

卫生部规划教材

全国中等卫生学校教材

供放射技术专业用

X 线物理与防护

第 二 版

主编 马延洪



人 民 卫 生 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

X线物理与防护/马延洪主编. -2版. -北京:人民卫生出版社,1996

ISBN 7-117-02545-X

I. X… II. 马… III. ①X线—物理学—专业学校—教材②X辐射—辐射防护—专业学校—教材 IV. R142
中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 21671 号

X线物理与防护

第 二 版

马 延 洪 主 编

人 民 卫 生 出 版 社 出 版
(100050北京市崇文区天坛西里10号)

北京市卫顺印刷厂印刷

新 华 书 店 经 销

787×1092 16开本 11 $\frac{1}{2}$ 印张 259千字

1990年4月第1版 1997年5月第2版第8次印刷

印数: 12 601—18 600

ISBN 7-117-02545-X/R·2546 定价: 9.80 元

著作权所有, 请勿擅自用本书制作各类出版物, 违者必究。

第三轮中等医学教材出版说明

卫生部曾于1983年组织编写、陆续出版全国中等卫生学校11个专业使用的77种教材。1992年又组织小修订，出版第二轮教材。为我国的中等医学教育作出了积极贡献。

为适应中等医学教育改革形势的需要和医学模式的转变，1993年11月，卫生部审定、颁发了全国中等卫生学校新的教学计划及教学大纲。在卫生部科教司领导下，我们组织编写（修订）出版第三轮全国中等医学12个专业96种规划教材，供各地教学使用。

这轮教材以培养中级实用型卫技人才为目标，以新的教学计划及大纲为依据，体现“思想性、科学性、先进性、启发性、适用性”，强调“基本理论知识、基本实践技能、基本态度方法”。教材所用的医学名词、药物、检验项目、计量单位，注意规范化，符合国家要求。

编写教材仍实行主编负责制；编审委员会在教材编审及组织管理中，起参谋、助手、纽带作用；部分初版教材和新任主编，请主审协助质量把关。第三轮中等医学教材由人民卫生、河北教育、山东科技、江苏科技、浙江科技、安徽科技、广东科技、四川科技和陕西科技九家出版社出版。

希望各校师生在使用规划教材的过程中，提出宝贵意见，以便教材质量能不断提高。

卫生部教材办公室

1995年10月

全国中等医学教材编审委员会

主任委员：姜寿葆

副主任委员：陈咨夔 殷冬生

委员：（以姓氏笔画为序）

马惠玲	王同明	方茵英	王德尚	延 民	那功伟
朱国光	吕树森	李绍华	李振宗	李振林	陈心铭
吴忠礼	杨华章	洪启中	洪思劬	郭常安	张冠玉
张审恭	殷善堂	董品泸	谭筱芳		

前 言

本书依据 1994 年卫生部颁布的第三轮全国中等医学教材新教学计划和大纲的要求,在第一版教材的基础上,吸收和补充了近几年出现的新技术、新标准和新法规编写而成。供放射技士专业和放射从业人员防护知识培训用教材。教学时数为 57 学时。

第二版教材的突出特点是以培养实用型卫生技术人员为宗旨,围绕专业目标和课程目标取舍内容。由于这版较第一版教材的教学时数压缩了 $1/4$,因此,在维持教学内容基本不变的前提下,文字和篇幅都做了较大精减,章节也做了适当调整,由原来的 15 章调整为 11 章。其中将内容相近的“X 射线常用测量仪器”和“X 射线防护监测”两章内容合并为“X 射线测量”一章中;将“X 射线在医学上的应用”一章压缩为一节内容置于“X 射线对人体的危害”一章里介绍;将“医用诊断 X 射线防护”和“医用治疗 X 射线防护”两章内容合并为“医用 X 射线的防护”一章。经过以上调整,使这版教材的结构更加紧凑合理,内容更加简明实用,减少了不必要的重复。

根据实用型人才应具备:必要的理论知识、较强的实践技能和良好职业素质的总体要求及学时压缩的实际情况,在把握深浅度及阐述方法上,采用对学生已有知识直接应用不再做过多的讲解,对理论性强的内容,力求用深入浅出的表述方法把主要问题讲清楚,尽量减少不必要的数学推导,使之更适合中专层次学生的学习需要。学生实验由原来的 8 个减为 6 个,实验目标更加明确,可给学生提供更多的实验操作机会,提高其实践技能。

