

放射綫治疗物理学

陈 玉 人 译

上海卫生出版社

放射綫治疗物理学

Harold Elford Johns 著

陈玉人 译

上海卫生出版社

一九五八年

內 容 提 要

本书开始以原子結構說明核外圍組織的能力层，并着重地介紹了放射能量的光子性以及 X 綫能量的發生、消耗和吸收等物理概念。在此基础上，进而叙述放射能的質与量的測量，如空气量、皮肤量、百分深度量、半价层等。同时結合临床，說明照射量和照射野的分布情况。

此外，在自然放射中，叙述了鐳的放射性，鐳的剂量，鐳針的各种植入法及其临床应用。在人工放射性方面，也在基本理論上作了簡明的闡述，如原子核反应堆和核子的穩定性等。

在高能量發生裝置一章中，更講到回旋加速器、电子加速器、同步加速器、靜电加速器以及鈾治疗机等。最后的附录切合实际应用。本书可供放射科医师参考。

THE PHYSICS OF RADIATION THERAPY

Harold Elford Johns

Charles C. Thomas • Publisher

Springfield, Illinois, U. S. A.

1953

放射綫治疗物理学

陈 玉 人 譯

*

上海衛生出版社出版

(上海南京西路 2004 号)

上海市书刊出版业营业許可証出 080 号

上海土山灣印刷厂印刷，新華書店上海發行所总經售

*

开本 787 × 1092 卷 1/27 印張 7 19/27 插頁 9 字数 192,000

1958 年 8 月第 1 版 1958 年 8 月第 1 次印刷

印数 1—3,200

統一书号 14120 · 465

定价 (9) 1.10 元

前 言

本书是由一份放射治疗物理基础讲义扩充而写成的，其目的是使学生和医生对放射治疗打下一个理论基础。

本书内容不包括基本电学与力学（因为这些在许多物理教科书中都可以找到）。书中详细地叙述了放射光子的能量，以及X射线能量的消耗和吸收等基本概念，作者认为这是最根本的问题。有关放射能在空间的分布情形，附有实际治疗例子。同时也说明深度量表与等量分布在临床工作中的应用。此外，还探讨了骨、脂肪、肌肉对能量的吸收，镭剂量的测定，高能量粒子的发生装置（特别是电子加速器），以及一些放射性同位素的应用。

为了充实本书在实用上的内容起见，作者又增添了一个附录，其中包括不同性质的放射能，深度量表，深度量与焦点皮肤距离和面积的关系，常用放射线的等量曲线，以及放射能的线谱分布。

Harold E. Johns

本书详细地讲述放射治疗的物理学基础，并结合临床举例加以说明，对初学者帮助很大。本书虽经多次校对，但错误与不妥之处在所难免，希读者提出宝贵意见和批评。

陈 玉 人

1958年3月

目 次

第一章 物質的組成和放射	1
原子 基本粒子 原子核 核的外圍組織 能力層 电磁放射 放射的量子性 电磁放射綫譜 能量的放射	
第二章 X 綫的發生及其性質	11
X 綫管 簡單自整流 X 綫綫路 陽極的結構 整流管整流 X 綫綫 路 整流管與 X 綫管的比較 全波整流 Villard 氏倍壓綫路 X 綫 的發生 特性放射 連續放射 X 綫的分布	
第三章 X 綫被物質的吸收	22
虛直綫吸收係數 X 綫的吸收 電子的與質量的吸收係數 光电 吸收 散射吸收 對子的產生 總虛吸收係數 總實際吸收係數 不同吸收方式的相對重要性 總結	
第四章 放射量的測量	40
量的測量方法 倫琴 標準電離室 使用標準電離室時的注意事 項 實際應用中的電離室 X 綫機的校正 其他型式的放射綫測 量方法	
第五章 X 綫的性質	52
半價層 半價層的測量 濾過板 波長當量與高電壓當量 散射 介質中射綫性質的改變	
第六章 X 綫與散射介質的相互作用	60
模型 表面反向散射 百分深度量 面積對百分深度量的影響 深度對百分深度量的影響 半價層對百分深度量的影響 焦點皮 膚距離對百分深度量的影響 等量曲綫和等量面 結論	
第七章 X 綫照射野的結合及其空間分布	79
同面野 喉癌 圓照射野主平面以外平面內量的分布 矩形野的 空間分布 食道癌 放射治療中量的記錄	
第八章 能量吸收	95
倫琴與能量吸收的關係 積分量 全身照射 能力綫 防護措施 生物物質中的能量吸收 骨與脂肪對深度量的影響 產生同樣 深度量的技術比較	
第九章 鐳及其放射性	110

