

全国医学高等职业院校规划教材  
供高职高专医学影像技术专业用

主 编 / 洪 洋

# 放射物理与 防护学

FANGSHE WULI YU  
FANGHUXUE

 人民军 医 出版社  
PEOPLE'S MILITARY MEDICAL PRESS

全国医学高等职业院校规划教材  
供高职高专医学影像技术专业用

# 放射物理与防护学

FANGSHE WULI YU FANGHUXUE

主 编 洪 洋

副主编 盖立平 王红军

编 者 (以姓氏笔画为序)

马 彦 王亚平 王红军 杨金有

胡克微 俞 航 洪 洋 盖立平



人民军医出版社

Peoples Military Medical Press

北 京

---

**图书在版编目(CIP)数据**

放射物理与防护学/洪洋主编. —北京:人民军医出版社,2006.8

全国医学高等职业院校规划教材

ISBN 7-5091-0424-6

I. 放… II. 洪… III. ①放射医学:物理学 ②放射医学-辐射防护 IV. ①R811.1  
②R142

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 069311 号

---

策划编辑:郭威 文字编辑:黄栩兵 责任审读:余满松

出版人:齐学进

出版发行:人民军医出版社 经销:新华书店

通信地址:北京市 100036 信箱 188 分箱 邮编:100036

电话:(010)66882586(发行部)、51927290(总编室)

传真:(010)68222916(发行部)、66882583(办公室)

网址:[www. pmmp. com. cn](http://www.pmmp.com.cn)

---

印刷:京南印刷厂 装订:桃园装订有限公司

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:13 字数:310千字

版、印次:2006年8月第1版第1次印刷

印数:0001~4000

定价:28.00元

---

**版权所有 侵权必究**

购买本社图书,凡有缺、倒、脱页者,本社负责调换

电话:(010)66882585. 51927252

# 出版说明

为了贯彻国家教育部关于发展高等职业教育的政策精神,为我国高等医学职业教育事业及其教材建设作出贡献,人民军医出版社在大连医科大学、中国医科大学、山东大学和山东省医学影像学研究所等 30 余所医学院所诸位教授的大力支持下,组织编写出版了“全国医学高等职业技术学院规划教材”。

“淡化学科意识,强调培养目标”是高等职业教育的核心。为能把学生培养成有“一技之长”的实用型人才,提高学生的“动手能力”,教材在学时分配、理论与实践的比例方面做了悉心编排。

教材由在“高职高专”教学第一线、具有丰富教学经验的教师参与编写,由该专业有较高学术造诣的教授审稿“把关”,从而使教材内容达到了“五性”(思想性、科学性、先进性、启发性、适用性)和“三基”(基础理论、基本知识、基本技能)的要求。

人民军医出版社

## 全国医学高等职业技术学院规划教材(医学影像技术专业,共 7 本)

人体断层解剖学	主编	刘树伟
医学影像技术学	主编	赵 斌 李 萌
医学影像设备学	主编	秦维昌
医学影像诊断学	主编	柳 澄 王兴武
放射治疗技术学	主编	胡立宽
医学影像电子学	主编	沙宪政 尹 勇
放射物理与防护学	主编	洪 洋

## 全国医学高等职业技术学院配套教材(医学影像技术专业,共 5 本)

医学影像技术学学习指导和习题集	主编	张晓康 沈秀明
医学影像设备学学习指导和习题集	主编	张佐成
医学影像诊断学学习指导和习题集	主编	伍建林 王兴武
放射治疗技术学学习指导和习题集	主编	姜玉华 李海鹰
医学影像电子学学习指导和习题集	主编	苏 克

# 前 言

《放射物理与防护学》是面向 21 世纪医学影像专业系列教材之一,由洪洋教授主编,中国医科大学、大连医科大学、辽宁中医药大学和锦州医学院四所院校教学一线专业教师共同编写。全书根据新世纪科学发展对医学影像及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防护知识,包括放射物理学的基本概念和规律、放射性测量方法、辐射生物效应和医学应用,以及放射防护理论及法律法规等内容。