本门课程在教学安排上是最早开设的一门专业课,它肩负着为后续课程奠定 X 射线物理与防护知识基础的任务。众所周知,X 射线是一种不能被人的感觉器官直接感知的特殊致害因子,人们在广泛应用 X 射线获取巨大诊疗利益的同时,也会带来对人体健康的一定危害。因此,X 射线工作者应具有良好的职业素质,他们应对 X 射线特性、辐射场分布、剂量、危害、法规和防护技术等都能熟练掌握,灵活运用;对病患者能正当合理地使用 X 射线实施诊断和治疗,杜绝一切滥用 X 射线现象的发生。

近几年国际权威机构制定和发布的防护标准和法规又有很大进展,我国也有不少新防护标准和法规即将颁布实施。基于这一情况,为使本书内容不至于出版后即显陈旧,编撰中在使用现行标准和法规的同时,也对国内、外的新标准和法规做了适当介绍。

本书在编写过程中,得到许多专家和同行们的关心、支持和帮助,特别是浙江省卫生学校的徐建国主任和湖北襄樊卫生学校的周晓东老师对本版教材的编写提出了许多建设性的宝贵意见,特致以谢意。

由于编者水平所限,虽经编写组全体同仁的协同努力,但书中的缺点和不当之处仍在所难免,与具有中专特色教材的要求还存在差距,恳请使用本教材的专家和同仁不吝指正,以利再版时改进。

编 者

1996. 6

目 录

第一章 原子结构与电离辐射	(1)
第一节 原子结构	(1)
一、原子的核型结构	(1)
二、原子核	(1)
第二节 核外电子结构	(3)
一、核外电子的排布	(3)
二、原子的激发和跃迁	(6)
第三节 电离辐射与电磁辐射	(7)
一、电离辐射	(7)
二、电磁辐射	(7)
三、辐射的二象性	(8)
复习题	(9)
第二章 X射线的产生和性质	(10)
第一节 X射线的发现	(10)
第二节 X射线的本质与特性	(11)
一、X射线的本质	(11)
二、X射线的基本特性	(11)
第三节 X射线的产生装置	(13)
一、X射线的产生条件	(13)
二、X射线管	(13)
三、X射线机	(14)
四、医用电子直线加速器和X-刀	(15)
第四节 X射线的产生原理	(15)
一、电子与物质的相互作用	(15)
二、连续X射线	(17)
三、特征X射线	(19)
第五节 X射线的量与质	(21)
一、描述X射线量与质的量.....	(21)
二、影响X射线量与质的因素	(22)
第六节 X射线的产生效率	(23)
第七节 X射线强度的空间分布	(23)
一、薄靶周围X射线强度的空间分布	(23)
二、厚靶周围X射线强度的空间分布	(24)
复习题	(25)
第三章 X射线与物质的相互作用	(27)

第一节 概述	(27)
第二节 X射线与物质相互作用的主要过程	(28)
一、光电效应	(28)
二、康普顿效应	(31)
三、电子对效应	(33)
第三节 X射线与物质相互作用的其它过程	(34)
一、相干散射	(34)
二、光核反应	(34)
第四节 各种效应发生的相对几率	(35)
一、X射线引发效应总结	(35)
二、 Z 和 $h\nu$ 与三种基本作用的关系	(35)
三、在诊断放射学中各种基本作用发生的相对几率	(35)
复习题	(36)
第四章 X射线在物质中的衰减	(38)
第一节 衰减系数	(38)
一、线衰减系数	(38)
二、质量衰减系数	(39)
第二节 单能X射线在物质中的衰减规律	(41)
一、窄束X射线的衰减规律	(41)
二、宽束X射线的衰减规律	(42)
第三节 连续X射线在物质中的衰减规律	(43)
一、连续X射线在物质中的衰减特点	(43)
二、影响X射线衰减的因素	(44)
三、X射线的过滤	(45)
第四节 诊断放射学中X射线的衰减	(47)
一、X射线在人体中的衰减	(47)
二、散射线	(49)
复习题	(50)
第五章 X射线常用辐射量和单位	(51)
第一节 描述电离辐射的常用辐射量和单位	(51)
一、照射量	(51)
二、比释动能	(52)
三、吸收剂量	(53)
第二节 辐射防护中常用辐射量和单位	(56)
一、当量剂量	(56)
二、有效剂量	(58)
三、集体当量剂量及集体有效剂量	(59)
复习题	(60)
第六章 X射线的测量	(61)

