

全国中等卫生学校试用教材

X线投照技术

(供放射医士专业用)

山东科学技术出版社

全国中等卫生学校试用教材

X 线 投 照 技 术

全国中等卫生学校试用教材

《X 线 投 照 技 术》编写组

*

山东科学技术出版社出版

山东省新华书店发行

山东新华印刷厂潍坊厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 20.5 印张 410 千字

1980 年 5 月第 1 版 1980 年 5 月第 1 次印刷

印数: 1—13,000

书号 14195·54 定价 1.65 元

编写说明

本书是由中央卫生部和山东省卫生局组织有关研究所、高、中等医学院校、医院共同编审的教材，供全国中等卫生学校三年制放射医士专业试用。

全书分X线物理基础、X线投照原理及应用、投照操作常规、摄影位置、造影检查、特殊检查、暗室技术及诊断用X线的防护八章，有些章节重点进行了叙述。为使书稿内容的连续性，将暗室技术列为第七章，授课时可根据情况适当提前讲叙。

参加编写本教材的单位有：山东省放射医学研究所、山东省莱阳卫生学校、山东省泰安卫生学校、山东省济南市卫生学校、山东省临沂卫生学校、沈阳中国医科大学附属医院、山东医学院附属医院、安徽蚌埠市立第三医院、山东省结核病防治院、山东交通医院。

参加审稿的单位有：山东省放射医学研究所、北京医学院第一附属医院、上海曙光医院、青岛市立医院、山东省昌潍地区人民医院、莱阳卫生学校和泰安卫生学校。

本教材力求反映本学科的一些较新成就，但由于编写人员水平所限，经验不足，加之编写时间仓促，征求意见不够广泛，书中可能存有不少缺点和错误。因此，殷切希望使用本教材的教师和同学及时提出宝贵意见，以便进一步修订提高。

全国中等卫生学校试用教材
《X线投照技术》编写组

1979年10月

目 录

第一章 X线物理基础.....1	清晰度.....43
第一节 物质结构.....1	影象的失真度.....45
物质的基本组成简介.....1	第五节 曝光条件表的制定与应用.....46
原子核外结构.....2	制定曝光条件表.....46
原子能级及光线辐射.....3	曝光条件表的灵活应用.....47
第二节 X线的产生.....9	第三章 投照操作常规.....49
X线的产生条件.....9	第一节 X线机操作规程及注意
连续放射和标识放射.....9	事项.....49
X射线强度空间分布.....13	X线机的使用原则.....49
第三节 对X线能的认识.....14	操作技术.....49
X线的微粒性.....14	注意事项.....49
X线的波动性.....15	第二节 投照原则.....50
X线的二象性及其统一.....15	第三节 X线摄影步骤.....51
第四节 X线与物质的相互作用.....15	第四节 X线片标记法.....52
物质对X线的吸收.....16	第四章 摄影位置.....55
散射线.....18	第一节 解剖术语及投照常
X线的一般效应.....19	位置.....55
第二章 X线投照原理及应用.....20	第二节 四肢.....56
第一节 X线成像基本原理.....20	上肢.....57
第二节 密度与感光效应.....20	手后前位.....57
密度及其形成.....20	手掌下斜位.....58
感光效应与X线曝光条件.....22	手掌上斜位.....58
感光效应公式.....22	手侧位.....59
各曝光条件之间的关系.....23	手指侧位.....60
感光效应与人体组织的关系.....25	腕关节后前位.....60
第三节 X线的几何投影.....26	腕关节侧位.....60
X线束.....26	腕部外展位.....61
有效焦点大小.....27	舟状骨斜位(双45度角).....62
焦点、肢体和胶片间的投影关系.....31	尺桡骨前后位.....62
被照肢体影象的放大.....31	尺桡骨侧位.....63
肢体与胶片的位置.....32	肘关节前后位.....63
影象的重迭.....34	肘关节侧位.....64
切线位.....34	肘关节轴位.....65
第四节 X线照片的质量.....34	肱骨前后位.....66
照片密度.....35	肱骨侧位.....66
对比度.....35	肱骨上段侧位.....67
层次.....43	肩关节前后位.....68

肩胛骨前后位(上臂外展).....	68	腰椎前后位.....	99
肩胛骨前后位.....	69	腰椎侧位.....	100
肩胛骨侧位.....	71	腰椎斜位.....	101
锁骨前后位.....	71	腰骶关节前后位.....	101
锁骨上下轴位.....	72	腰骶关节侧位.....	102
下肢.....	72	骶尾椎前后位.....	102
足正位.....	72	骶尾椎侧位.....	103
足侧位.....	73	第五节 骨盆	104
足内斜位.....	74	骨盆前后位.....	104
全足正位(两次曝光法).....	75	髌骨前后位.....	105
跟骨侧位.....	76	骶髂关节前后位.....	105
跟骨轴位.....	76	骶髂关节斜位.....	106
踝关节前后位.....	77	耻骨后前位.....	107
踝关节侧位.....	78	坐骨前后位.....	107
胫腓骨前后位.....	78	第六节 头颅	108
胫腓骨侧位.....	79	头颅后前位.....	110
膝关节前后位.....	79	头颅侧位.....	111
膝关节侧位.....	81	颅底颌顶位.....	112
髌骨轴位.....	81	颅底顶颌位.....	113
髌骨斜位.....	82	蝶鞍后前位.....	113
股骨前后位.....	83	蝶鞍侧位.....	114
股骨侧位.....	84	头颅前后方向半轴位.....	115
股骨颈及髌关节前后位.....	85	茎突前后位.....	115
股骨颈及髌关节侧位		茎突侧位.....	117
(仰卧水平投照).....	85	视神经孔斜位.....	117
股骨颈及髌关节后前斜位		舌下神经孔位.....	118
.....	86	颈静脉孔位.....	118
腕关节和股骨颈侧位(蛙形位).....	86	鼻骨侧位.....	119
第三节 胸廓	87	鼻骨轴位.....	120
胸骨后前位.....	88	颞骨弓轴位.....	120
胸骨侧位.....	89	乳突.....	121
膈上肋骨前后位.....	90	乳突双15度侧位.....	122
膈下肋骨前后位.....	90	乳突25度侧位.....	122
肋骨斜位.....	91	乳突35度侧位.....	123
肋骨切线位.....	92	岩乳部双45度轴位.....	124
胸锁关节后前位.....	92	岩乳部斜位.....	124
第四节 脊柱	93	听骨斜位.....	125
颈椎前后位.....	95	副鼻窦.....	126
第一、二颈椎张口位.....	95	副鼻窦后前23度位.....	126
颈椎侧位.....	96	副鼻窦后前37度位.....	127
颈椎斜位.....	96	蝶窦顶颌位.....	128
胸椎前后位.....	97	副鼻窦侧位.....	128
胸椎侧位.....	98	上颌窦后壁位.....	130
胸椎上段侧位.....	99	下颌骨.....	130