本教材的特点是从辐射发生的最基础、最经典的原子物理学和核物理的理论出发,一直延伸到目前仍在不断更新、不断应对时代需求的放射防护法律法规范畴,是集基础理论、实验技术和监督机制于一体的范围较广的一个体系。这种基础与前沿同时并重的专业特征要求我们尽可能拓宽知识广度,注重理论与实践相结合,以实现培养专业合格的应用技术人才的目标。该书与以往同类教材相比有如下特点:

(1)面对不断更新的医学成像手段和设备所产生的射线现状,在以往教材偏重 X 线物理与防护内容基础上,加强了电子射线和其他辐射种类的基础知识、测量方法及防护措施的介绍。

(2)目前对辐射生物效应的研究已进入分子水平,本书追踪科学发展轨迹,在原有侧重表现的经典内容介绍的基础上,加入了对辐射生物效应深层次、新内容的介绍。

(3)增加了对介入诊断和治疗的防护内容。

(4)根据国际放射防护委员会(ICRP)和国家卫生部等权威机构修订并颁布的新文件,补充了放射防护标准和法律法规部分的新内容。

(5)全书突出了教材的特色,更适合供课堂教学和学生阅读理解。各章的后面分三个层次(即熟练掌握、掌握理解和了解)介绍了本章的学习指导,并编写了相应的习题、参考答案,以便于学生消化理解和复习应用。全书由浅入深,循序渐进,既考虑到学生的起点,又注重了新知识的介绍。

《放射物理与防护学》教材所适用的理论课为 24~48 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,也可供临床和生物学相应专业的学生和医护人员参考使用。

在编写过程中承蒙中国医科大学领导和全体编者所在学校领导的大力支持,特别是中国医科大学基础医学院柏树令院长、沙宪政教授和大连医科大学潘志达教授为我们提供了宝贵意见和帮助,在此一并致以诚挚的谢意。

本书作为面向 21 世纪医学院校放射物理与防护教学改革的一种尝试,诚祈得到各位同仁的支持与肯定。由于编者水平有限,时间仓促,缺点和错误在所难免,恳请读者惠予指正。

编 者

# 目 录

第 1 章 物质结构基础	(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	(2)
三、核外电子结构	(7)
第二节 原子核结构	(8)
一、原子核的组成	(8)
二、原子核的结合能	(9)
三、原子核的稳定性	(9)
第 2 章 核衰变	(12)
第一节 放射性核素的衰变类型	(12)
一、 $\alpha$ 衰变	(12)
二、 $\beta$ 衰变	(13)
三、 $\gamma$ 衰变和内转换	(14)
第二节 核衰变规律	(14)
一、衰变定律	(14)
二、有效半衰期	(15)
三、放射性活度	(16)
第三节 放射性统计涨落及放射平衡	(17)
一、统计涨落	(17)
二、放射平衡	(19)
第 3 章 X 射线的产生	(22)
第一节 X 射线的本质与特性	(22)
一、X 射线的发现	(22)
二、X 射线的本质	(23)
三、X 射线的基本特性	(24)
第二节 X 射线的产生原理	(24)
一、X 射线的产生装置	(24)
二、X 射线的产生原理	(25)
第三节 X 射线的量与质及产生效率	(28)
一、X 射线的量与质	(28)
二、X 射线的产生效率	(30)
第四节 X 射线强度的空间分布	(30)
一、薄靶周围 X 射线强度的空间分布	(30)