第一节 测量仪器与方法	(61)
一、半价层的测量	(61)
二、X 射线机输出量的测量	(62)
三、X 射线场所剂量的测量	(64)
四、X 射线个人剂量的测量	(65)
五、医用诊断 X 射线机检验设备介绍	(66)
第二节 防护监测与评价	(68)
一、场所放射防护监测	(68)
二、个人剂量监测	(71)
复习题	(72)
第七章 X 射线对人体的危害	(74)
第一节 X 射线在医学上的应用	(74)
一、X 射线在诊断方面的应用	(74)
二、X 射线在治疗方面的应用	(75)
三、医用 X 射线的发展趋势	(76)
四、X 射线医用中值得注意的几个问题	(77)
第二节 X 射线损伤的历史	(77)
一、职业性放射损伤	(77)
二、医源性放射损伤	(78)
第三节 电离辐射生物效应概述	(79)
一、电离辐射对人体组织的损伤	(79)
二、辐射生物效应的分类	(79)
第四节 确定性效应	(79)
一、概述	(79)
二、几种辐射敏感组织的阈剂量	(80)
三、放射反应	(80)
四、外照射慢性放射病	(81)
五、放射性白内障	(82)
第五节 随机性效应	(83)
一、致癌效应	(83)
二、遗传效应	(84)
第六节 胎儿出生前受照效应	(84)
一、胚胎死亡	(84)
二、畸形	(84)
三、智力低下	(84)
四、诱发癌症	(85)
第七节 皮肤效应	(85)
一、急性放射性皮肤损伤	(85)
二、慢性放射性皮肤损伤	(86)

三、放射性皮肤癌	(86)
复习题	(87)
第八章 放射防护标准与法规	(88)
第一节 放射防护标准	(88)
一、放射防护基本标准的发展	(88)
二、与医用 X 射线有关的放射防护标准	(88)
三、放射防护的基本原则	(89)
四、个人剂量限值	(90)
五、对受照剂量的控制原则	(90)
六、医疗照射的防护	(91)
第二节 放射防护管理法规	(92)
一、法规的概念与作用	(92)
二、与医用 X 射线有关的防护法规	(92)
第三节 放射防护标准与法规的贯彻实施	(93)
一、放射工作单位的自主管理	(93)
二、卫生行政部门的监督管理	(93)
复习题	(94)
第九章 X 射线屏蔽防护	(95)
第一节 外照射防护	(95)
一、时间防护	(95)
二、距离防护	(96)
三、屏蔽防护	(96)
第二节 屏蔽材料	(96)
一、对屏蔽材料的要求	(96)
二、常用屏蔽防护材料	(96)
三、复合防护材料	(98)
四、碳纤维板材料	(98)
第三节 屏蔽材料的防护性能	(98)
一、材料的屏蔽性能	(99)
二、材料的散射性能	(100)
第四节 屏蔽厚度的确定方法	(102)
一、确定屏蔽厚度的依据	(103)
二、确定屏蔽厚度的方法	(104)
三、确定屏蔽厚度时应注意的事项	(108)
复习题	(109)
第十章 医用 X 射线的防护	(111)
第一节 医用诊断 X 射线的防护	(111)
一、防护原则	(111)
二、诊断 X 射线机的防护性能	(112)

三、X 射线机房的防护	(113)
四、辅助防护设施	(116)
五、X 射线检查的合理应用	(118)
六、X 射线透视检查的防护	(119)
七、X 射线摄影检查的防护	(120)
八、降低受检者受照剂量的技术措施	(120)
九、妇女 X 射线检查的防护	(122)
十、儿童 X 射线检查的防护	(122)
第二节 医用治疗 X 射线的防护	(123)
一、医用治疗 X 射线机的防护性能	(123)
二、对治疗室的防护要求	(124)
第三节 医用加速器的防护	(124)
复习题	(125)
第十一章 X 射线防护管理	(126)
第一节 防护管理机构	(126)
第二节 申请许可制度	(126)
第三节 防护管理内容	(127)
一、X 射线机的生产	(127)
二、射线防护器材	(127)
三、防护知识培训	(128)
四、健康管理	(128)
五、放射事故管理	(129)
六、质量保证	(131)
七、档案管理	(132)
复习题	(132)
实验	(133)
实验一 X 射线特性的实验验证	(133)
实验二 半价层的测量	(134)
实验三 铅当量的测量	(135)
实验四 X 射线机输出量的测量	(137)
实验五 X 射线机管头组装体漏射线的测量	(138)
实验六 透视 X 射线机防护区照射量率的测量	(139)
附录	(141)
附录一 法定计量单位	(141)
附录二 常用物理常数	(144)
附录三 X 射线卫生防护标准和法规	(144)
医用诊断 X 线卫生防护标准	(144)
医用治疗 X 线卫生防护规定	(149)
医用高能 X 线和电子束卫生防护规定	(153)