下颌骨后前位	130	腔静脉造影	169
下颌骨侧位	131	四肢血管造影	169
下颌骨颈部(上下斜位)	131	第五节 淋巴系统造影	170
下颌关节侧位	132	第六节 泌尿系统造影	172
第七节 牙齿	133	静脉尿路造影	172
上颌咬合片	134	大剂量静脉尿路造影	174
下颌咬合片	135	逆行肾盂造影	175
齿形片	136	穿刺肾盂造影	175
咬翼片	138	膀胱造影	176
第八节 胸部	138	尿道造影	178
胸部后前位	140	腹膜后充气造影	178
胸部侧位	140	第七节 生殖系统造影	179
胸部右前斜位(第一斜位)	141	子宫输卵管造影	179
胸部左前斜位(第二斜位)	142	盆腔充气造影	181
胸部前凸位(前后方向)	143	精囊、输精管造影	182
胸部前凸位(后前方向)	143	第八节 膝关节造影	183
胸部半坐前后位	144	膝关节充气造影	183
胸部侧卧后前位	144	膝关节双重造影	185
胸部仰卧侧位	145	第九节 瘰管及窦道造影	186
第九节 腹部	146	第十节 五官科造影	187
腹部前后位	146	上颌窦造影	187
腹部后前位(胆区)	147	泪道造影	188
腹部侧位	147	腮腺造影	189
腹部斜位(检查胎儿用)	148	第十一节 神经系统造影	190
腹部站立前后位	148	小剂量定向气脑造影	192
腹部侧卧后前位	149	坐位——头前倾 15 度水平侧位	193
腹部倒立前后位	149	坐位——头前倾 20~25 度后前位	194
腹部倒立侧位	149	坐位——头后仰 35 度角水平	
第五章 造影检查	151	侧位	195
第一节 概述	151	仰卧——前后位	195
造影剂	151	俯卧——后前位	196
造影前的准备	154	俯卧——左、右侧位	197
造影检查发生的意外及其抢救	155	俯卧——水平侧位	198
第二节 胆系造影	158	仰卧——顶低水平侧位	198
口服胆囊造影	158	仰卧——颞角轴位	199
静脉胆系造影	159	俯卧——枕额 20 度角位	200
口服加静脉胆系造影	160	仰卧——水平侧位	201
静脉滴注胆系造影	160	俯卧——顶低水平侧位	201
手术中胆道造影及术后 T 形管造影	160	俯卧——顶低枕额位	202
第三节 支气管造影	161	俯卧——头低侧位	203
第四节 心脏及血管造影	164	脑室充气造影	203
心脏造影	166	脑室碘液造影	204
主动脉造影	168	颈内动脉造影	204

仰卧——水平侧位	205	轴位	240
仰卧——前后位	205	侧位	241
椎动脉造影	207	耻骨弓位	242
椎管造影	208	测量方法	243
第六章 特殊检查	209	第六节 放大摄片	243
第一节 体层摄影	209	第七节 软组织摄影	245
原理	209	概述	245
种类	210	设备	246
体层摄影背景的模糊度	211	应用	246
被摄体层的厚度	213	乳房侧位	246
影响被摄体层影像清晰度的因素	215	乳房轴位	246
同时多层体层摄影原理	215	乳房切位	247
注意事项及操作方法	216	颈部软组织侧位	247
各部位体层摄影	217	颈部前后位	247
肺部	217	鼻咽部侧位	248
支气管	219	四肢软组织	248
喉部	223	第八节 高千伏摄影	248
下颌关节	224	概述	248
内听道	224	设备	249
颅底	225	应用	249
上颌窦	225	优缺点	249
视神经孔	226	第九节 硒静电X线摄影	250
蝶鞍	226	原理	250
胆囊造影体层	227	设备	251
脑室造影体层	228	操作步骤及工作过程	252
肾上腺造影体层	228	第十节 CT 概述	253
脊柱	228	第七章 暗室技术	256
胸骨及胸锁关节	229	第一节 暗室技术的重要	
第二节 记波摄影	229	性及范畴	256
原理	230	第二节 暗室设计及布局	256
种类	230	房间的大小、位置及设计原则	256
应用	230	建筑要求	256
关于波形失真	231	暗室通风及室温	257
第三节 荧光摄影	231	水源及排水	258
第四节 眼球异物及定位	233	暗室照明	258
平片检查	233	暗室布局	258
薄骨位	233	第三节 暗室设备	259
无骨位	234	洗片桶与自动洗片机	259
异物定位	234	洗片池	259
巴尔金氏法	234	工作台与胶片橱及暗盒架	259
斯维特氏法	236	胶片干燥设备	259
方格定位法	239	配药容器	261
第五节 骨盆测量	240		

