-2)得

$$\nu = \tilde{\nu} c = R_H \left[\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right] c \quad (1-5)$$

将上式乘以普朗克常量可得两定态的能级差。

3. 量子化条件 在电子绕核转动时,必须满足电子的角动量量子化条件,即角动量的数值只能取 $\hbar = h/2\pi$ 的整数倍,即

$$L = mvr = n\hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1-6)$$

式中 n 称为量子数, n 值不同,电子运动的轨道半径和能量都不一样。

(三) 玻尔理论中轨道半径和能量的计算

玻尔根据上述假设,计算了氢原子在稳定态中的轨道半径和能量,理论与实验结果符合得很好。

1. 轨道半径的计算 考虑氢核的质量是电子质量的 1836 倍,所以在讨论电子绕核运动时,可近似认为原子核不动。电子绕核做圆周运动时的向心力等于核对电子的库仑力,故有

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

式中 m 为电子的质量; v 为电子的速度。依据量子化条件,联立(1-6)式和(1-7)式,消去 v ,并用 r_n 代替 r 可得轨道半径公式

$$r_n = \frac{n^2}{Z} \cdot \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1-8)$$

由此可知,电子轨道半径与量子数 n 的平方成正比,且不连续。当 $n=1$ 时,轨道半径 $r_1 = 0.529 \times 10^{-10} \text{m}$,是氢原子核外最小半径,称玻尔半径,此数值与用其他方法得到的数值完全吻合。图 1-4 给出了氢原子处于各定态时的电子轨道。

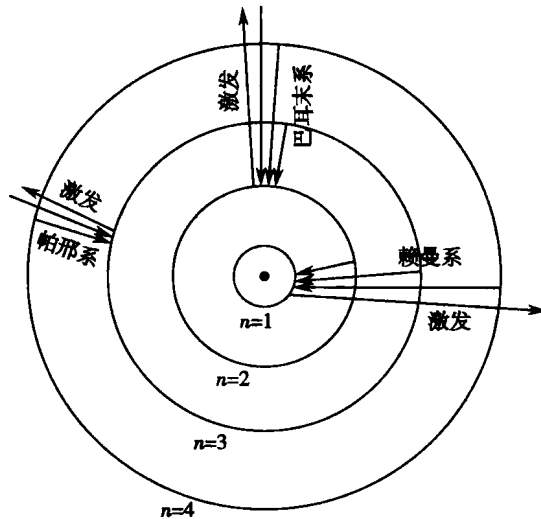


图 1-4 氢原子的电子轨道

2. 能量的计算 当电子在半径为 r_n 的轨道上运动时,原子内部能量 E_n 由电子的动能和体系的势能构成(原子核近似不动,故不计算动能)。电子的动能为