自然放射性 α 粒子 β 粒子 γ 射綫 放射性的蛻变 鐳的放射系 放射性的平衡 鐳的 γ 綫譜及其放射性产物 放射源的强度 氣的衰变 氣的放射性产物的发生	
第十章 鐳的剂量	123
鐳的剂量 表面施用器 表面施用器的分布法則 間質平面植入法 双面植入法 容積植入法 直綫源 鐳种植中的摄影控制 例子 鐳的等量曲綫 子宮頸癌 β 綫施用器 总結	
第十一章 高能量发生装置	146
回旋加速器 电子加速器 同步加速器 裂变 原子核反应堆 靜电加速器 共振变压器 鈷 60 远距离治疗机 防护	
第十二章 人工放射性	161
原子核的反应 核子的稳定性 人工放射性中蛻变的种类 放射性物質的示踪研究 治疗用放射性元素 測量电离放射的单位 用放射性同位素治疗时所接受的数量 放射性物質的蛻变图譜 γ 射綫源的放射率	
附录 A 深度量表与等量分布	174
附录 B 綫譜分布	217

第一章 物質的組成和放射

原 子

所有的分子都是由原子組成的。計有 96 种已知原子。这些原子含有重的原子核，在它的外圍圍繞着有运动着的电子“云”。原子核非常小，其半徑的数量級是 10^{-12} 厘米。并且原子的质量几乎全部集中在核里。核外圍电子运行軌道的半徑約为 10^{-8} 厘米，因此原子所占的空間比核大。

基本 粒 子

原子核可以被高速度的粒子打碎，并且发现其中含有質子与中子。核反应中出現的其他粒子尚有正电子、介子及微中子。这些粒子的性質被列在表 I 中。这些粒子的质量是在假定氧原子质量为 16.00000 之下規定的。它們的带电量是以質子的带电量为 4.80×10^{-10} 靜电单位而作出的。

表 I 基本粒子的性質

粒 子	质 量	电 荷	性 質
質 子	1.00758	+1	氫原子的核就是質子。氫原子是以一个在核內的質子及一个外圍电子所組成。一个中性的氫原子质量是 $1.00758 + 0.00055 = 1.00813$ 质量单位。質子是所有原子核組成的基本粒子之一。
中 子	1.00894	0	中子是組成核的另一基本粒子。其质量与質子几乎相等，因它不带电所以不易被阻止和檢驗。
电 子	0.00055	-1	电子的质量与質子相比，則甚小。宇宙間电子数量很多。每一原子核的外圍都有电子圍繞着。电子很容易被檢驗。电子有时称为“負电子”。它的质量約为質子的 $1/1835$ (或 $1/1840$)。

粒 子	質 量	电 荷	性 質
正电子	0.00055	+1	正电子与电子的质量相同,但带有正电荷。正电子在自然中仅以运动状态存在着。运动慢的或静止的正电子很快的与电子結合而以能量的形式放射出来。
介 子	~0.10	±1	介子是质量改变的重电子,它可以带正电也可以带负电。这些粒子是伴随宇宙綫而来,在自然中存留时间很短。
微中子	質量很小	0	微中子是理論上引用來解釋β蛻变的。这一粒子在实验中从未檢驗出来。

原 子 核

原子核是由質子和中子所組成。在核內質子的数量等于核外圍电子的数量。这个数量称为原子序数(Z),其范围是从1—96。因为質子所帶的电量与电子相等而性質相反,所以整个原子是中性的。原子的化学性能是决定于原子最外圍电子的数量及分布的情形,外圍电子又决定于原子序数(Z)。此种情况将于下节作詳細討論。原子的質量基本上是决定于核內粒子的数量,因为外圍的电子質量很小,确定質量数(A)的是核內粒子的总数。質量数的范围从氫原子1到最重的原子239。因为質子与中子的質量几等于1.0,而且电子的質量又很小,原子量可以說是等于質量数(A),因此原子量在数值上几乎是整数。

