

第八章 复习要点

一、X射线的产生与测量

1895年伦琴发现了X射线，并于1901年获得首届诺贝尔奖。X射线在材料检测、医学检测等领域有着重要广泛的应用。X射线的主动产生一般是利用X光机，用数万伏特的高压加速电子去撞击靶材料，从而从中激发出X射线。X射线的测量一般是利用X射线谱仪、气体电离室、半导体探测器等。其中第一类仪器基于布拉格公式、测量X射线在晶体中发生衍射后的在特定角度的干涉加强；第二类、第三类仪器则是利用X射线在探测介质中产生电离电流，并将X射线的能量和强度分别与电流脉冲的幅度和脉冲的数目关联起来。常见X射线的能量一般在几十keV，波长在0.01~100Å水平。

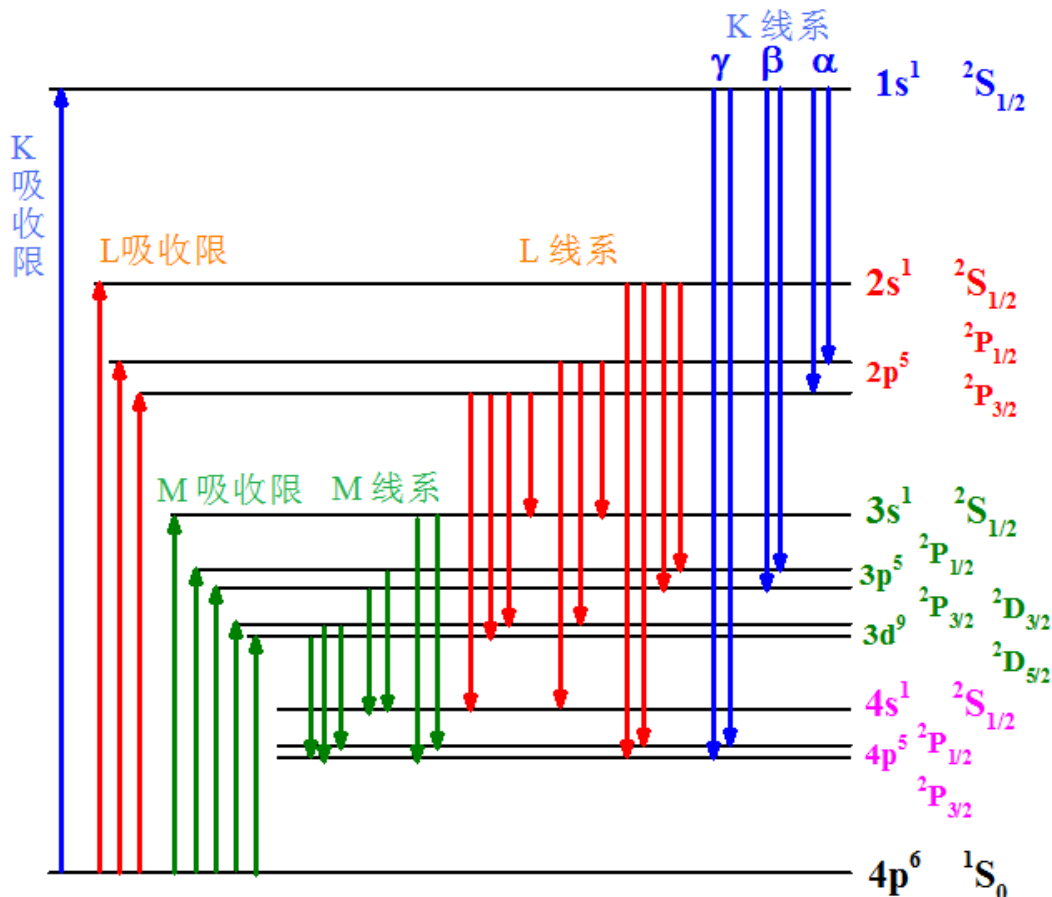
二、X射线发射谱

常见的X射线谱一般由连续本底谱以及屹立在本底谱上的分立峰构成，其中前者来自于带电粒子的韧致辐射，而后者来自于原子内层出现空穴后更外层电子填补空穴时所放出的能量。在后者中，每个分立峰的能量（或波长）均与元素种类息息相关一一对应，对元素的物理状态（例如形态温度压强）和化学状态（例如单质或不同种类化合物）的依赖十分微弱，故此也称为元素的特征X射线。K层电子出现空穴所引起的X射线谱系称为K线系，以此类推，又有L、M、N线系等。在K线系中，由n=2、3、4主壳层的电子去填补n=1层空穴所形成的射线分别称为α、β、γ。各元素的各特征X射线的数据有表可查，其中KαX射线可用Moseley公式给出满意精度的预测性计算，如下