二、厚靶周围 X 射线强度的空间分布 .....	(31)
<b>第 4 章 射线与物质的相互作用 .....</b>	<b>(34)</b>
<b>第一节 带电粒子与物质的相互作用 .....</b>	<b>(34)</b>
一、电离与激发 .....	(34)
二、弹性散射 .....	(34)
三、韧致辐射 .....	(35)
<b>第二节 非带电粒子与物质的相互作用 .....</b>	<b>(35)</b>
一、X(或 $\gamma$ ) 射线与物质相互作用 .....	(35)
二、光电效应 .....	(36)
三、康普顿效应 .....	(38)
四、电子对效应 .....	(41)
五、中子与物质的相互作用 .....	(41)
<b>第三节 X(或 <math>\gamma</math>) 射线在物质中的衰减 .....</b>	<b>(43)</b>
一、单能 X 射线在物质中的衰减规律 .....	(43)
二、连续 X 射线在物质中的衰减规律 .....	(45)
三、人体的构成元素和组织密度 .....	(50)
四、X 射线通过人体的衰减规律 .....	(51)
<b>第 5 章 常用辐射量及单位 .....</b>	<b>(54)</b>
<b>第一节 辐射测量特征量及其单位 .....</b>	<b>(54)</b>
一、辐射量及单位的定义 .....	(54)
二、常用辐射特征量分类 .....	(55)
<b>第二节 描述电离辐射的常用辐射量 .....</b>	<b>(55)</b>
一、粒子注量 .....	(55)
二、照射量 .....	(57)
三、比释动能 .....	(58)
四、吸收剂量 .....	(59)
五、吸收剂量、比释动能和照射量三者的关系 .....	(60)
<b>第三节 辐射防护用辐射量和单位 .....</b>	<b>(62)</b>
一、当量剂量 .....	(63)
二、有效剂量 .....	(64)
三、集体当量剂量和集体有效剂量 .....	(65)
四、待积当量剂量和待积有效剂量 .....	(66)
五、放射生物剂量估计 .....	(66)
<b>第 6 章 放射线的测量 .....</b>	<b>(69)</b>
<b>第一节 照射量的测量 .....</b>	<b>(69)</b>
一、自由空气电离室 .....	(69)
二、实用空气电离室 .....	(70)
三、电离电荷测量电流 .....	(72)
<b>第二节 吸收剂量的测量 .....</b>	<b>(73)</b>

一、吸收剂量的基本测量方法	(73)
二、电离室测量法	(74)
三、吸收剂量D的其他测量方法	(77)
第三节 计数测量	(79)
一、GM计数管	(79)
二、闪烁计数器	(80)
第四节 射线质的测量	(82)
一、400kV以下X射线质的测定	(82)
二、高能X射线能量的测定	(82)
三、高能 $\beta$ 射线能量的测定	(83)
第7章 放射生物效应	(85)
第一节 放射线产生的生物效应	(85)
一、确定性效应与随机性效应	(85)
二、躯体效应与遗传效应	(87)
三、近期效应与远期效应	(88)
四、直接作用与间接作用	(88)
第二节 胎儿出生前的受照影响	(89)
一、胚胎死亡	(90)
二、畸形	(90)
三、智力低下	(90)
四、诱发癌症	(90)
第三节 皮肤效应	(91)
一、急性放射性皮肤损伤	(91)
二、慢性放射性皮肤损伤	(92)
三、放射性皮肤癌	(92)
第四节 生物靶的调节作用	(93)
一、辐射与自由基	(93)
二、稀释效应	(94)
三、氧效应	(95)
四、防护效应	(95)
五、温度效应	(96)
六、抗自由基的氧化酶系效应	(96)
第8章 放射线的医学应用	(99)
第一节 X(或 $\gamma$ )射线的医学应用	(99)
一、普通X射线摄影	(99)
二、X-CT	(102)
三、X射线在治疗方面的应用	(105)
第二节 放射性核素的医学应用	(105)
一、核素显像	(105)