${}_{12}\text{Mg}^{24}$ 表示鎂的一个原子,原子序数是12,其質量数是24,因此它在核內有12个質子与12个中子,核外圍有12个电子。它的原子量是23.9924,几乎等于質量数24。

时常发现某些原子在核外圍有相同的电子数,并且核內有相同的質子数,但核內的中子数不同,这些原子叫做同位素。举例如下:

氫的同位素

氫有三种已知的同位素,即 ${}_1\text{H}^1, {}_1\text{H}^2, {}_1\text{H}^3$ 。它們的原子序数都是1,因此每一核內都有一个質子,核外圍有一个电子。此种相同的核外圍組織,形成了彼此間相同的化学性質。在自然界中 ${}_1\text{H}^1$

与 ${}_1\text{H}^2$ 混合存在的比例为 99.98% 与 0.02%。 ${}_1\text{H}^2$ 称为重氢，它的核含有一个质子与一个中子，广泛的应用在核分裂试验中称为重氢核。这两个同位素的原子量各是 1.00813 与 2.01471，几等于质量数 1 与 2。 ${}_1\text{H}^3$ 是氢的不稳定的同位素很容易蜕变为氦的同位素。

氦的同位素(${}_2\text{He}^3$, ${}_2\text{He}^4$, ${}_2\text{He}^6$)

所有氦的同位素核内均有两个质子，外围有两个电子。 ${}_2\text{He}^4$ 的核内有两个质子和两个中子，是一个很稳定的组合叫做甲种粒子，在核子分裂试验中应用很广。 ${}_2\text{He}^6$ 是不稳定的，进行分裂后变为锂的同位素。 ${}_2\text{He}^3$ 是稳定的，但在自然界中存在甚少。

磷的同位素(${}_{15}\text{P}^{29}$, ${}_{15}\text{P}^{30}$, ${}_{15}\text{P}^{31}$, ${}_{15}\text{P}^{32}$, ${}_{15}\text{P}^{34}$)

${}_{15}\text{P}^{31}$ 是磷的唯一稳定的同位素，核内有 15 个质子与 16 个中子。其他同位素都是放射性的。 ${}_{15}\text{P}^{32}$ 曾用于治疗血液疾患。

钴的同位素(${}_{27}\text{Co}^{55}$, ${}_{27}\text{Co}^{56}$, ${}_{27}\text{Co}^{57}$, ${}_{27}\text{Co}^{58}$, ${}_{27}\text{Co}^{59}$, ${}_{27}\text{Co}^{60}$, ${}_{27}\text{Co}^{61}$)

${}_{27}\text{Co}^{59}$ 是钴的唯一稳定同位素，核内有 27 个质子与 32 个中子。其他则进行各式分裂后而成为铁和镍的同位素。 ${}_{27}\text{Co}^{60}$ 可以代替镭使用于丙种射线治疗工作。

总之，当原子序数增加时，已知同位素及稳定同位素的数目亦将增加。例如锡是由 10 个同位素混合组成。至少有 12 个锡的放射性同位素已被发现。

不稳定的同位素蜕变为新的同位素，此种变化一直继续到稳定的元素为止。经常发现两个元素有相同的原子质量数而原子序数不同，这样的一对原子叫做同量异位素。如 ${}_{26}\text{Fe}^{57}$, ${}_{27}\text{Co}^{57}$ 是原子质量数 57 的同量异位素。因为他们的核外围电子数不同，因此有不同的化学性质，可以用化学方法分开，有关核子的进一步探讨可见第十二章。