放射工作人员个人剂量监测方法	(158)
放射工作人员健康管理规定	(162)
射线防护器材防护质量管理规定	(165)
放射性同位素与射线装置放射防护条例	(167)
医用 X 射线诊断放射卫生防护及影像质量保证管理规定	(171)

第一章 原子结构与电离辐射

X射线的产生、应用及防护等过程,都发生在原子之中,欲了解其原理,就必须具备原子结构与电离辐射的基本知识。

第一节 原子结构

自然界的物质品种繁多、结构各异。但仔细分析起来,都是由一百多种基本元素组成的。构成元素的最小单元是原子,原子又由原子核和核外电子组成,它们都是具有质量和电量的微观粒子,都处在不停的运动状态之中。

一、原子的核型结构

任何原子都是由小而致密的原子核与核外高速绕行的电子所组成。一个原子就如同太阳系一样,原子核如同太阳,核外电子就如同行星一样,沿一定轨道绕核旋转。在正常情况下原子核所带正电荷数量与核外电子所带负电荷数量相等,整个原子对外呈现中性。正、负电荷间的吸引力为电子绕核旋转提供了向心力。

原子极其微小,若把1亿个原子挨个排成一行,仅有1cm长。原子核更小,核半径仅为原子半径的1/万~1/10万,原子核的截面积仅为原子截面积的几千亿分之一。在这里可以形象地打个比方,假若把原子比做可容纳万人的体育馆那么大,原子核则仅有豆粒那么小。由此推断,原子内有一个相对来说“很大”的空间,核外电子就像几颗尘埃一样在这个“庞大”的空间里绕核旋转。由于原子的这种“空虚”性,所以物质中原子前后遮蔽的机会很小,只有当厚度增加时,其遮蔽的机会才会随之增大。因此,1个高速电子或X射线光子可以很容易地穿过许多原子后,才会与某个原子发生碰撞。

二、原子核

(一) 核的组成

原子核由质子和中子组成。质子带1个单位的正电荷,中子不带电呈中性。原子核的密度极大,假若把原子核紧挨着排满1cm³的体积,它的质量约为1亿吨。组成原子的电子、质子和中子的有关数据列表1-1中。

表 1-1 构成原子的电子、质子和中子

名称	代表符号	电量 (库伦)	质量 (千克)
电子	e	$-1.602189 \times 10^{-19}$	9.109534×10^{-31}
质子	p	$+1.602189 \times 10^{-19}$	$1.6726485 \times 10^{-27}$
中子	n	0	$1.6749543 \times 10^{-27}$

(二) 质能、质速关系

在近代物理学诞生之前,质量一直被认为是与运动状况无关的不变量。爱因斯坦从他的相对论中得出,物体在不同的运动系统中,应具有不同的质量。质量随速度的变化规律是

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (V/C)^2}} \quad (1-1)$$

式中 m_0 为静止质量,即物体相对参照系静止时的质量; m 为运动质量,即物体相对参照系运动速度为 V 时的质量; C 为真空中的光速, $C=3 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{S}^{-1}$ 。

宏观物体的运动速度 (V) 都远远小于光速 (C), 因此, 质量随速度的变化极其微小, 不易显示出来。然而, 微观粒子在接近光速运动时, 其质量的改变就非常明显了。例如, 电子在以 98% 的光速运动时, 其运动质量就是静止质量的 5 倍。即

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (0.98)^2}} = 5m_0$$

质量 (m) 和能量 (E) 都是表征物质性质的物理量, 两者相互联系着。如果一个体系的能量发生了变化, 则该体系的质量也将发生相应的变化, 反之亦然。对静止物体来说, 质能间相互联系的关系式为

$$E_0 = m_0 C^2 \quad (1-2)$$

式中, E_0 是与物体对应的静止质量能, 其 SI 单位是焦耳 (J); m_0 是静止物体的质量, SI 单位是千克 (kg); C 是光速。

如果一个物体从外界吸收了 ΔE 的能量, 则它的质量就相应增加了 $\Delta m = \Delta E / C^2$; 反之, 它的质量就将减少 $\Delta E / C^2$ 。由此可见, 物体质量的改变不仅依靠与周围物体做实物 (分子、原子) 交换来完成, 而且还可以通过能量交换来实现。