二、放射性核素在治疗方面的应用 .....	(106)
第三节 放射治疗剂量学基础 .....	(107)
一、放射源及照射方式 .....	(107)
二、射线中心轴上的剂量参数 .....	(107)
三、近距离放射治疗剂量学 .....	(110)
第9章 放射防护法规与标准 .....	(114)
第一节 放射防护法规 .....	(114)
一、放射防护目的 .....	(114)
二、放射防护法规与标准 .....	(114)
三、医用放射防护标准的现实意义 .....	(118)
第二节 放射防护的基本原则 .....	(118)
一、实践的正当化 .....	(119)
二、防护的最优化 .....	(119)
三、个人剂量限值 .....	(119)
第三节 放射防护的基本标准 .....	(120)
一、放射防护的基本限值 .....	(120)
二、放射防护的推定限值 .....	(121)
三、放射防护体系中的干预水平 .....	(123)
四、教学和事故等照射的防护要求 .....	(124)
第四节 医疗照射剂量的约束 .....	(125)
一、医疗照射指导水平 .....	(125)
二、医疗照射对非患者受照的约束 .....	(129)
第五节 放射性工作场所及国民安全文化素养 .....	(129)
一、放射性工作场所及工作条件 .....	(129)
二、开放源防护的基本措施 .....	(132)
三、开放源的安全系数操作规程 .....	(133)
四、放射危险标志 .....	(134)
五、国民安全文化素养 .....	(134)
第10章 放射线屏蔽防护 .....	(137)
第一节 基本措施 .....	(137)
一、内照射防护 .....	(137)
二、外照射防护 .....	(138)
第二节 屏蔽材料 .....	(138)
一、屏蔽材料的选择 .....	(138)
二、屏蔽材料厚度的确定 .....	(139)
三、常用屏蔽防护材料 .....	(146)
第三节 视屏装置的辐射防护 .....	(147)
一、视屏装置的不良作用 .....	(147)
二、个人防护措施 .....	(148)

<b>第 11 章 医用放射线的防护</b> .....	(150)
<b>第一节 医疗照射防护的基本原则</b> .....	(150)
一、我国医疗照射现状 .....	(150)
二、医疗照射的合理应用 .....	(153)
三、医疗照射的最优化 .....	(154)
<b>第二节 医用诊断 X 射线的防护</b> .....	(155)
一、防护原则 .....	(155)
二、防护性能要求 .....	(155)
三、防护设施 .....	(155)
四、防护操作要求 .....	(157)
五、妇女和儿童 X 射线检查及其防护措施 .....	(157)
<b>第三节 医用治疗放射线的防护要求</b> .....	(160)
一、医用加速器 .....	(160)
二、医用 $\gamma$ 照射远距离治疗 .....	(160)
三、体外放射治疗患者的防护 .....	(161)
<b>第四节 放射防护监测</b> .....	(162)
一、医疗照射场所监测 .....	(163)
二、放射工作人员个人剂量监测 .....	(163)
<b>第 12 章 介入放射学的安全与防护</b> .....	(167)
<b>第一节 介入放射环境的辐射剂量及其估算方法</b> .....	(167)
一、介入放射操作者所受辐射剂量 .....	(167)
二、介入诊治患者所受辐射剂量 .....	(169)
三、介入诊断患者的剂量估算 .....	(171)
四、介入操作者个人剂量估算 .....	(172)
<b>第二节 介入放射学的防护</b> .....	(173)
一、介入操作者的防护措施 .....	(174)
二、防护用品 .....	(174)
三、影响辐射剂量的主要因素 .....	(175)
<b>第三节 介入放射学规范操作与管理</b> .....	(177)
一、对工作人员的基本要求 .....	(177)
二、操作室基本条件与布局 .....	(178)
三、安全管理 .....	(178)
<b>第 13 章 放射防护管理</b> .....	(181)
<b>第一节 管理机构职责及许可登记制度</b> .....	(181)
一、管理机构职责 .....	(181)
二、许可登记制度 .....	(181)
<b>第二节 管理措施</b> .....	(182)
一、放射防护知识培训 .....	(182)
二、放射器材的使用与管理要求 .....	(183)