第四节 暗室器材	261	第二节 作用于人体的X线来源	288
X线胶片	261	有用射线	288
暗盒	264	漏出射线	289
增感屏	265	散射线	289
暗室一般器材	267	第三节 最大容许剂量当量	
第五节 X线胶片的感光原理	269	和限制剂量当量	290
感光原理	269	第四节 防护物质	291
潜影的形成	269	物质的防护效能	291
第六节 显影	269	常用防护物质	291
显影原理	269	防护物质的铅当量	292
显影液的成分及作用	270	X线穿过铅板的减弱曲线	292
显影液配方	272	第五节 X线机房屏蔽设计	293
显影液的配制	272	防护原则	293
显影液的贮存	273	计算防护物质厚度的方法	294
胶片的显影操作	273	第六节 诊断X线机的防护措施	294
第七节 定影	275	X线机的防护设施	294
定影原理	275	防护设备及用具	295
定影液的成分及作用	275	X线检查防护注意事项	295
定影液的配制	276	实验指导及见习	296
定影操作时注意事项	277	实验一 阳极效应实验	296
第八节 水洗	277	实验二 焦点大小产生的影象模	
水洗目的	277	糊及肢~片距对其模糊	
水洗时间及温度	277	的影响	296
水洗程度的试验	278	实验三 管电压对影象密度、对	
第九节 暗室工作操作步骤	278	比度和层次显示的影响	297
X线片的装卸	278	实验四 滤线器的用法	298
照片的干燥	280	实验五 投照右手掌下斜位、左	
照片的整理	280	腕关节前后位、侧位及	
胶片的存档	280	左肩关节前后位	299
第十节 盘洗	280	实验六 投照右跟骨轴位和膝关	
第十一节 缩影片的冲洗	281	节前后位及侧位	301
第十二节 暗室特殊处理技术	281	实验七 投照颈椎前后位、侧位	
快速显影	281	及右前斜位	302
高温显影	282	实验八 投照腰椎前后位、侧位	
高温定影	282	及左前斜位	303
低温显影	282	实验九 投照头颅后前位、侧位	
照片加厚法	283	及汤氏位	305
照片减薄法	283	实验十 投照乳突双15度侧位、	
X线照片的翻印	284	岩乳部双45度轴位	306
第十三节 照片上伪影及缺点		实验十一 投照副鼻窦后前23度	
形成的原因	284	位、后前37度位	307
第八章 诊断用X线的防护	287		
第一节 X线的照射剂量单位	287		

实验十二	投照左侧下颌骨侧位 及右侧下颌关节侧位.....	308	实验十七	X线管运动轨迹与背 景模糊度的关系	314
实验十三	投照上、下颌咬合片、 左上 4、5 左下 6、7、 8 齿形片	309	实验十八	放大摄影	314
实验十四	投照胸部后前位、侧 位及双斜位	310	实验十九	硒静电摄影	315
实验十五	投照视神经孔斜位	312	实验二十	安全灯实验	316
实验十六	体层摄影原理及照射 角和体层厚度的关 系	313	实验二十一	配制显影液及定 影液	316
			实验二十二	胶片水洗实验	317
			见习一	静脉尿路造影	317
			见习二	静脉胆系造影	318
			见习三	诊断用X线的防护	318

第一章 X线物理基础

第一节 物质结构

物质的基本组成简介

根据分子—原子论，一切物质都是由分子组成的，分子是物质保持原有一切化学性质的最小粒子，分子又是由更小的微粒—原子所组成，原子是不能用化学方法再分解下去的最小颗粒，所以原子一名来自希腊文，是不可再分的意思。一定种类的原子，具有相同的化学性质称为“元素”。一个分子可由一种元素或几种元素组成。原子均有一个中心带正电的“核”及周围有着不停运动的带负电荷的“电子”组成，原子核又由质子和中子组成。所以在原子结构中，由电子、质子、中子等这些基本颗粒组成，原子并决定着各元素的性质。

电子：带负电荷，电量为 4.803×10^{-10} 静电系单位电量 (1.601×10^{-19} 库仑)，彼此相斥，其相斥力与距离平方成反比，其质量为 9.107×10^{-28} 克。

质子：带有正电荷，其带电量与电子带电量相等，彼此相斥，但与电子则相互吸引。质子质量比电子质量约大 1835 倍，它占有空间并集中于原子核内。

中子：不带电性，或者说它的负电荷量与正电荷量完全相等，是一种中性粒子。也占有空间，其质量几乎与质子质量相等，也集中于原子核内。

原子间的差别在于电子、质子、中子数目与安排不同而异。现已发现的元素有 105 种。氢的结构最简单，核外有一个电子，核内有一个质子。其他元素则是由一个或更多的电子，质子和中子所组成。例如铀 (${}_{92}^{238}\text{U}$) 核外有 92 个电子，核内有 92 个质子和 146 个中子组成，核外电子数目与核内质子数目相等，所以对整个原子来说，对外不显带电现象。

由于质子或中子要比电子重 1835 倍，因此可以说一个原子的质量，都集中于核内。另外核小而紧密，半径约为 10^{-12} 厘米，围绕原子核旋转的电子云，在半径约为 10^{-8} 厘米的一些轨道上运行，电子与原子核相比，电子质量很小，但占据着很大的空间。可以这样比喻：假若一个原子扩大到“占据一间房间”那么大，则其核处于房间的中心，而