物体的总能量应由静止质量能和动能两部分组成。表 1-2 列出电子的总能量、速度和质量间的有关数据。

表 1-2 电子的能量、速度及质量间的有关数据

动能	总能量 (MeV) (静止质量能+动能)	电子速度与光速之比 (V/C)	电子运动质量与静止 质量之比 (m/m_0)
10 keV	0.521	0.1950	1.020
100 keV	0.611	0.5483	1.196
500 keV	1.011	0.8629	1.979
1 MeV	1.511	0.9411	2.957
10 MeV	10.511	0.9988	20.58
100MeV	100.511	0.9999	192.31

能量的国际制 (SI) 单位是焦耳 (J)。本书在描述电子和 X 射线光子等微观粒子时, 常用能量的法定计量单位电子伏特 (eV)。1eV 是指在真空中, 1 个电子在 1 伏特电压的加速电场中所获得的能量。其值为

$$1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{J}$$

另外, 还常用千电子伏特 (keV) 和兆电子伏特 (MeV), 它们之间的换算关系为

$$1\text{MeV} = 10^3 \text{keV} = 10^6 \text{eV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{J}$$

〔例1〕求1克物质的静止质量能是多少？

解：由质能关系式，可求得对应1克物质的静止质量能为

$$\begin{aligned}E_0 &= m_0 c^2 \\&= 10^{-3} \times (3 \times 10^8)^2 \\&= 9 \times 10^{13} \text{J} \\&= 2.5 \times 10^7 \text{ 千瓦} \cdot \text{时} (\text{kw} \cdot \text{h})\end{aligned}$$

这些能量相当于2700吨标准煤完全燃烧所释放出来的热能（即化学能）。

〔例2〕求以10keV 动能运动的电子的总能量是多少？

解：电子的总能量应等于静止质量能与动能之和

$$\begin{aligned}E_0 &= m_e c^2 \\&= 9.109 \times 10^{-31} \times (3 \times 10^8)^2 \\&= 8.198 \times 10^{-14} \text{J} \\&= 0.511 \text{MeV}\end{aligned}$$

已知电子动能为10keV (0.01MeV)

故电子的总能量为 $0.511 + 0.01 = 0.521 \text{MeV}$

（三）同位素与 γ -刀

凡核内质子数相同而中子数不同的同一类元素互称同位素，它们在周期表中占有同一位置。迄今已知的108种元素的同位素就有2000余种。同位素又分为稳定性同位素和放射性同位素两种。天然存在的稳定性同位素只有270种，其它全是放射性同位素。原子核不稳定能自发地放射出 α 、 β 或 γ 等放射线的同位素称为放射性同位素。了解以上三种放射线的本质很有必要。

α 射线是由 α 粒子组成的放射线， α 粒子是由2个质子和2个中子组成的带有2个正电荷的氦核。 β 射线是由 β 粒子组成的放射线， β 粒子就是带有1个负电荷的电子。 β 粒子与电子本质相同，只因为它从核内释放出来的，故称 β 粒子。 γ 射线是由 γ 光子组成的放射线， γ 光子是不带电的中性高能量光子。 γ 射线与X射线本质相同，只因产生途径不同而有不同的名称。为了叙述方便，在后面的课文中一般仅提X射线。

核医学就是利用放射性同位素能自发释放出不同射线的特性，来诊断和治疗疾病的一门临床医学。近几年刚出现的用于放射治疗的新技术 γ -刀，就是核医学发展的杰出成就之一。 γ -刀的全称是 γ 射线立体定向治疗系统。它采用静态几何聚焦原理，在一个半球面上，不同角度地排列着201个 ^{60}Co 放射源，通过准直器将201束很细的 γ 射线聚焦于一点，并与颅内病灶完全重合。由于聚焦点的射线剂量极高，可在短时间内将颅内病灶击毁。而焦点之外的健康组织受照剂量相对较小，从而达到了比开颅手术更好的治疗效果。

第二节 核外电子结构

原子核内有几个质子，通常核外就有几个绕行电子。这些核外电子的排布和运动规律，则是本书很有实用价值的重要知识。

一、核外电子的排布

研究证明，原子核外的Z（原子序数）个电子，分布在距核远近不同的若干球形电子

壳层上，并绕核旋转。每个电子壳层都有若干个电子轨道。离核最近的电子壳层， $n=1$ (n 为主量子数)，称为 K 层， $n=2$ 的壳层称为 L 层，离核较远， $n=3、4、5、6、7$ 等壳层，分别称为 M、N、O、P、Q 层，依次离核更远。根据泡利不相容原理，每个壳层上最多能容纳的电子数不得超过 $2n^2$ 个，并规定最外层电子数不得超过 8 个 (K 层为最外层时，不超过 2 个)。表 1-3 列出各电子壳层最多可容纳的电子数。