核的外围组织

在研究 X 射线及其作用于原子的效应时，应该进一步了解核外围轨道电子的情形，也就是核外围运动电子的布置情况。

氢是最简单的原子，核外围只有一个电子围绕它旋转(图 I

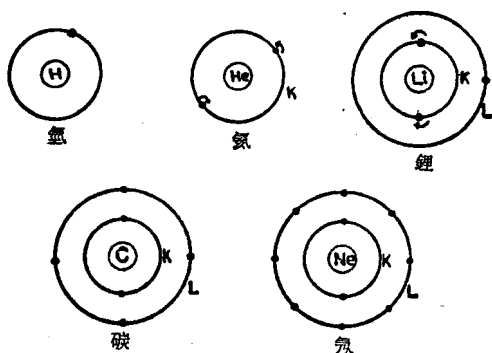


图 I—1 图解指出氢、氦、锂、碳、氖的电子组成

一1), 所有氢的同位素外圈电子都是这样简单。其次简单的原子是氦, 它有两个电子, 这两个电子运行在同一轨道上而自转的方向相反(图 I—1), 此种电子状态是特别稳定, 因此造成氦不容易与其他物质发生化学变化。氢因为只有一个电子所以很愿意再得到一个电子而成氦的稳定状态。锂有三个电子(图 I—1), 第三电子必需加在第一轨道外边的另一轨道上, 因前两电子已将第一层轨道填满, 这一层轨道叫做“K”, 第二层轨道叫做“L”, 锂在化学上是一活泼元素。

从周期表中向高原子序数进行时可以看见“L”轨道逐渐填满, 并形成 L 轨道有两个电子的铍($Z=4$), 其次是硼($Z=5$)有三个电子, 碳($Z=6$)有四个, 氮($Z=7$)有五个, 氧($Z=8$)有六个, 氟($Z=9$)有七个, 最后到氖($Z=10$)有八个电子才把第二层轨道填满(见图 I—1)。

氖的外圈轨道已填满, 因此成为惰性气体, 而不易发生化学变化。碳可以组成许多化合物, 因为它可以放弃四个电子或取得四个电子才可以达到稳定。氧原子要再有两个电子才可以填满第二层轨道, 它将取得两个电子而与碳结合成二氧化碳(CO_2), 在这种情况下碳给与每一个氧原子两个电子, 如图 I—2 可以看出碳原子和每个氧原子共享两个电子。氟缺少一个电子而成满层, 因此特别活泼。钠的原子序数是 11, “K”, “L”层均已填满, 然而其外“M”层仅有一个电子, 所以钠可以与任何缺少一个电子的元素化合, 钠

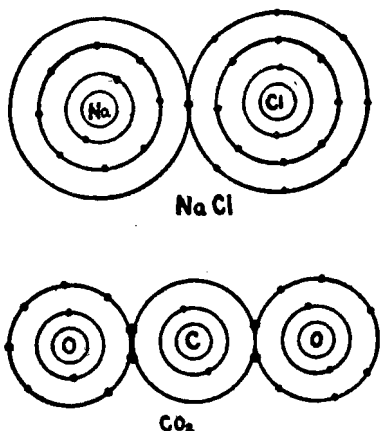


图 I—2 说明钠原子与氯原子结合成氯化钠,及两个原子氧与一个原子碳结合成二氧化碳。

与氟化合成稳定化合物。氯与氟的组织相似,在第三层有一空位。图 I—2 指出钠与氯分享钠的一个电子而形成 NaCl。

原子序数愈大则原子的外围组织愈复杂,“M”填满后将会有“N”,“O”等外层,依此类推。轨道填满后,化学性能即将再重复一遍。例如惰性气体氦、氖、氩、氪、氙,当轨道填满后,即将重复出现。同样硷性元素锂、钠、钾等,当外层电子是一个的时候将再出现。一般说元素的化学性能与原子价是决定于最外层未填满轨道上的电子数。

能 力 层

原子内的电子虽然有一定轨道,但这并没有什么实际物理意义。因为电子并不局限于这些轨道,它是有一定限度的各处活动的可能,但都在轨道的附近。由于原子内是没有阻力,因此电子在轨道上运行是没有能量消耗的。虽然这些轨道没有真实意义,但每一个都标志着一定的能量。

功或能的基本单位是尔格,另一个能的单位叫做电子伏特(ev.)。电子伏特是当一个电子通过1伏特电位差所释放出来的能量,而所作的功等于电荷与电位差的乘积,一个电子所带电荷

是 4.80×10^{-10} 靜电单位, 一个伏特是 $1/300$ 靜电电压单位, 因此

$$\begin{aligned} 1 \text{ 电子伏特(ev.)} &= \frac{1}{300} \times 4.80 \times 10^{-10} \text{ 尔格} \\ &= 1.60 \times 10^{-12} \text{ 尔格} \end{aligned} \quad (1-1)$$