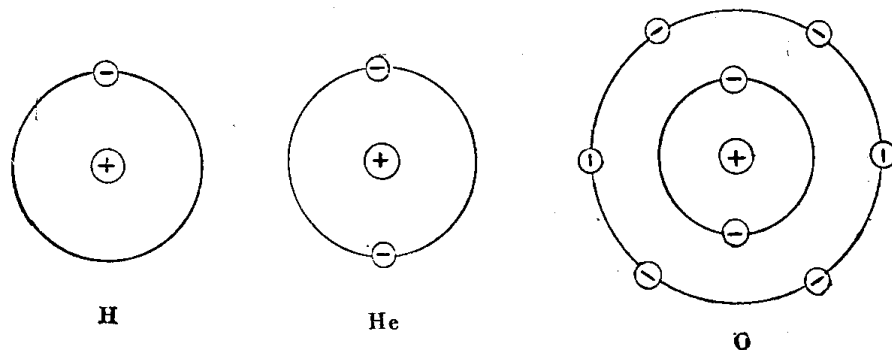


图 1~1 玻尔原子构造模型

它所占据的空间,也仅仅似针尖那么一点点。由于所谓固体物质的这种“空虚性”,因此,一个高能电子可很容易地穿过许多原子后才与一原子的任何部分相撞。

一个原子犹如太阳系一样,它的核如同太阳,围绕的电子就如同行星沿一定的轨道旋转(图 1~1)。电子和核之间存在着相互吸引力,此力不断地改变电子运动方向,恰使电子沿一圆轨道旋转,同时电子所受的吸引力等于电子旋转的离心力,因此,电子能沿此圆轨道稳定地旋转。

原子核外结构

原子的核外电子就象行星一样在核外旋转,但其轨道并不是任意的,而是沿着一定轨道旋转。

氢(${}^1\text{H}$)原子是最简单的原子,它的核外结构,根据丹麦物理学家玻尔在一九一三年的研究,认为假设电子旋转的轨道半径为 r 的圆,那么电子运动轨道公式:

$$r_n = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m z e^2} \quad (n = 1, 2, 3 \cdots)$$

式中的 h 是普朗克常数($h = 6.62 \times 10^{-27}$ 尔格·秒); m 是电子的质量; z 为原子序数; n 是电子的主量子数,为正整数, n 决定轨道的大小及近似决定轨道电子所具有的能量。氢的原子序数为 1,根据这个公式我们可以计算氢原子核外电子运动的最小轨道半径和其他可能的轨道半径值。

当 $n = 1$ 时,就能得出氢原子核外电子运动的最小轨道半径:

$$r_1 = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 z m e^2} = 0.53 \times 10^{-8} \text{ 厘米} = 0.53 \text{ 埃}(\text{\AA}) \quad (1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ 厘米})$$

其他可能的轨道半径:

$$\text{当 } n = 2 \quad r_2 = 0.53(2^2) = 2.22 \text{ \AA}$$

$$\text{当 } n = 3 \quad r_3 = 0.53(3^2) = 4.77 \text{ \AA}$$

$$\text{当 } n = 4 \quad r_4 = 0.53(4^2) = 8.48 \text{ \AA}$$

.....

$$\text{即: } r_n = 0.53 n^2$$

可见氢核外电子只能沿一些不连续的圆周轨道运动。

对于其他元素的原子来说,随着原子序数的增加,它们的电子分布及运动情况要比氢原子的电子复杂的多,按照玻尔的理论,它们在离核远近不同的一定轨道上运动,这些轨道可以分好几层,它们叫做电子的壳层,每一壳层中都含有一定数目的可能轨道,近似地说,这些壳层可以看作是原子核的同心圆球(图 1~2 B_1 、 B_2)。半径最小的壳层叫做 K 壳层,最多只能容纳 2 个电子;第二壳层叫做 L 层,最多只能容纳 8 个电子;第三壳层叫做 M 层,最多可容纳 18 个电子;随原子序数的增加可还有 N 、 O 、 P 、 Q 等层,轨道愈到外面可以容纳的电子数就愈多,一般每层上电子最大可能数目是 $2n^2$,但是最外一层上的电子数却有严格的限制,最多不能超过 8 个。