放射物理与防护学

三、健康管理 .....	(183)
四、放射事故管理 .....	(185)
五、质量保证 .....	(187)
六、档案管理 .....	(188)
附录 A 2002 年卫生部颁布放射卫生防护及放射病诊断标准题录 .....	(190)
附录 B 中国现行放射医学与卫生防护法规题录 .....	(192)
参考文献 .....	(193)
索引 .....	(195)

# 第 1 章 物质结构基础

作为放射卫生与放射防护的基础理论教材,首先应该从物质结构入手,了解我们所要研究、利用,并加以防护的各种射线都是如何产生的。基于这个目的,本章将介绍原子物理学的基本概念和基本规律,包括原子的结构、能量状态及能量状态变化的方式等。

## 第一节 原子结构

### 一、初期理论的实验基础

很早以前,人们就知道原子是组成物质的最小微粒,但是原子内部结构是怎样的呢? 20世纪初,实验证实电子是一切原子的组成部分,人们意识到原子是可以再分割的。由于物质通常是中性的,可见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,知道电子的质量差不多是原子质量的  $1/2000$ 。这些实验结果和当时的经典理论为确立原子结构的模型提供了理论依据。

#### (一) 汤姆逊(JJ Thomson)模型

1903年,英国科学家汤姆逊提出,原子中带正电的部分是一个具有弹性的、冻胶状的、半径为  $10^{-10}\text{m}$  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,这就是汤姆逊结构模型,即“葡萄干蛋糕模型”。但勒纳特(Lenard)自1903年起直到多年后所做的电子在金属膜上的散射实验证实构建汤姆逊模型的困难。卢瑟福(E Rutherford)的  $\alpha$  粒子散射实验则否定了汤姆逊模型,建立了原子核式结构模型。

#### (二) $\alpha$ 粒子的散射实验

$\alpha$  粒子是从放射性物体中发射出来的快速粒子,它带两个单位的正电荷,具有氦原子那样的质量,是电子质量的 7 300 倍。后来证明它就是氦原子核。

卢瑟福、盖革(H Geiger)和马斯顿(E Marsden)等通过  $\alpha$  粒子散射实验,在 1909 年观察到一个重要现象,就是  $\alpha$  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  $1/8\ 000$  的  $\alpha$  粒子偏转角度大于  $90^\circ$ ,其中有个别粒子偏转角度接近  $180^\circ$ 。

$\alpha$  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  $\alpha$  粒子源,发射的  $\alpha$  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  $\alpha$  粒子进行观察。荧光屏是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向着散射物 F。当被散射的  $\alpha$  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  $\alpha$  粒子数。从  $\alpha$  粒子源到荧光屏这段路程是真空状态的。

#### (三) 卢瑟福的核式模型

汤姆逊模型不能解释  $\alpha$  粒子散射实验中的大角散射问题。卢瑟福鉴于汤姆逊模型不符合

实验结果的事实,在 1911 年提出另一个模型,即他认为原子中心是一个重的带正电的核,与整个原子的大小相比,核很小,且电子围绕核转动,类似大行星绕太阳转动,这就是原子的核模型,又称行星模型。