表 1-3 各电子壳层最多可容纳的电子数

主量子数 (n)	1	2	3	4	5	6	7
电子壳层	K	L	M	N	O	P	Q
最多可容纳电子数	2	8	18	32	50	72	98

核外带负电的轨道电子处于带正电的核电场中，具有负电势能；轨道电子绕核运动具有动能，这两部份能量的代数和，就是该壳层电子在原子中的总能量。计算表明任何壳层电子的总能量均为负值，这说明电子在与原子核结合成原子时其能量减少，或者说若把电子从原子中移走，外界必须对电子做功。原子中 $n=1$ 的 K 层电子离核最近，受核的约束最强，能量值最低，依次向外 L、M、N……等壳层电子依次远离原子核，受核的约束递减，能量值递增。 n 可以决定壳层电子的能量值，故把 n 称为主量子数。我们通常将原子核外壳层电子一系列不连续的能量数值称为原子能级，用来表示原子的能量状态。电子在不同壳层的轨道上运动，其能量值不同，原子就处于不同的能级。不同元素的原子，它们能级值也各不相同，通常用不同间隔的一系列水平线来表示原子的能级。每条水平线代表一个能级，各水平线间的距离则表示能级差的大小，以此标准绘制的图称为原子能级图。图 1-1 和图 1-2 是氢原子的电子轨道图和氢原子能级图。由图可见，随着 n 值的增大，能级差愈来愈小，当 $n \rightarrow \infty$ 时，能级差趋于零，能级线由下向上，其能级值由低到高， ∞ 处为零。

根据能量最低原理，核外电子总是首先排满能量最低的内壳层，然后再由里向外，依次排布在能级逐步升高的电子壳层里。

原子核对核外电子有很强的吸引力，离核最近的 K 层电子所受引力最大。显然，要从原子中移走 K 电子所需能量也最多，外层电子受核的引力较小，移走外层电子所需能量也较少。通常把移走原子中某壳层轨道电子所需要的最小能量，称为该壳层电子在原子中的结合能。