一般规律是电子先将内层填满,然后顺序向外填。例如对钠来说,它的原子序数是 11,那么它的 K 层和 L 层先被填满,剩下的一个电子在 M 层(图 1~2 A)。

在图(1~3)所表示的氢、碳、氮等原子结构可以看出氮、氦由于其外层轨道电子填满之故,不能再获得电子或放走电子所以是惰性气体,难以使之发生化学反应。而碳的

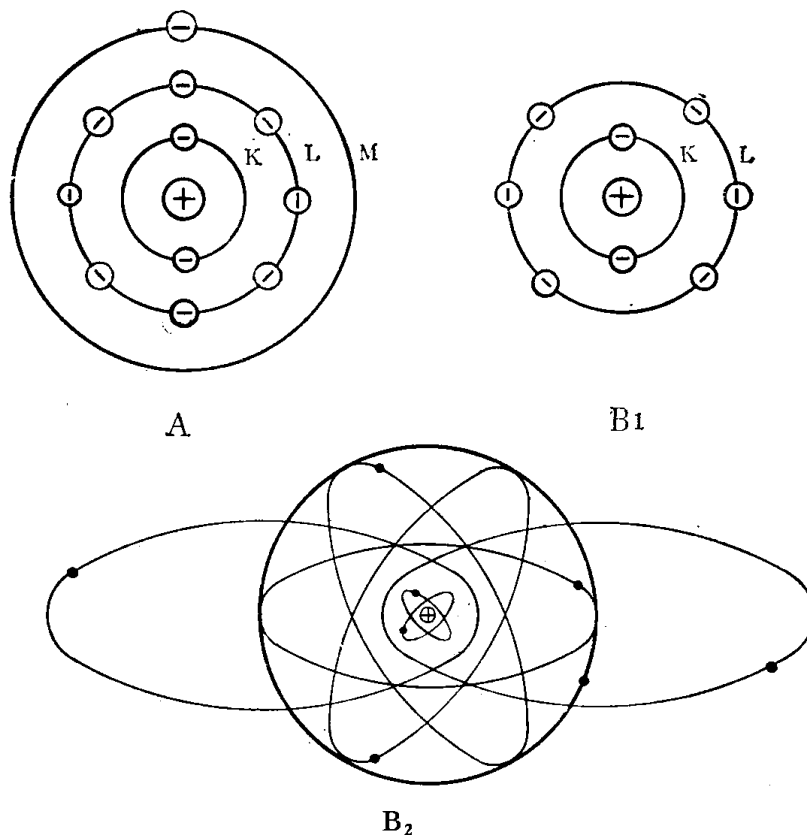


图 1~2 元素壳层结构示意图
A 钠元素壳层结构 B₁B₂ 氧元素壳层结构

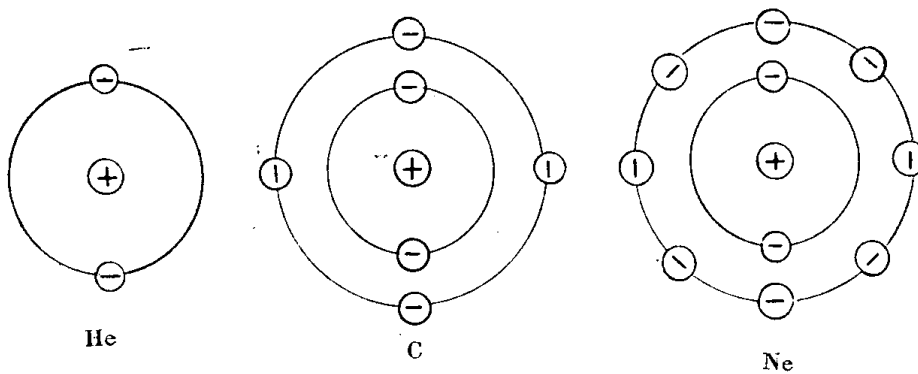


图 1~3 氦、碳、氖原子结构图

最外层电子是 4 个，未满 8 个，它可以放走 4 个电子或取得 4 个电子而趋于稳定，故可能形成许多化合物，在(图 1~2)表示的氧原子最外层电子还差两个电子才能填满，要满足最外层电子数 8 个，它将获得 2 个电子达到稳定。通常物质的化学性质和化合价，决定于其原子最外层轨道上未填满的电子数。最外壳层上的电子称为价电子，某元素的原子失去的电子数，称为该元素的正化合价数，某元素的原子得到的电子数，称为该元素的负化合价数。

原子能级及光线辐射

根据玻尔的假设，电子在不连续的轨道上绕核旋转，且在每个可能轨道上的电子也都有一定的能量(动能和电势能的代数和)，因而电子在各个可能轨道上所具有的能量也是不连续的。这些不连续的能量数值叫做原子能级。

电子在各个可能轨道上运动时，所具有的能量是电子所具有的电势能和动能之和。

即：

$$E = -\frac{2\pi^2 me^4 z^4}{h^2 n^2} \quad (n=1,2,3\cdots)$$

以上公式称为能级公式， E 代表轨道电子所具有的能量，它的单位是尔格，原子能级常以电子伏特来表示，1 电子伏特(eV)等于 1.60×10^{-12} 尔格。若把 E 值化为电子伏特，就必须除以 1.60×10^{-12} 尔格，即：

$$E = -\frac{2\pi^2 me^4 z^4}{1.60 \times 10^{-12} h^2 n^2} \quad (n=1,2,3\cdots)$$

把各个已知的常数代入上式，取 $z=1$ 就可算出氢原子能级公式：

$$E = -\frac{13.6}{n^2} \quad (n=1,2,3\cdots)$$

当 $n=1$ $E_1 = -13.60$ 电子伏特

$n=2$ $E_2 = -3.40$ 电子伏特

$n=3$ $E_3 = -1.51$ 电子伏特

$n=4$ $E_4 = -0.850$ 电子伏特

$n=5$ $E_5 = -0.544$ 电子伏特

.....

不同的原子，它的能级都不一样，但基本上都可以用能级公式算出。

例如钨($^{74}_{183}\text{W}$)它的能级是 $E_K = -70000$ 电子伏特， $E_L = -11000$ 电子伏特， $E_M = -2500$ 电子伏特，.....。