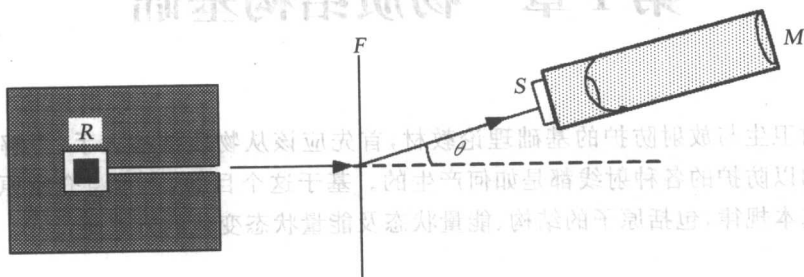


图 1-1 观测  $\alpha$  粒子散射的仪器装置

当  $\alpha$  粒子接近原子时,它受电子作用引起的运动改变不大,但它受正电体的作用就不同了。由于正电体很小, $\alpha$  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, $\epsilon_0$  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,利用实验观察到的散射角可以推算带正电物体的大小,算得的结果很小,为  $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{m}$ ,而原子半径为  $10^{-10} \text{m}$ ,所以称为原子核(atomic nucleus)。他提出的原子模型因此称为核式模型。

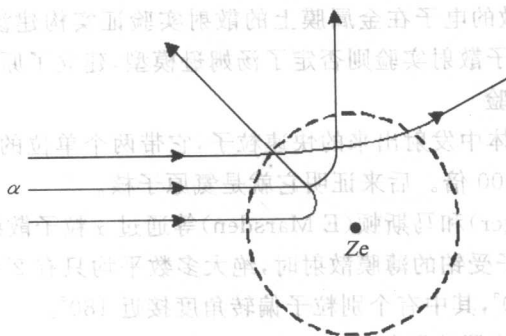


图 1-2  $\alpha$  粒子在原子的核式模型中的散射

## 二、玻尔的原子模型

### (一) 氢原子光谱的规律性

原子核模型的建立,只是肯定了原子核的存在,但还不知道原子核外电子的情况。光谱观察提供了很多资料,这些光谱学数据对物质结构的研究具有重要意义。

光谱是电磁辐射(不论在可见区内或在可见区以外)的波长成分和强度分布的记录(有时只是波长成分的记录)。光谱分为线状光谱、带状光谱和连续光谱。原子光谱为线状光谱,每条谱线代表一个波长,谱线是分明、清楚的。从氢气放电管可以获得氢原子光谱。人们早就发现氢原子光谱在可见区和近紫外区有好多谱线,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索。其中  $H_\alpha$  是明亮的红线, $H_\beta$ 、 $H_\gamma$ 、 $H_\delta$  分别是黄绿线、蓝线和紫线,其余谱线在紫外区。

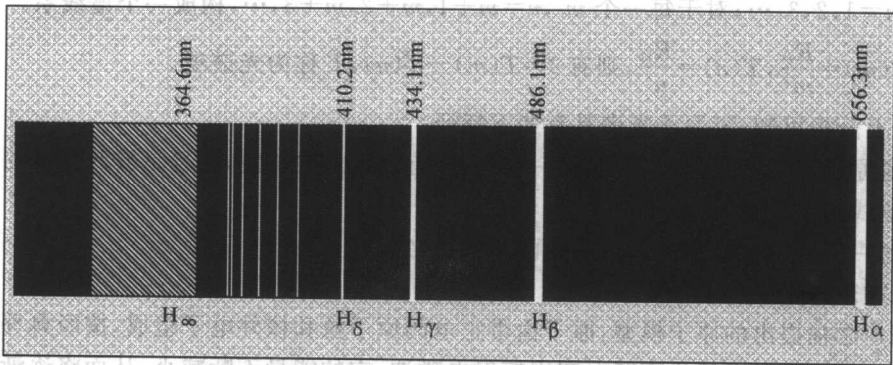


图 1-3 氢原子光谱的巴尔末系和系限外的连续谱

在 1885 年,巴耳末(JJ Balmer)首先将氢原子光谱线的波长用下列的经验公式来表示

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad (n = 3, 4, 5, \dots; B = 364.56 \text{ nm}) \quad (1-2)$$

