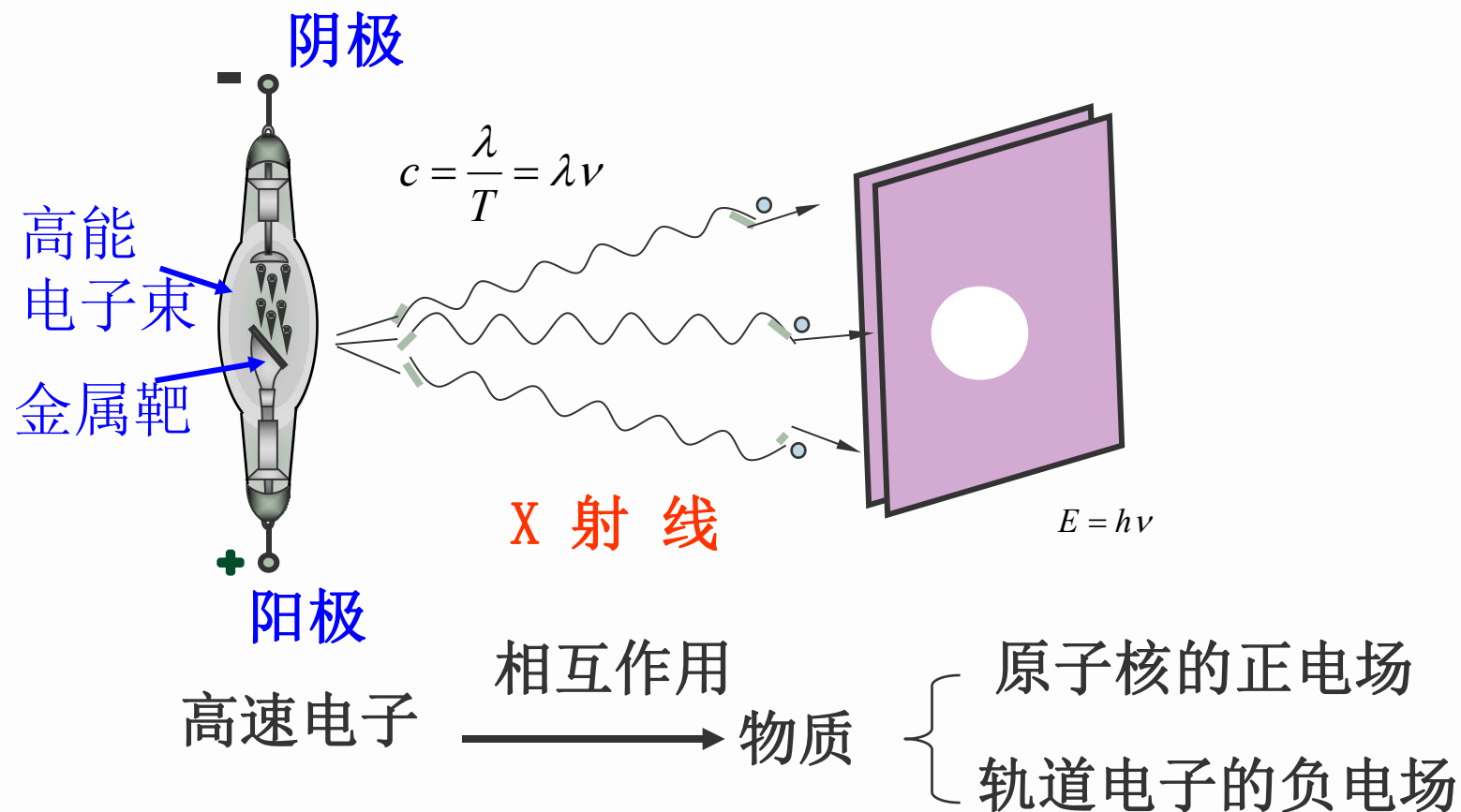


## 第四节. X射线的产生原理

### 一. 电子与物质的相互作用



带电粒子间静电库仑力的相互作用

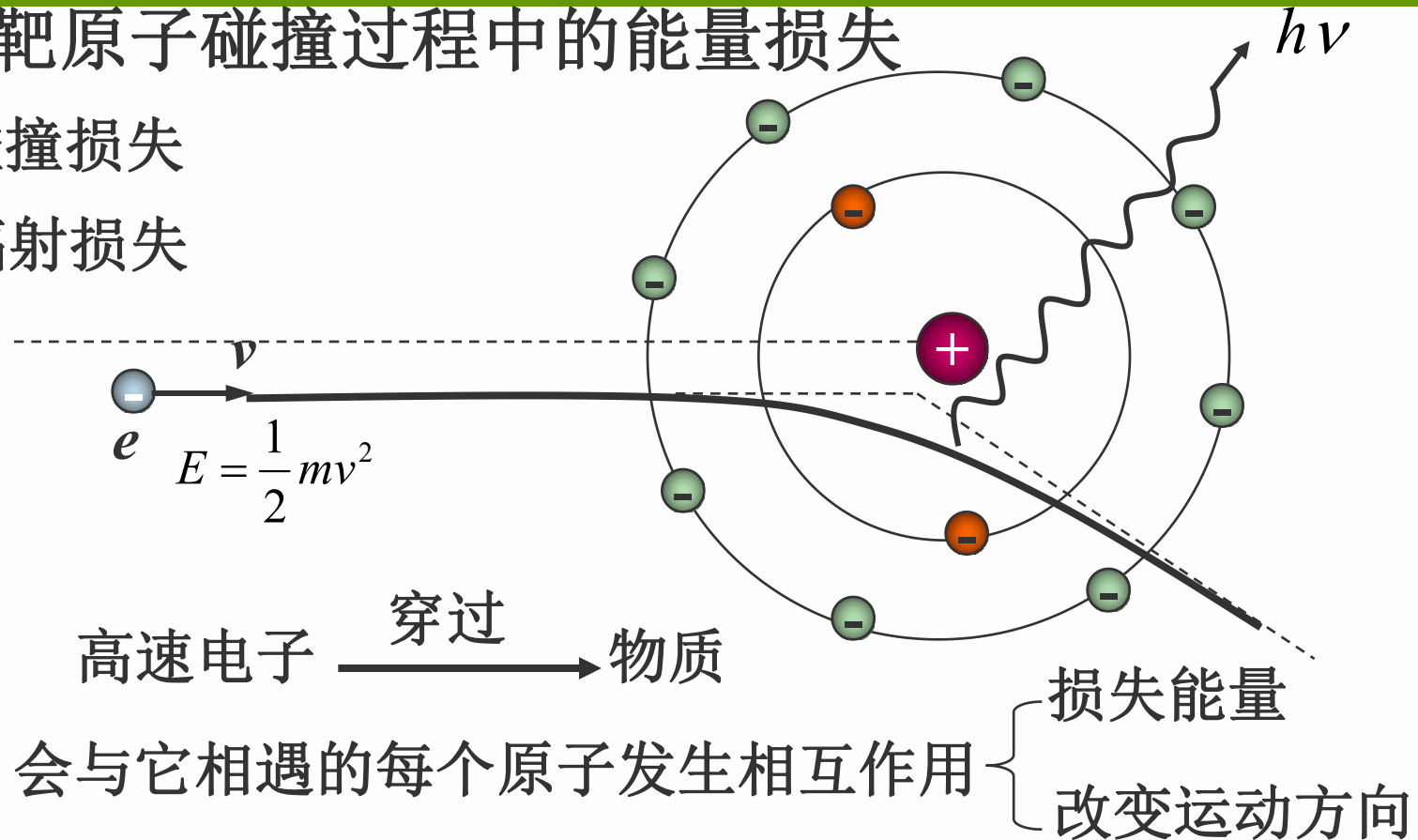