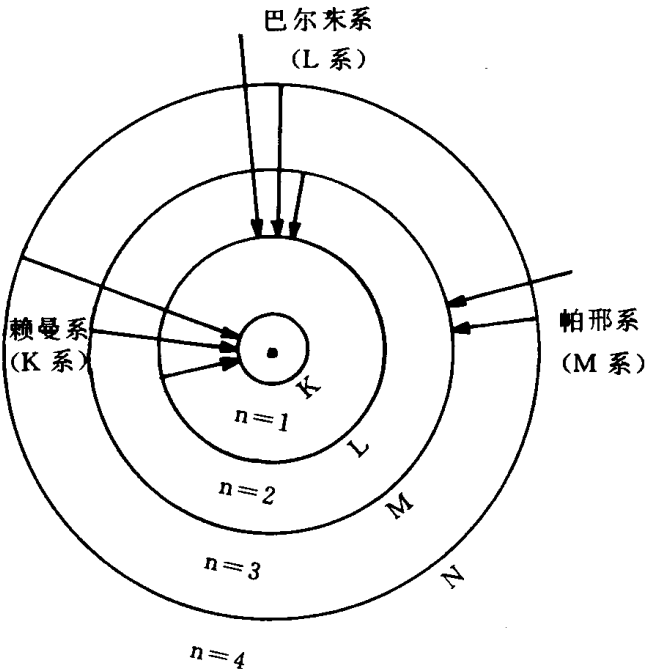


图 1-1 氢原子的电子轨道

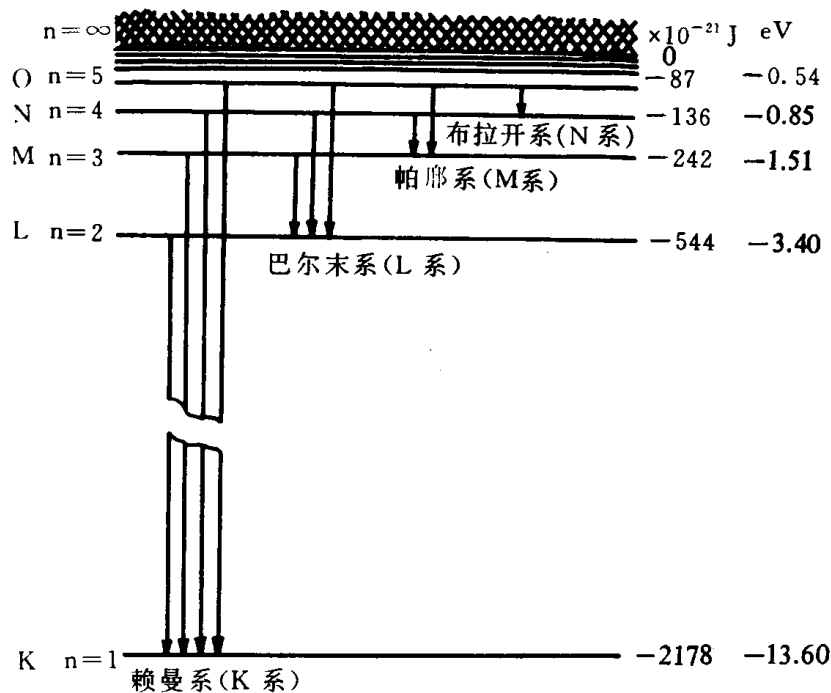


图 1-2 氢原子的能级

原子能级是指电子与核结合成原子时，能量的减少值，而结合能则表示将电子从原子中移走所需最小能量。显然，原子能级是结合能的负值，它们的绝对值相等而符号相反。原子中结合能最大的 K 电子，其能级最低；而结合能较小的外层电子，能级则较高。表1-4列出几种原子不同壳层电子的结合能。

表 1-4 原子核外壳层电子的结合能

原子	原子序数 (Z)	结合能 (keV)			
		K ^{Fe}	L	M	N
H (氢)	1	0.0136	0.0034	0.00151	0.00085
C (碳)	6	0.283	—	—	—
O (氧)	8	0.531	—	—	—
Al (铝)	13	1.559	0.087	0.073	0.072
Ca (钙)	20	4.038	0.399	0.352	0.349
Fe (铁)	26	7.111	0.849	0.721	0.708
Cu (铜)	29	8.980	1.100	0.953	0.933
Sn (锡)	50	29.182	4.139	—	—
I (碘)	53	33.164	5.190	4.856	4.559
Ba (钡)	56	37.410	5.995	5.623	5.247
W (钨)	74	69.508	12.090	11.535	10.198
Pb (铅)	82	88.001	15.870	15.207	13.044

二、原子的激发和跃迁

在正常情况下,核外电子应先填满原子内壳层的低能级轨道,然后依次向外填充,这时原子处于最低能量状态,称为基态,处于基态的原子最稳定。在原子各能级轨道上运动的电子,并不向外释放能量,但当原子吸收一定大小的能量(某两个能级之差的能量)后,电子将自发地过渡到某一较高能级上,这一过程称为原子的激发(图1-3)。