当  $n$  取 3, 4, 5, ... 等不同整数时,上式分别给出氢光谱中  $H_\alpha$ 、 $H_\beta$ 、 $H_\gamma$ 、 $H_\delta$ 、... 等谱线的波长。后人称该式为巴耳末公式,它所表达的一组谱线称为巴尔末系。当  $n \rightarrow \infty$ , 波长接近  $B$ , 达到了此谱线系的极限,此时两邻近波长的差别趋近零,谱线呈连续谱。后来瑞典物理学家里德伯(JR Rrdberg)改用波长的倒数来表达巴耳末公式,形式为

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

式 1-3 中  $\tilde{\nu}$  称为波数,即单位长度间隔内所包含的波长数目;常数  $R_H = \frac{4}{B}$  称为里德伯常数,  $R_H = 1.0967758 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ 。

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(T Lyman),还有三个在红外区,分别由帕邢(F Paschen)、布喇开(F Brachett)和普丰特(HA Pfund)发现。这些谱线像巴耳末系一样,可以用一个简单的公式表达。

赖曼系  $\tilde{\nu} = R_H \left[ \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right], n = 2, 3, 4, \dots$

巴耳末系  $\tilde{\nu} = R_H \left[ \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right], n = 3, 4, 5, \dots$

帕邢系  $\tilde{\nu} = R_H \left[ \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right], n = 4, 5, 6, \dots$

$$\text{布喇开系} \quad \bar{\nu} = R_H \left[ \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right], n=5, 6, 7, \dots$$

$$\text{普丰特系} \quad \bar{\nu} = R_H \left[ \frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right], n=6, 7, 8, \dots$$

根据各谱线系的相同形式和共同特征,可以把氢原子光谱的波数用通式来表示

$$\bar{\nu} = R_H \left[ \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right] \quad (1-4)$$

上式中,  $m=1, 2, 3, \dots$ ; 对于每一个  $m$ ,  $n=m+1, m+2, m+3, \dots$ , 构成一个谱线系。

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

由以上分析可知, 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) 玻尔的原子模型

根据卢瑟福提出的原子模型, 原子由带正电的原子核和核外电子组成, 按经典理论电子绕核旋转, 作加速运动, 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。所以原子应是一个不稳定的系统。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, 原子光谱应是连续的光谱。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。

1913年, 玻尔(N Bohr)为了解决上述困难, 在卢瑟福核式模型的基础上, 把普朗克的量子化概念应用到原子系统, 结合光谱项的定义, 提出三个基本假设, 很好地解释了氢原子光谱规律。

### 1. 玻尔理论的基本假设

(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:

$$h\nu = E_n - E_k \quad (1-5)$$

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:

$$\nu = \frac{E_n - E_k}{h} \quad (1-6)$$

光子频率也可根据式 1-3 和式 1-4 联立得:

$$\nu = \bar{\nu} c = R_H \left[ \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right] c \quad (1-7)$$

将上式乘以普朗克常量, 同样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, 角动量的数值只能取  $\hbar = h/2\pi$  的整数倍, 即

$$L = mvr = n\hbar, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1-8)$$

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。

2. 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, 理论结果与实验结果相符。

(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的情况时, 可以近似认为原子核不动。因此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:

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{r^2} \quad (1-9)$$

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(1-8)式和(1-9)式, 消去  $v$ , 并用  $r_n$  代替  $r$  可得轨道半径公式

$$r_n = \frac{n^2}{Z} \cdot \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1-10)$$

从上式可知, 电子轨道半径与量子数  $n$  的平方成正比, 其值是不连续的。当  $n=1$  时, 得轨道半径  $r_1 = 0.529 \times 10^{-10} \text{m}$ , 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。