## 第四节. X射线的产生原理

### 电子与靶原子碰撞过程中的能量损失

(一)碰撞损失

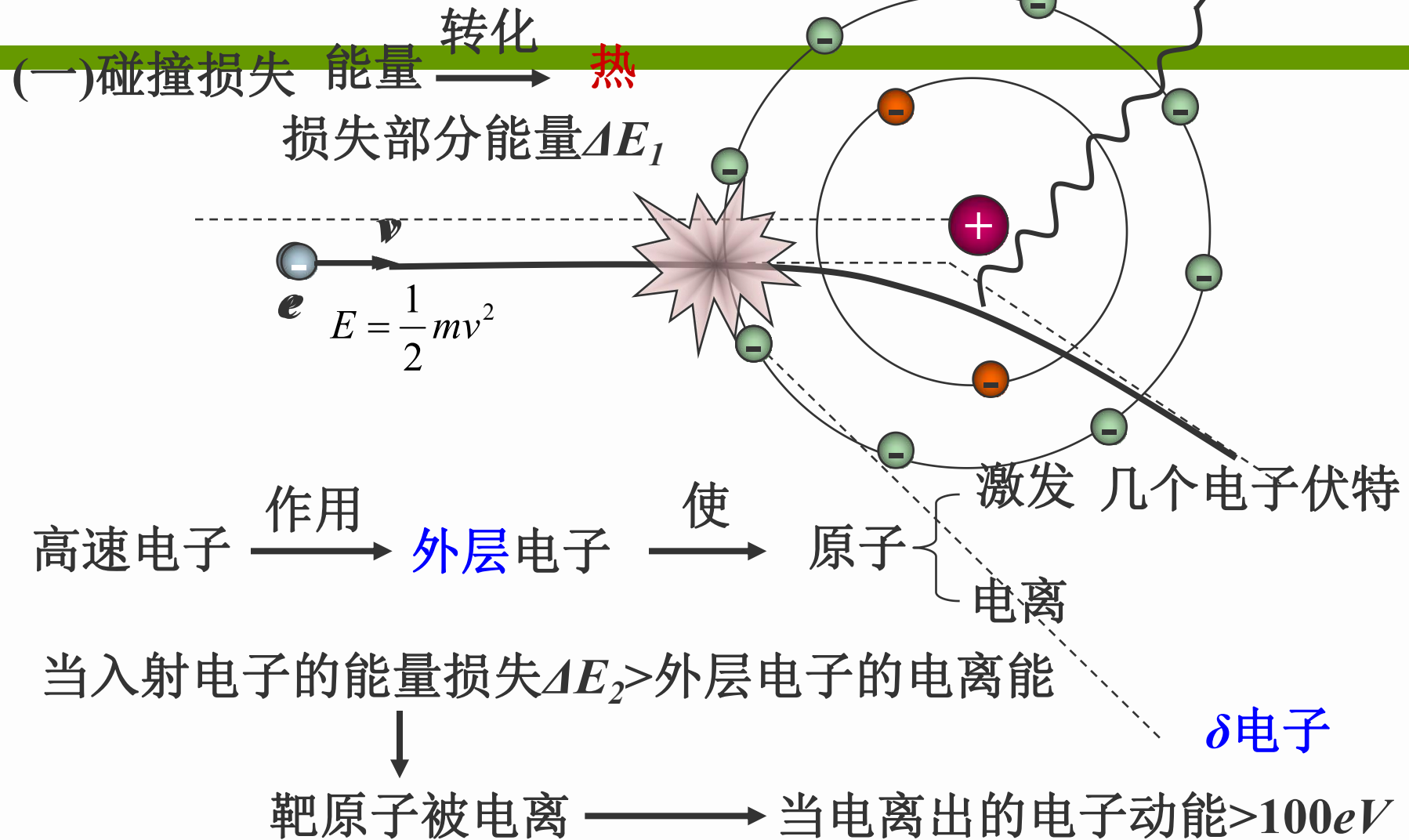
(二)辐射损失



作用次数频繁，但每次作用损失的能量不多