更大的单位可以用千电子伏特(Kev.)或百万电子伏特(Mev.)

$$1 \text{ Mev.} = 1.60 \times 10^{-8} \text{ 尔格} \quad (1-2)$$

以鎢为例(如图 I—3), 在 K, L, M 层的电子能量各是 70,000 电子伏特, 11,000 电子伏特和 2,500 电子伏特。这就是說如果要击脫 K 电子必需供給鎢原子 70,000 电子伏特的能量, 或者用至少从 70,000 伏特电位差降下的一个电子去冲击它。要击脫 L 电子则需要 11,000 电子伏特的能量。

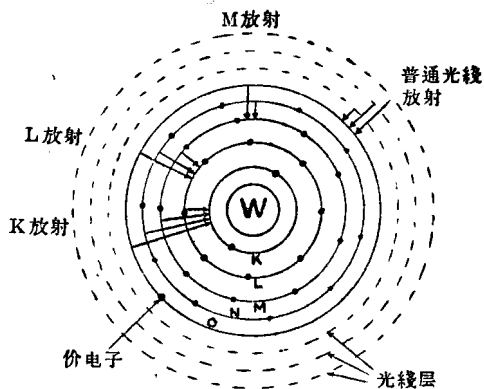


图 I—3 鎢原子示意图

通过电子向 K, L, M 层的位变而发生 X 放射。由于价电子从光綫层到 O 层的位变而发生普通光綫放射。

在正常情况下, 鎢最外层的价电子是在 O 层。但經吸收能量后则可移向 O 以外的軌道, 这些軌道之間只有几个电子伏特, 因此常称为光綫层。正常原子的电子永远占据着結合能最大的一层。在激动情况下, 一些較自由的电子可以暫时的填满光綫层, 当这电子仍回至正常軌道时即放射能量。我們知道当电子从外层軌道落向接近核的一层軌道时, 即有放射能自原子中放出。此种放射能的性質将于下节中討論。X 綫的放射是关系着 K, L, M 层

电子的移动,至于外圍电子的移动是决定物質的普通光譜。

电磁放射

无綫电波,热波,光波,紫外綫, X 綫, γ 綫都是电磁放射。它們的速度在真空中都是 3.0×10^{10} 厘米 / 秒或 186,000 英里/秒。这种速度常以 c 来表示。各种波都有一波长 λ 及頻率 n (如图 I—4)。因此

$$n\lambda = c = 3 \times 10^{10} \text{ 厘米/秒} \quad (1-3)$$

因此,如果知道頻率即可計算放射波的波长; 反过来說,如果知道波长亦可計算頻率。此式中頻率以每秒的振数表示, 而波长則以厘米計。我們所欲研究的电磁放射的波长是非常短, 为了方便常用埃 (A°) 单位 ($1\text{A}^\circ = 10^{-8}$ 厘米) 来表示波长。

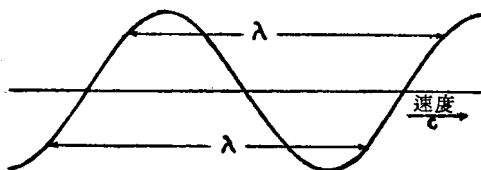


图 I—4 电磁波图解, 表示波长的意义。

一个波长 $5,000 \text{ A}^\circ$ 或 0.00005 厘米的頻率是 $n = c/\lambda = 3 \times 10^{10}/0.00005 = 6 \times 10^{14}$ 振数/秒。一个电磁波的波长决定着它的性质。上述波长 $5,000\text{A}^\circ$ 是可見的綠光。藍光的波长是 $4,000\text{A}^\circ$, 紅光波长是 $7,000\text{A}^\circ$ 。波长大于 $7,000\text{A}^\circ$ 即不可見, 称为紅外綫。如果波长小于 $4,000\text{A}^\circ$, 亦不可見, 称为紫外綫。波长 0.1A° 則归屬 X 綫。电磁放射的性质决定于放射的波长。当波长甚短而頻率极高时, 則必需考虑放射的“量子”性。