原子能级还可以形象地用一系列的平行直线来表示，(图 1~4)是氢原子的能级图，

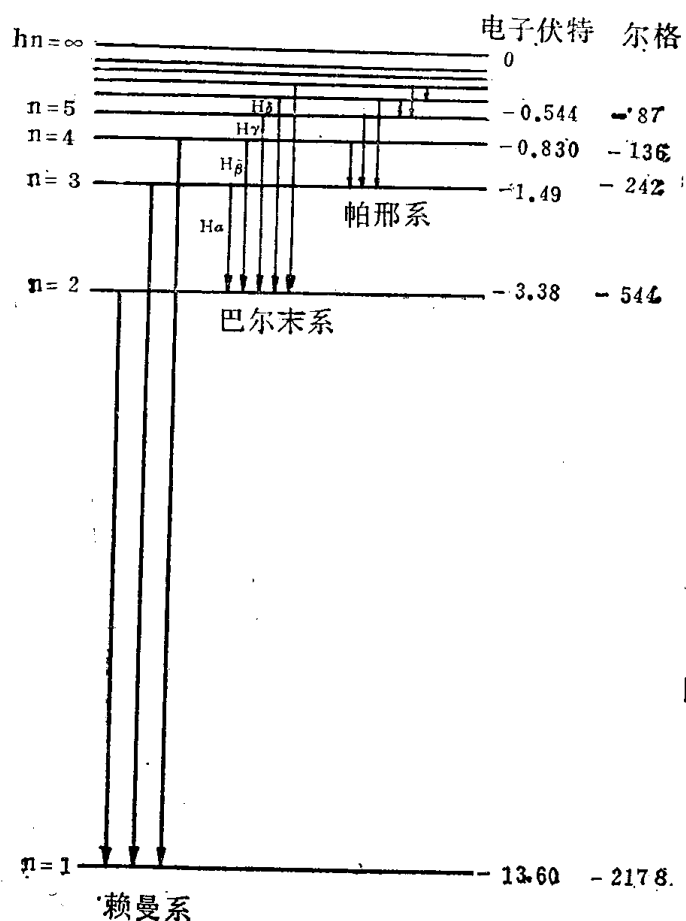


图 1~4 氢原子能级图

(图 1~5 A、B)为钨的能级示意图。

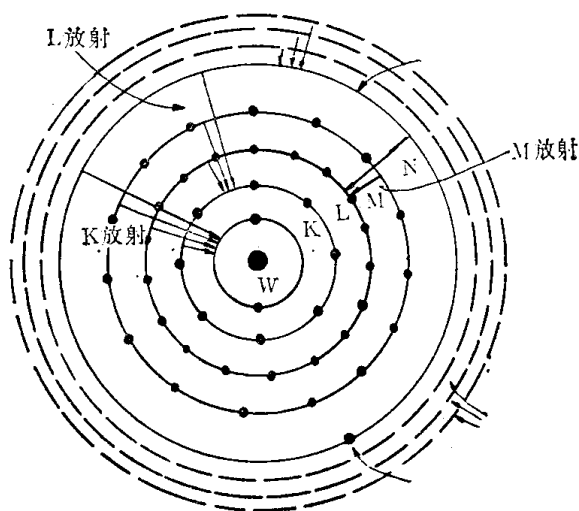


图 1~5 A 钨原子的轨道示意图

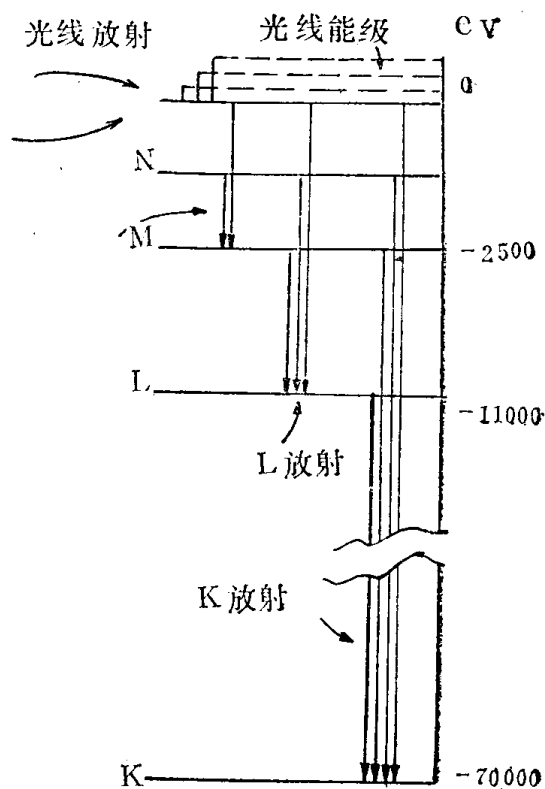


图 1~5 B 钨原子的能级示意图

能量是相对的量。在正电荷的电场中，通常规定静止在无限远处的正电荷所具有的能量为零，离建立电场的正电荷越近，这个正电荷所具有的能量就越大，对于处在原子核的电场中的电子来说，由于它带负电荷，所以情况正相反，电子的电势能总是负的，而且离核越近，电势能负的越大，能量就越小。电子在可能轨道上运动时，所具有的能量是 $E_{势}$ 和 $E_{动}$ 之和，由能级公式可知其能量值为负，随着 n 的增大 E 值逐渐增大，表示电子运动的可能轨道离核愈远，电子所具有的能量也愈大。

根据玻尔的研究，当电子在某一轨道上运动时，它处于稳定状态，并不向四周辐射能量，但它吸收了一定大小的能量之后，就可以跃迁到能量较大的轨道上去，但又并不是任何大小的能量都可被电子吸收，只有等于某两个可能轨道的能量差的能量才被电子吸收，电子吸收能量跳到能量较高的轨道上后，处于激发状态，这时它是不稳定的，它要跃迁到能量较低的轨道上去，并发出光子（图 1~6 A），其光子所具有的能量 $h\nu$ 等于电子在跳跃前后所具有的能量差，即：

$$h\nu = E_{n_2} - E_{n_1}$$

式中 h 是普朗克常数， ν 是光子的频率。 E_{n_2} 、 E_{n_1} 分别表示电子在跳跃前后所在轨道上的能量。

下面是氢原子内的电子在激发状态下发生电子跃迁时放出光子频率：若电子被激发

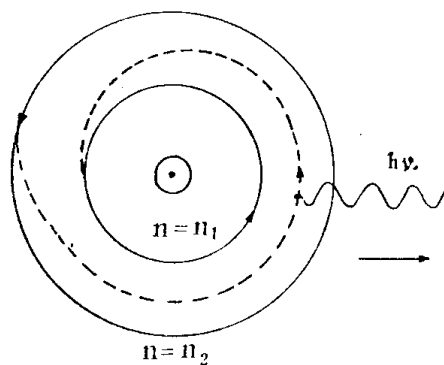


图 1~6 A 氢原子电子发射光子示意图

到 $n=3$ 的可能轨道上，它跳回 $n=2$ 的可能轨道上放出的能量为：

$$E_{n_1} - E_{n_2} = -1.49 - (-3.38) = 1.89 \text{ 电子伏特。}$$

这些能量以光子形式放出，其光子频率为

$$\nu = \frac{E_{n_1} - E_{n_2}}{h} = \frac{1.89 \times 1.60 \times 10^{-12}}{6.62 \times 10^{-27}} = 4.57 \times 10^{14} \text{ 赫兹。}$$