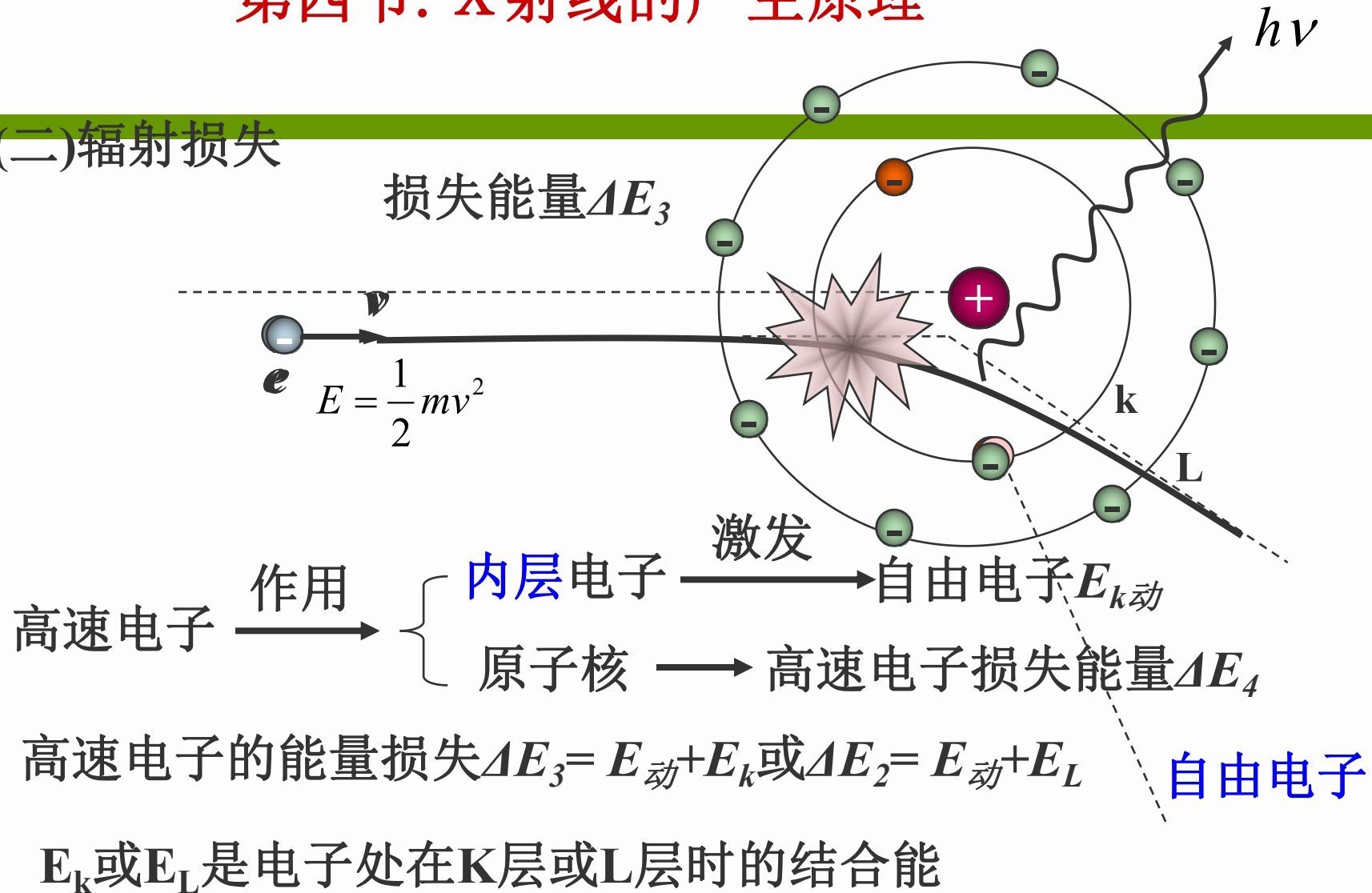
宏观看，高速电子在物质中似乎是连续地缺失能量

## 第四节. X射线的产生原理



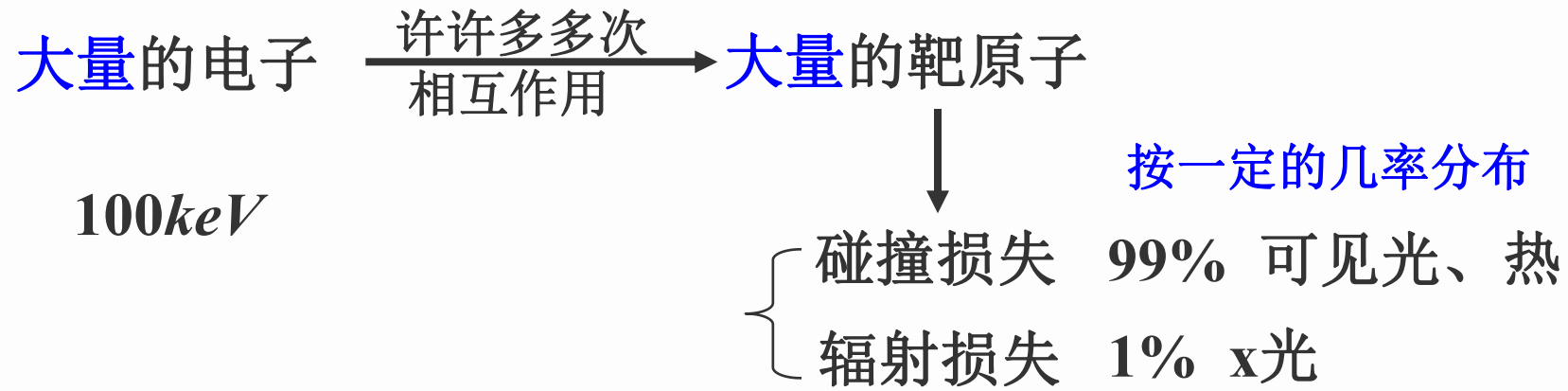
## 第四节. X射线的产生原理

### (二)辐射损失





## 第四节. X射线的产生原理



- (1)当电子处于低能量、靶原子的原子序数较低时  
主要是碰撞损失
- (2)当电子被加速到更高能量、与高原子序数的靶作用时  
碰撞损失的电子的能量比例减小，辐射损失的电子的能量比例增加