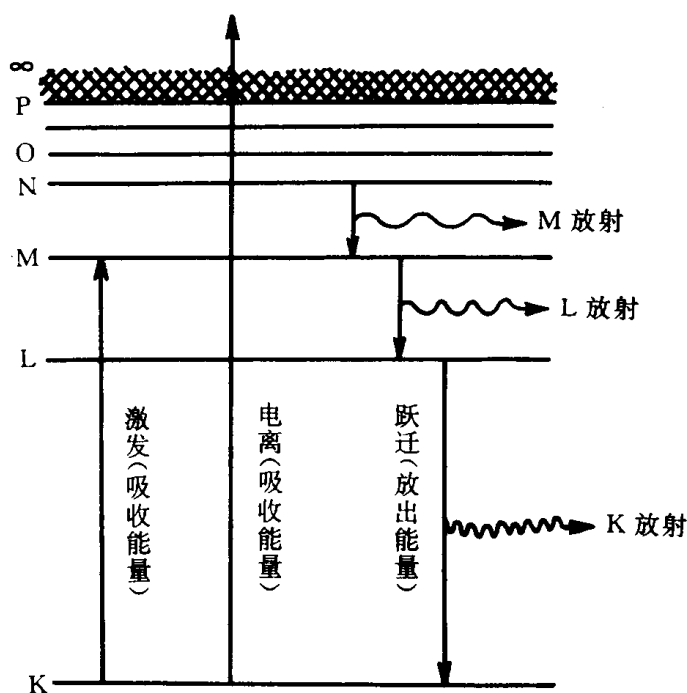


图 1-3 原子的激发和跃迁

当原子中壳层电子吸收的能量大于其结合能时,电子将脱离原子核的束缚,离开原子成为自由电子,这个过程称为电离(图1-3)。激发和电离都使原子的能量状态升高,使原子处于不稳定的激发态。一般原子,在极短的时间(10^{-8}s)内,外层电子或自由电子将自发地填充其空位,同时放出一个能量等于两能级之差的 $h\nu$ 光子,这个过程称为跃迁(图1-3和图1-2)。可见,当原子的壳层电子从一个能量为 E_n 的稳定态过渡(激发或到另一个能量为 E_k 的稳定态时,它将吸收(或发射)具有一定频率的光子,其光子频率为

$$\nu_{nk} = \frac{E_n - E_k}{h} \quad (1-3)$$

式中 E_n 和 E_k 为电子在发生能级过渡前后的能级值; ν_{nk} 为吸收或发射的光子频率(Hz); h 为普朗克常数, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ 。

〔例3〕 求电子由氢原子的 N 能级跃迁到 L 能级时,发射光子的波长是多少?

解:发射光子的频率为

$$\nu_{NL} = \frac{E_N - E_L}{h} = \frac{(-136 + 544) \times 10^{21}}{6.626 \times 10^{-34}} = 6.16 \times 10^{14} \text{Hz} (\text{赫兹})$$

其对应的波长为

$$\lambda_{NL} = \frac{c}{\nu_{NL}} = \frac{3 \times 10^8}{6.16 \times 10^{14}} = 4.87 \times 10^{-7} \text{m} = 487 \text{nm} (\text{纳米})$$

〔例4〕 当钨原子的 K 电子被击脱，由 L 电子跃入填充时，所释放 X 射线光子的能量和频率各是多少？

解：由表1-4查得钨原子的 K 和 L 能级值，并代入 (1-3) 式

故 LK 跃迁时放出 X 射线光子的能量为

$$\begin{aligned} h\nu_{LK} &= E_L - E_K = (-12.090) - (-69.508) \\ &= 57.418 \text{ keV} = 9.2 \times 10^{-15} \text{ J} \end{aligned}$$

放出 X 射线光子的频率为

$$\nu_{LK} = \frac{E_L - E_K}{h} = \frac{9.2 \times 10^{-15}}{6.626 \times 10^{-34}} = 1.39 \times 10^{19} \text{ Hz}$$

第三节 电离辐射与电磁辐射

一、电 离 辐 射

电离是指从原子、分子或其它束缚态释放出1个或多个电子而变为带电离子的过程。

电离辐射简称辐射或放射。凡具有足够的动能，并能直接或间接引起物质电离的粒子，统称电离辐射。它包括带电粒子（如正、负电子，质子和 α 粒子等）和不带电粒子（如 X、 γ 光子和中子等）两部分。

电离过程，主要是由具有足够能量的带电粒子与原子中核外电子的碰撞引起的。X、 γ 光子和中子等中性粒子也能使物质电离，但由它们本身造成的电离，与由它们产生的次级带电粒子随后引起的电离相比微乎其微，达到可以忽略的程度。因此，不带电的电离辐射粒子又称为间接致电离辐射。

综上所述，电离辐射就是由通过初级过程或次级过程引起的电离的带电离子或不带电离子组成，或由两者混合组成的辐射。

二、电 磁 辐 射

电磁辐射即电磁波。电离辐射中的 X、 γ 射线从本质上讲，应属于电磁辐射的一部分。

（一）电磁辐射的基本性质

变化电场和变化磁场相互激发交替产生并携带着能量由近及远的传播过程，便形成电磁波。

电磁波是横波。在自由空间中它的电场和磁场相互垂直同步变化，且都垂直于波的传播方向。

电磁波在真空中有确定不变的传播速度，这个速度就是光在真空中的传播速度 C，电磁波的传播速度由介电常数和磁导率决定。真空中的介电常数 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ 法} \cdot \text{米}^{-1}$ ，磁导率 $\mu_0 = 12.566 \times 10^{-7} \text{ 亨} \cdot \text{米}^{-1}$ ，即

$$C = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{S}^{-1} \quad (1-4)$$

电磁波在其它介质中的传播速度都小于光速。

（二）电磁辐射谱

电磁辐射充满整个宇宙空间。它包括的范围极广，从无线电波、微波、红外线、可见