这一频率等于 H_α 的频率。由此可见，当电子从 $n=3$ 的轨道上跃迁到 $n=2$ 的轨道上时，就发出可见光 H_α ，类似的计算，可知当电子从 $n=4, 5, 6 \dots$ 的轨道上跃迁到 $n=2$ 轨道上时，分别发出 $H_\beta, H_\gamma, H_\delta \dots$ 光线，即电子从 $n>2$ 的轨道上跃迁到 $n=2$ 的轨道上时发出各种频率的可见光。由于电子在其他轨道上的能量与它在第一轨道上的能量相差较大，所以，当电子从 $n>1$ 的轨道上跃迁到 $n=1$ 的轨道上时，放出的光的频率比可见光大，即发射紫外线。同样，电子在 $n>3$ 的轨道上的能量和它在 $n=3$ 轨道上的能量差较小，所以当电子从 $n>3$ 的轨道上跃迁到 $n=3$ 的轨道上时，发射的光的频率比可见光低，即发射红外线(图 1~6 B)。不过受激光的电子，获得小于 13.6 电子伏特的能量而跃迁时，可能一次跳回 $n=1$ 的可能轨道放出光子；也可能先跳回 $n=2$ 的轨道放出光子，然后再跳回 $n=1$ 的可能轨道并放出光子；它还可能先跳到 $n=3$ 的可能轨道放出光子，然后再跳到 $n=2$ 的可能轨道发出光子，最后再跳回 $n=1$ 的可能轨道发出光子。在正常情况下，氢原子的唯一电子总是在最靠近核的轨道上($n=1$)运动。但若电子获得大于 13.60 电子伏特的能量时，这就足以使它从 $n=1$ 可能轨道跳到 $n=\infty$ 能级上去，即电子脱离氢原子，氢原子成了正离子。

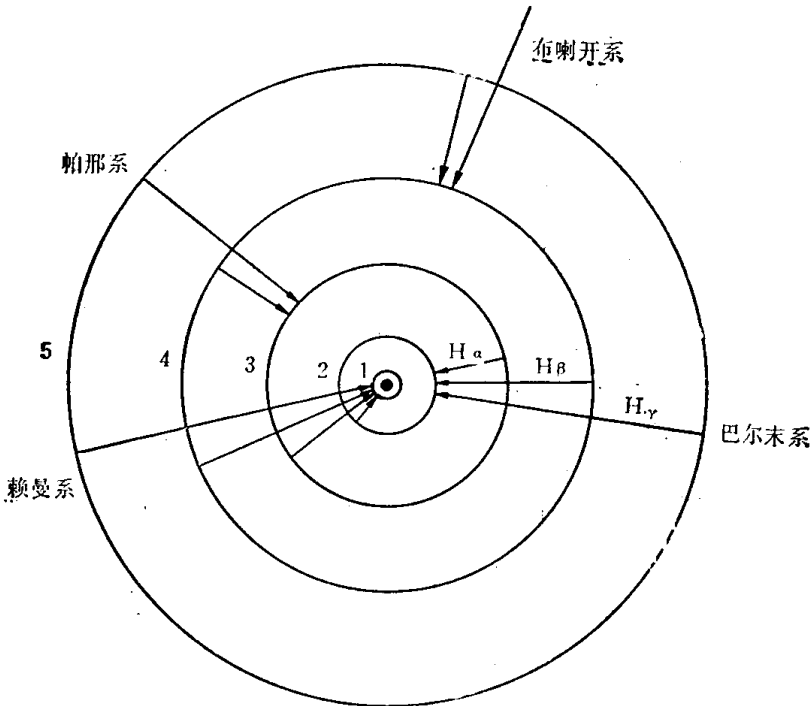


图 1~6 B 氢原子状态的过渡图

不仅氢原子的电子受激发时产生电子跃迁放出光子，而且各种元素的原子核外电子由半径较大的轨道跃迁到半径较小的轨道时，都要发出光子。在外面壳层轨道上的电子，只要里面壳层轨道上有空位时，总是要跳到里面轨道上。原子的外层电子与核的联系较弱，因此，激发外层电子要比激发内层电子容易些，较外层电子受激发后，壳层上留有空位，这一壳层外的其他壳层上的电子，就跃迁到这个空位上来补充，这时，就有可见

光、红外线或紫外线放出来。最内层电子受激发后，外面壳层上的电子跃迁到内层空位上来，将发射出波长更短，频率更高的电磁波(X线)。例如原子序数较高的钨，假若有一个高速电子撞击到钨原子上，并击出一个K层电子，在一个很短的时间内，另一L层上的电子可能会跳到K层上去，占据其空位，此过程将放射出5,900电子伏特的X线光子，其频率为：

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{E_L - E_K}{h} = \frac{[-11000 - (-70000)] \times 1.60 \times 10^{-12}}{6.62 \times 10^{-27}} \\ &= \frac{59000 \times 1.60 \times 10^{-12}}{6.62 \times 10^{-27}} = 1.40 \times 10^{19} \text{ 赫兹} \end{aligned}$$

其波长为：

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \times 10^{10}}{1.4 \times 10^{19}} = 0.21 \times 10^{-8} \text{ 厘米} = 0.21 \text{ 埃}(\text{\AA})$$

上式中 c 代表光速，其值为 3×10^{10} 厘米/秒。

高速电子击出L或M壳层上的电子，而不触及K层上电子的机会也可能出现。假若L壳层电子被击出，而其空位为一个M壳层上电子所填充，则发射出X线光子，其波长 $\lambda = 1.46$ 埃，频率 $\nu = 0.2 \times 10^{19}$ 赫兹。在这里需要说明的是原子轨道上的任何电子都有被高速电子撞击而形成电子跃迁可能，而且任何一个轨道上的空位都能用多种方式来补充。例如，若K层上电子被撞击出去，则L、M、N、O等壳层上的电子都可能跳到K层的空位上去(见图1~5)。并放出一定频率的X线。

根据上面叙述与计算，可以得出这样的结论：X线的波长(或频率)是与原子中被击出去电子所在壳层有关。如在同种元素的原子中，按照轨道K、L、M、N……来分，L层电子被击出时产生的X线比M层电子被击出去时所产生的X线波长要短，M层电子被击出就比N层电子被击出所产生的X线波长短……，以次类推，很明显内层轨道被激发所产生X线波长较短，外层轨道电子被激发产生的X线波长较长。另外，当某层轨道电子被击出后，还要看是哪一壳层的电子来补充而产生的X线光子，例如K层电子被击出，L层或M层上电子都可以跳入到K层中去补充，但M层电子跳入补充时产生的X线波长要比L层电子跳入时产生的X线波长要短。