高速电子的动能  $E = E_{\text{辐射}} + E_{\text{电离}} + E_{\text{热}}$

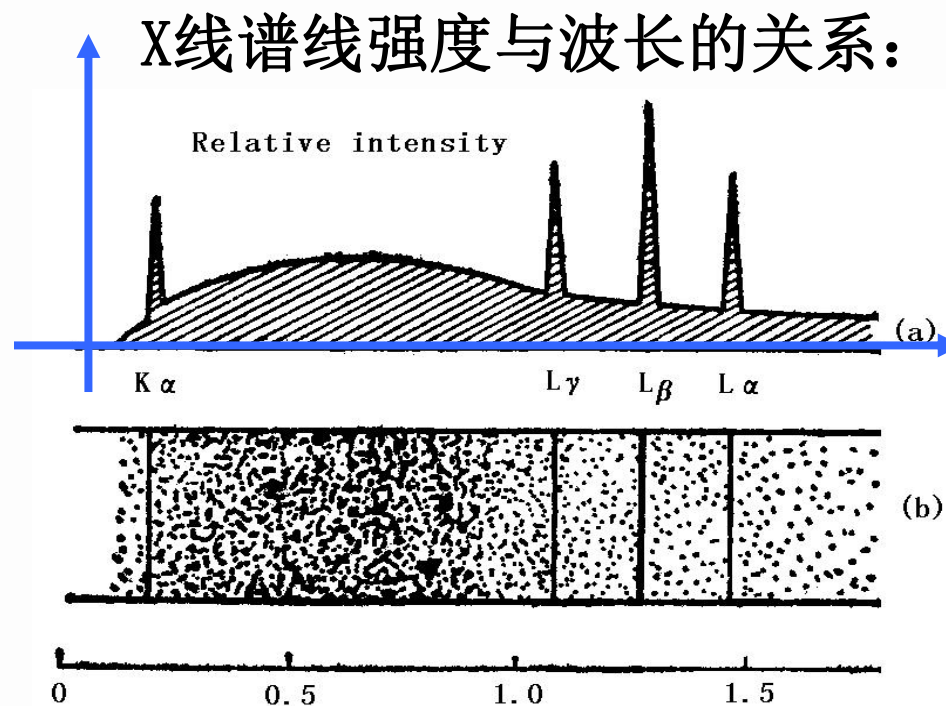
## 第四节. X射线的产生原理

### 二、两种x线的产生原理

X线谱的组成:

- 连续X线谱(背景)
- 特征X线谱(线状)

在医学应用中主要使用连续X线, 而在利用光谱研究物质结构中使用特征X线.



(X线谱示意图)