放射的量子性

在許多情况下可以考虑电磁放射是波动的, 但是它也有微粒的一面, 这种能量的微粒称为量子或光子。光子能量的多少决定于放射頻率。如果頻率加倍, 則光子的能量亦将加倍。假定 h 为卜郎克氏常数 (6.62×10^{-27} 尔格秒), 而 n 为頻率, 則光子的能量

E 可以下式計算：

$$E(\text{尔格}) = h(\text{尔格秒}) \times n(1/\text{秒}) \quad (1-4)$$

例如，一个放射光子波长是 1.0Å 或 10^{-8} 厘米，則频率为 $n = c/\lambda = 3 \times 10^{10}/10^{-8} = 3 \times 10^{18}$ 振数/秒；其光子能量是 $E = hn = 6.62 \times 10^{-27} \times 3 \times 10^{18} = 19.83 \times 10^{-9}$ 尔格。如以电子伏特計算（1电子伏特 = 1.60×10^{-12} 尔格），則 $E = 19.83 \times 10^{-9}/1.60 \times 10^{-12} = 12.4$ 千电子伏特。如果放射波长为 0.01Å ，频率将增加 100 倍，則电子能量将是 1,240,000 电子伏特或 1.24 百万电子伏特。放射波长与光子能量的关系可以下式求出：

$$E = hn = hc/\lambda$$

如果 E 以 ev 表示， λ 以 Å 表示，則可得以下关系式

$$E(\text{ev.}) = \frac{12,400}{\lambda(\text{Å}^\circ)} \quad (1-5)$$

由以上关系可以看出波长 1.0Å 的放射能是 12,400 电子伏特；换言之，如产生波长 1.0Å 的放射至少需要供給 12,400 电子伏特的能量。这一公式在下章 X 綫发生中更有重大意义。

很显然看出，当波长减短时，則放射的每一光子能量增大。实际上波长 1.0Å (12,400ev.) 的光子是可以使盖革計数器发生作用并记录之。如果把計数器放在 X 綫机的隔壁，可以观察到 X 綫所放射的光子是不連續的，因此可以确定放射能的量子形式。关于长波放射(低频率)如无綫电波因为每个量子能量很小，所以其量子性能是不重要的。例如一个 300,000 周波/秒的无綫电发射器 ($\lambda = 3 \times 10^{10}/300,000 = 10^5$ 厘米 = 10^{13}Å°)，其光子能只有 1.24×10^{-9} ev.。如其功率为 10,000 瓦特，則将放出 5×10^{31} 光子每秒，数十里以外的收音机每秒要接收許多光子，将观察不出量子性能。量子的概念在高能量 X 綫与 γ 綫是比較重要的。

电磁放射綫譜

电磁放射綫譜包括所有的电磁放射，从最长的无綫电波一直

到最短的 γ 射綫。表 II 中所列系各种放射綫波的頻率, 波长, 光子能量以及其性能。必須說明綫譜之間是彼此重迭的, 如从无綫电波到紅外綫, 或从紫外綫到 X 綫, 均无明显界限。同时可以看出高頻率(短波)的量子能很大。

表 II

頻率(周波/秒)	波 長	光 子 能	性 能
1.0×10^8	3×10^8 厘米	4.13×10^{-1} ev.	无綫电波从长波到短波直至超短波均发生于电振荡, 可以用电子仪器檢收。它可以穿过非导体层, 但被电导体所反射。
3.0×10^{10}	1.0 厘米	1.24×10^{-4} ev.	
3.0×10^{12}	0.01 厘米	0.0124 ev.	紅外綫放射发生于分子振荡及原子外围电子的激动。产生于火炉, 热放射器等可以用热仪器或胶片檢驗。大多数的固体物质对紅外綫都是不透明的。
3.0×10^{14}	0.0001 厘米($10,000\text{A}^\circ$)	1.24 ev.	
4.3×10^{14}	$7,000\text{A}^\circ$ (0.00007 厘米)	1.77 ev.	可見光綫从紅、黃、綠、藍直到紫发生于原子外围电子的激动。产生于灯及含气放电管, 可以直接用眼睛察看, 或用胶片、光电管等檢驗。这些光綫可以通过玻璃。
7.5×10^{14}	$4,000\text{A}^\circ$	3.1 ev.	
7.5×10^{14}	$4,000\text{A}^\circ$	3.1 ev.	紫外綫发生于原子外围电子的激动。可以用胶片, 盖革計数器及电离室檢查出来。可使皮肤上产生紅斑, 有杀菌力, 并为产生維他命 D 的泉源。
3.0×10^{16}	100A°	124 ev.	