$$E_{K\alpha} = hc\tilde{\nu} = Rhc \times (Z - 1)^2 \times \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2}\right) \quad (1)$$

三、与X射线有关的内层能级

这里以36号元素(1s² 2s² 2p⁶ 3s² 3p⁶ 3d¹⁰ 4s² 4p⁶)为例，作以展示，如下图。



跃迁定则:

$$\Delta L = \pm 1$$

$$\Delta J = 0, \pm 1$$

四 Compton 效应

康普顿效应是继光电效应之后光的粒子性的另一大实验证据。在光电效应中，入射光子将自身能量的全部转移至靶中粒子，光子自身消失。而在康普顿效应中，入射光子将自身能量的一部分传给靶中粒子，光子保留了一部分能量，同时方向发生偏转而成为散射光子，靶中粒子获得能量后受到反冲。散射光子方向与入射光子方向的夹角 φ 称为散射角。按照能量守恒、动量守恒可以列出两个方程，其中包含着散射光子波长 λ' 、散射角 φ 、反冲粒子能量三个未知数。将散射角 φ 作为参数，则可以得到散射光子的如下结果：

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\varphi) \quad (2)$$

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{mc^2}(1 - \cos\varphi)}$$

式中 λ' 和 λ 分别代表散射光子和入射光子的波长， m 代表靶粒子的静止质量， $h\nu'$ 代表散射光子能量。从康普顿效应的原理可以看出，A 光子可以与靶中自由电子以及束缚电子发生康普顿效应；B（与自由电子发生康普顿效应时）给定散射角则散射光子能量唯一确定，类属于分立谱；C 对于全部散射角而言，散射光子谱为连续谱。

同样道理，对光电效应过程应用能量守恒和动量守恒，假设光子可以与自由电子发生光电效应，那么将可以有两个约束方程，而未知数只有电子的反冲速度这一个。方程组无解。因此光子与自由电子之间不会发生光电效应。为了保证光电效应的发生，必然有第三者即原子核的参与。因此光子与束缚电子之间可以发生光电效应。

五、X 射线的吸收

X 射线进入物质后，存在两大类可能性。第一，不发生任何事情，能量和方向都不发生改变而穿越物质；第二，发生了事情，能量和/或方向发生了改变。在第二大类情况下，则可以有二类过程。其一，X 射线展示其波动性的一面，在物质中发生折射、衍射、反射等；其二，X 射线展示其粒子性，与物质间发生光电效应或康普顿效应（高能 X 射线还可能发生电子对效应等）。由于上述各种可能过程的发生，在物质中 X 射线会因为被物质吸收而出现强度衰减。容易推出如下统计公式：

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3)$$

式中 I_0 为入射前 X 射线的强度， x 为吸收物质的厚度， I 为经吸收物质后沿原来入射方向上的 X 射线的强度， μ 称为衰减常数。

（附录： $I = I_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} \times (\rho x)}$ 为上式的变形，其中 μ/ρ 称为质量衰减常数， ρx 代表吸收物质面密度）

衰减常数 μ 主要依赖于以下三个方面。第一，靶物质的密度越大，则 μ 越大；第二，靶物质的原子序数越高，光电截面和康普顿截面都增大，则 μ 越大；第三，入射 X 射线能量越高，则 μ 越小，X 射线穿透力越强。

如前述，X 射线能量越高则 μ 越小，但是当 X 射线能量从小增大至靶物质中某层例如 K 层电子电离能时，K 层电子将从之前的不能与 X 光子发生光电效应而变化为可以发生这种效应，即 K 层电子将突然参与对 X 射线的吸收。这将导致 μ 在随 X 射线能量增加而减小的背景下出现突然的增加。当然随后恢复原来随 X 射线能量增加而减小的趋势。