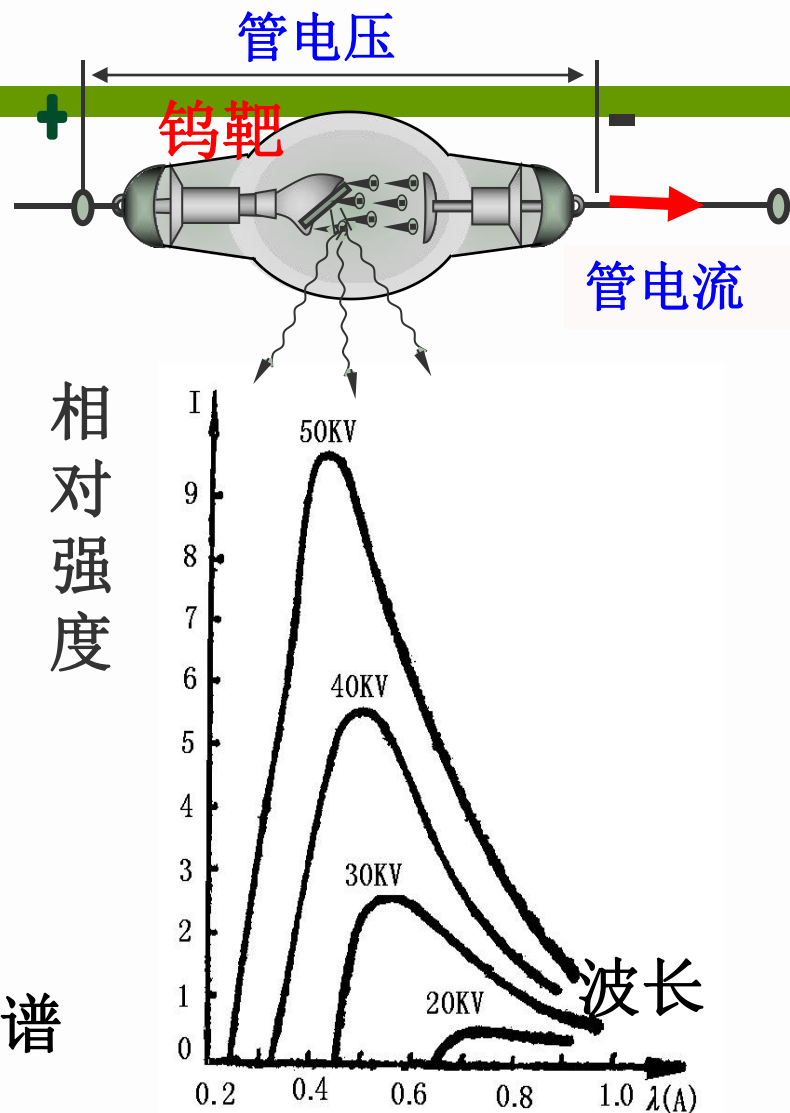
研究X线谱的目的: 了解X线产生的原理。

## (一) 连续X射线的产生原理 (continuous X-rays)

### 射线谱特性:

- (1) 每一种管电压下, 存在一个**短波极限**; 射线中含有大于短波极限的各个波长成分。
- (2) 随着管电压增大, **短波极限**和**强度最大的波长**朝**短波方向**移动。

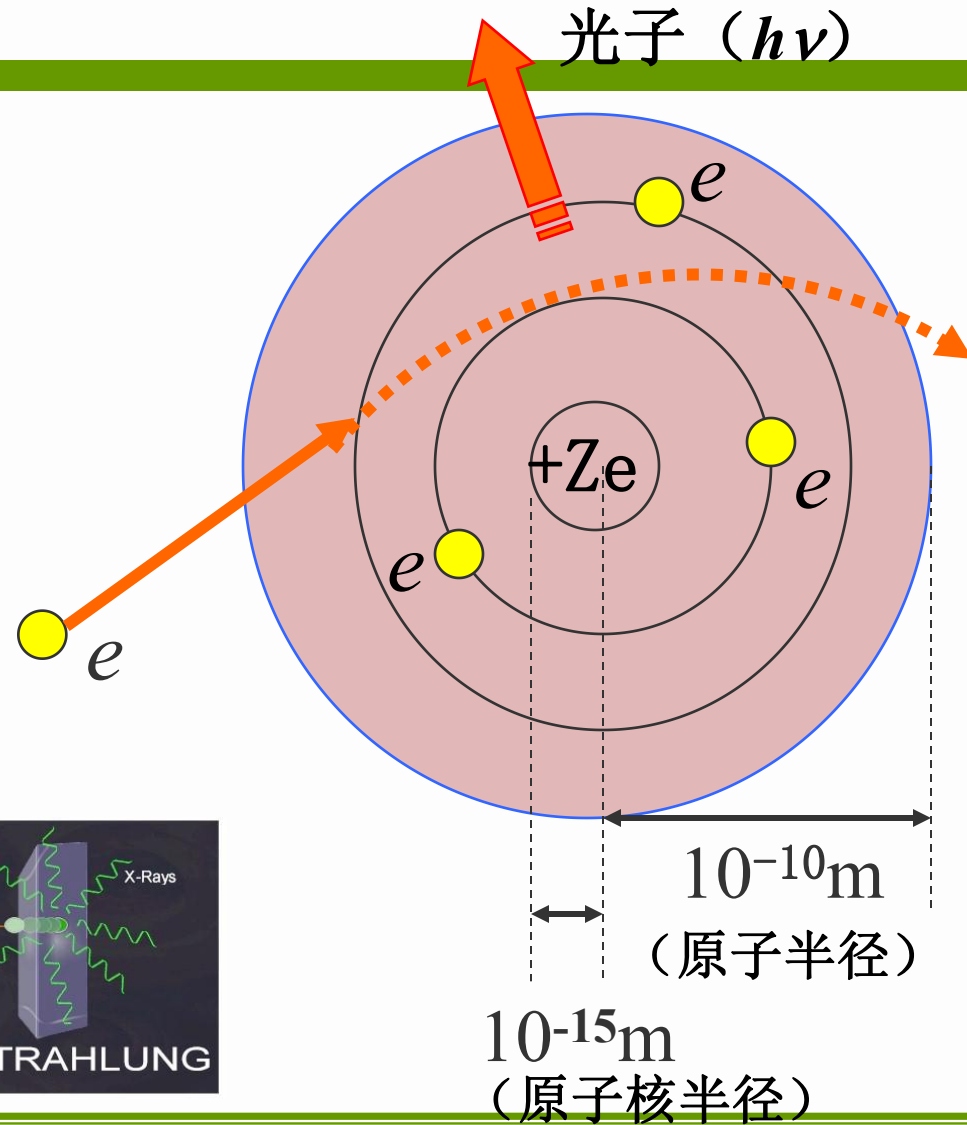
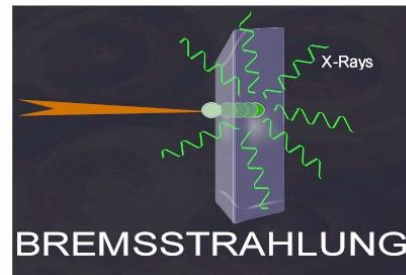
钨靶的连续X射线谱