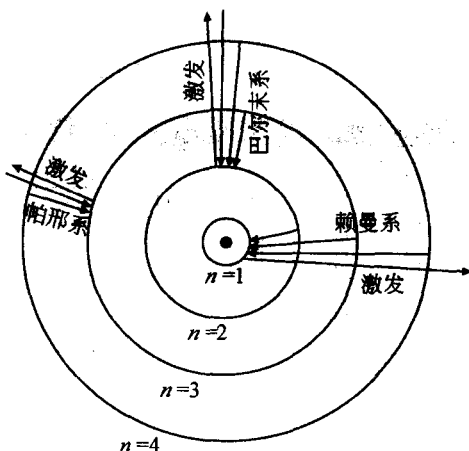


图 1-4 氢原子的电子轨道

(2) 能量的计算: 当电子在半径为  $r_n$  的轨道上运动时, 原子的内部能量  $E_n$  由电子的动能和体系的势能构成(原子核暂时作为不动的, 所以不计算动能)。

电子的动能为

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{2r} \quad (1-11)$$

系统的势能为

$$U = U_0 - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{r}$$

$U_0$  是  $r=\infty$  时的势能, 定为零值。所以



$$U = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{r} \quad (1-12)$$

联立式(1-11)和(1-12),可得总能量  $E_n$  为

$$E_n = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{r} = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (1-13)$$

将轨道半径 1-10 式代入式 1-13,可得量子化的能量式

$$E_n = -\frac{me^4}{8h^2\epsilon_0^2} \cdot \frac{Z^2}{n^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1-14)$$

式 1-14 表明电子在第  $n$  个稳定轨道上运动时,氢原子系统的能量。由于  $n$  只能取整数,所以原子系统的能量是不连续的,即能量量子化。这种量子化的能量值称为能级(energy level)。

当  $n=1$  时,氢原子能量最低,  $E_1 = -13.60\text{eV}$ ,称为基态(ground state),此能量值与用实验方法测得的能量值符合得很好。 $n>1$  时的各稳定态能量大于基态,称为激发态(excitation state),能量随量子数  $n$  增大而增大,能量间隔逐渐减小。当  $n \rightarrow \infty$  时,  $E_n \rightarrow 0$ ,能级趋于连续。当  $E>0$  时,电子已脱离原子核的吸引,即氢原子已电离,电子成为自由电子,其能量连续变化。图 1-5 表示氢原子的能级图。

玻尔理论成功地解释了氢原子光谱,对类氢离子的光谱也能很好地解释。鉴于玻尔对原子结构和原子辐射的贡献,玻尔荣获 1911 年诺贝尔物理学奖。

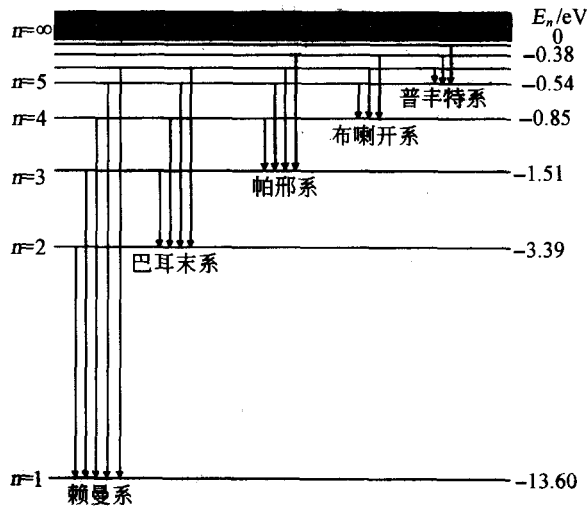


图 1-5 氢原子能级

例 1-1 求巴耳末系光谱的最大和最小波长。

解:由  $\lambda = \frac{c}{\nu}$  和  $\nu = \frac{E_n - E_m}{h}$  和  $E_n = \frac{E_1}{n^2}$  可得巴耳末光谱的最大波长为

$$\lambda_{\max} = \frac{ch}{E_3 - E_2} = \frac{3 \times 10^8 \times 6.63 \times 10^{-34}}{[-13.60/3^2 - (-13.60/2^2)] \times 1.6 \times 10^{-19}}$$

$$\lambda_{\max} = 6.58 \times 10^{-7} (\text{m}) = 658 (\text{nm})$$