根据光的电磁学说，光波与电磁波本质上是一样的，可见光、红外线、紫外线、X线都是电磁波，只是频率不同(波长不同)，下面是各种电磁波按波长不同，排列成的电磁波谱(图1~7)。

例一 求氢原子的游离能。

解：氢原子的游离能就是将电子由轨道 $n=1$ 拿到离原子核无限远处所需要的功，氢原子的能级公式：

$$E_n = - \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2 n^2}$$

所以氢原子的游离能为：

$$E = E_\infty - E_{n_1} = -E_{n_1} = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2 n^2} = 2.18 \times 10^{-11} \text{ 尔格} = 13.60 \text{ 电子伏特}。$$

例二 求氢原子的电子由 $n=4$ 的轨道跃迁到 $n=2$ 的轨道上时，所发出光的波长？

解：由公式

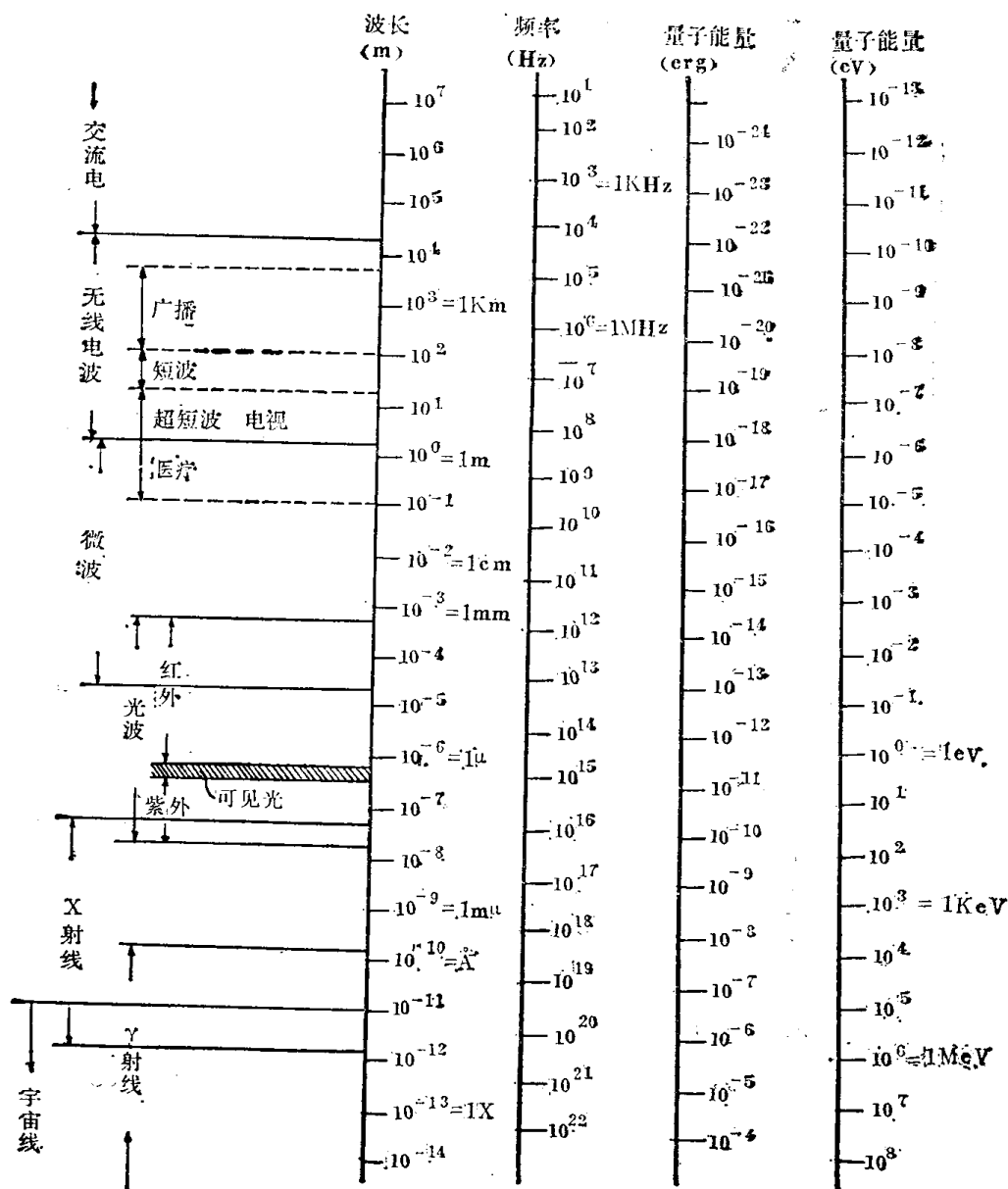


图1~7 电磁波图

$$\nu = \frac{E_{n_2} - E_{n_1}}{h} \quad \text{得:}$$

$$\nu = \frac{[-0.83 - (-3.38)] \times 1.60 \times 10^{-12}}{6.62 \times 10^{-27}} = 6.17 \times 10^{14} \text{ 赫兹。}$$

所求波长为:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \times 10^{10}}{6.17 \times 10^{14}} = 4.86 \times 10^{-5} \text{ 厘米} = 4862 \text{ 埃。}$$

例三 求钨原子中 L 层电子被击出后, M 层电子跳入补充时所发出光的波长?

解: 由公式可得:

$$\nu = \frac{E_M - E_L}{h} = \frac{[-2500 - (-1100)] \times 1.60 \times 10^{-12}}{6.62 \times 10^{-27}} = 0.2 \times 10^{19} \text{ 赫兹}$$

其所求波长为:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \times 10^{10}}{0.2 \times 10^{19}} = 1.46 \text{ 埃}(\text{\AA}).$$