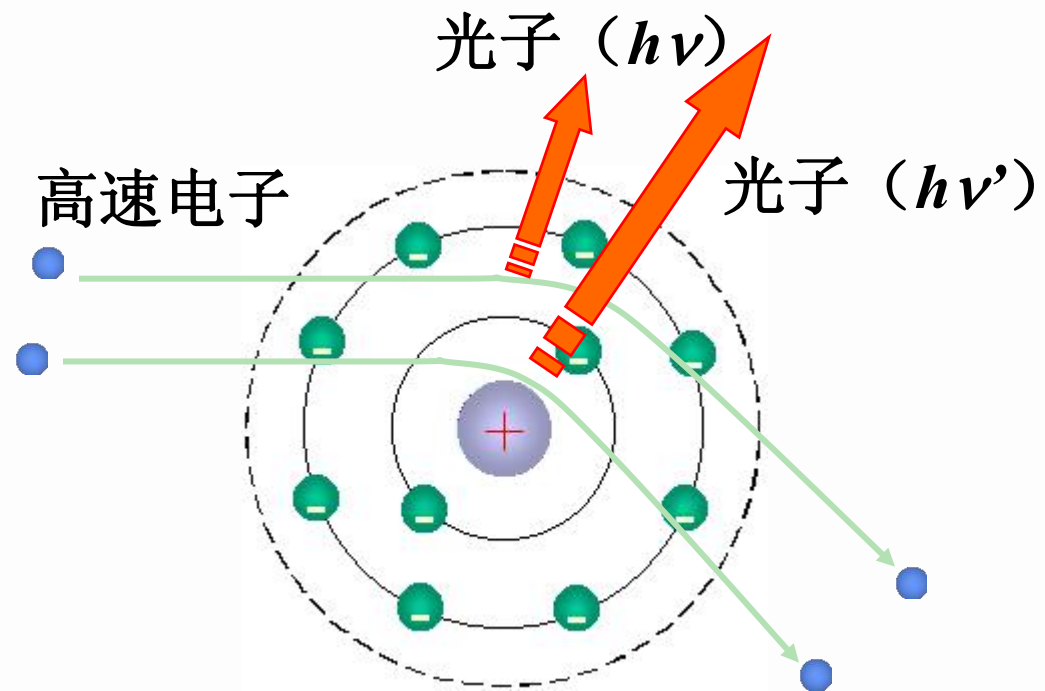
## 1. 连续X射线谱产生的机制

### 轫致辐射

高速电子撞击阳极靶时，受靶中原子核的库仑场作用而速度骤减，每个电子减少的动能转化为一个光子辐射出来，有X射线放出。



高速电子进入靶内不同深度，损失的动能有各种数值，使射线(光子)波长连续变化，形成连续谱。





## 2.连续x射线的最短波长

### 短波极限 ( $\lambda_{\min}$ ) 的计算

**短波极限的产生：**高速电子的动能全部转成辐射能。当电子的全部动能转化为一个光子辐射出来时，光子具有最大能量 ( $h\nu_{\max}$ )，相应的波长为最短 $\lambda_{\min}$ 。

$$\text{电子动能} = \frac{1}{2}mv^2 = eU = h\nu_{\max} = h\frac{c}{\lambda_{\min}}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{1.242}{U(kV)} nm$$