頻率(周波/秒)	波長	光子能	性 能
3.0×10^{16}	100Å°	124 ev.	軟X綫发生于原子內层軌道电子的激动。可以用胶片,盖革計数器,电离室等檢查。可以透过薄的物質,但在放射学中因限于穿透能力而用
3.0×10^{18}	1Å°	12,400 ev.	处不大。
3.0×10^{18}	1Å°	12,400 ev.	用于診斷与表层治疗的
3.0×10^{19}	0.1Å°	124,000 ev.	X綫。
3.0×10^{19}	0.1Å°	124 Kev.	深部治疗X綫与鐳的 γ
3.0×10^{20}	0.01Å°	1.24 Mev.	射綫。
3.0×10^{21}	0.001Å°	12.4 Mev.	小型电子加速器的放射。
3.0×10^{22}	0.0001Å°	124 Mev.	大型电子加速器的放射。
3.0×10^{23}	0.00001Å°	1,240 Mev.	尙未能产生出来。

上表中光子的能量也就是产生这些光子所需要的能量。如一个X綫管要产生 0.01Å° 的波长X綫,就需要1.24百万电子伏特;换言之,1.24 Mev.,可以产生較长于 0.01Å° 的波,但却无法产生短于 0.01Å° 的波了。一般在高压下所产生的最短波长可以下式求出:

$$\lambda_{\text{最短}}(\text{Å}^\circ) = \frac{12.4}{V(\text{Kev.})} \quad (1-6)$$

此公式是直接由公式(1-5)得来。

能量的放射

欲了解原子中能量放射的机轉,可再观察图 I—3 鐳的能力层。設想一个高速度的电子冲击到一个鐳原子上,并将其 K 电子击脱,这样将至少需要 70,000 电子伏特的能量。短時間內 L 层的电子可以降下来以补充 K 电子的空位,如此即将有 $70,000 - 11,000 = 59,000$ 电子伏特的能量作为 X 綫的量子放射出来。这

一放射的波长将是 $12.4/59 = 0.211\text{A}^\circ$ 。

同时此种高速电子亦可击脱 L、M 或 N 层的电子。如果 L 电子被击脱而 M 电子来补充时，则放出的能量是 $11,000 - 2,500 = 8,500 \text{ ev.}$ ，波长为 $12.4/8.5 = 0.685\text{A}^\circ$ 。在所有情况下，放出能量恰等于不同轨道结合能量的差。在冲击过程中，原子中的任何电子均有被高速电子击脱的可能，但有些电子被冲击的机会较多。

鎢所产生可见光线必需将鎢的价电子激发到一个外圍的光线轨道(图 I—3)。当其回落至原轨道时，将有少许电子伏特的能量放出，而相当于可见光线内的波长。

轨道中的空位发生后，可以有很多方法来补充。如果 K 电子被击脱后可以由 L 层、M 层或其他层的电子来补充。假如 L 电子补充了 K 空位，则 L 的空位可由其他电子来补充而发生 L 放射。实际的能力层甚为复杂，如 L 层可以分为三层，M 层又可分为五层，N 层可分为七层。

低原子序数的元素，其 K 层的结合能也小。如碳为 285 ev. ，氧为 528 ev. ，有机组织的平均数值为 500 ev. 。组织的 K 特性放射波长是 $12.4/0.500 = 24.8\text{A}^\circ$ 的软线，在组织内很短的距离即可被吸收。

第二章 X 线的发生及其性质

X 线管

当物质被高速电子冲击时即发生 X 线。普通的 X 线管是在真空的玻璃管内装置着两极，一个是阳极，一个是阴极。阳极是一个粗大的铜棒，其末端镶着一小块鎢叫做阳极面。阴极是一个鎢丝，固定在集射罩内，给以足够电时鎢丝发生白热而放散电子。因为鎢的熔点较高 ($3,370^\circ\text{C}$)，故在 X 线管中都采用鎢作灯丝(即阴极)。如果在阴阳两极间加以高电压并使阳极为正，则电子在真空