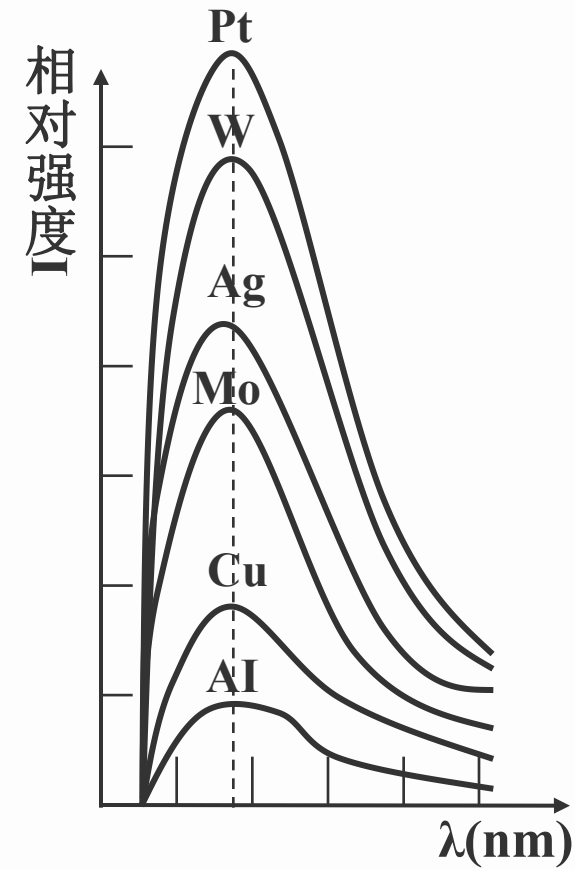
每个管电压，对应一个短波极限  
管电压增大，短波极限朝短波方向移动



### 3.影响连续x射线的因素

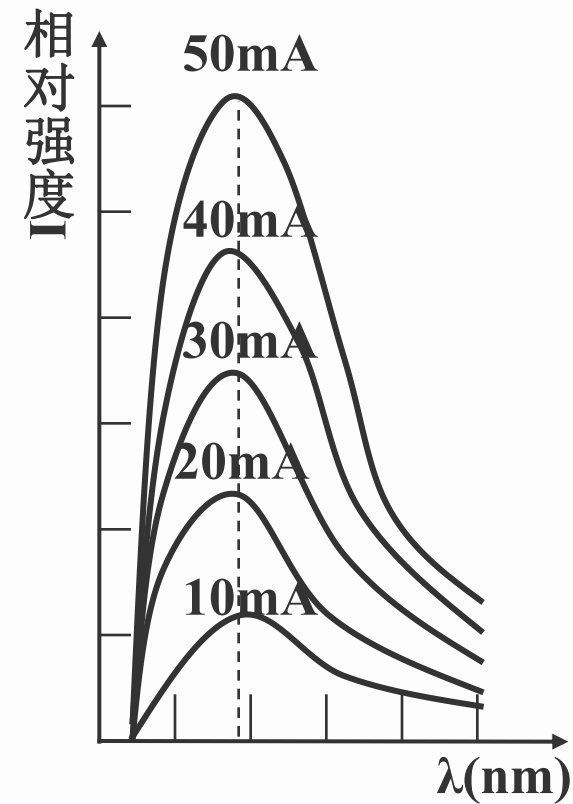
(1)当管电压 $U$ 、管电流 $i$ 固定时，连续x射线强度 $I$ 与阳靶的原子序数 $Z$ 成正比

$$I_{\text{连}} \propto Z$$



(2)当管电压 $U$ 、靶材料(原子序数 $Z$ )固定时, 连续x射线强度 $I$ 与管电流 $i$ 成正比

$$I_{\text{连}} \propto i$$





### (3)当管电流*i*、靶材料(原子序数*Z*)固定时

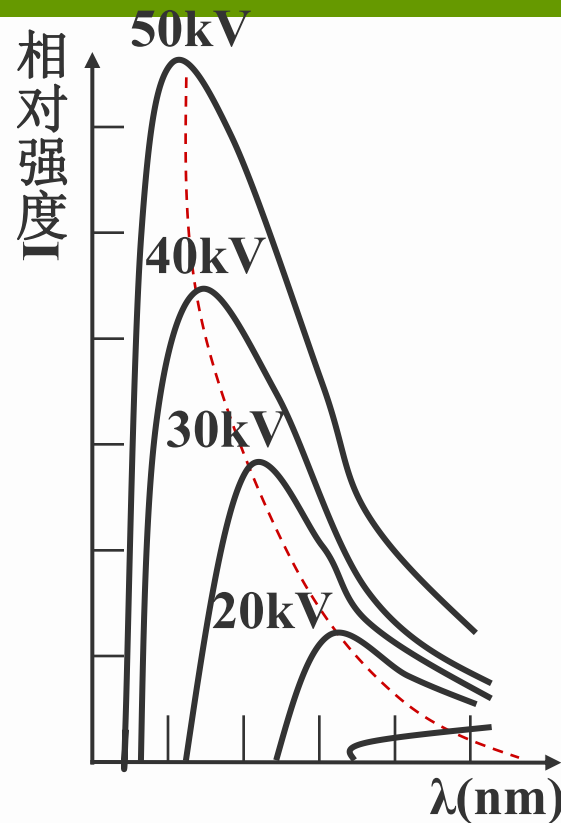
$$h\nu_{\max} = E_k \quad E_k = eU$$

随管电压*U*的升高，连续x射线谱的**最短波长**和**最大强度所对应的波长**均向短波方向移动，使x射线的高能成分所占比例增加，同时**x射线强度**提高

$$I_{\text{连}} \propto U^2 \quad \text{恒定电压}$$

实际 加在x线管上的是经交流电整流后的**脉动电压**

$$\lambda_{\min} = \frac{1.242}{U_p(kV)} nm$$



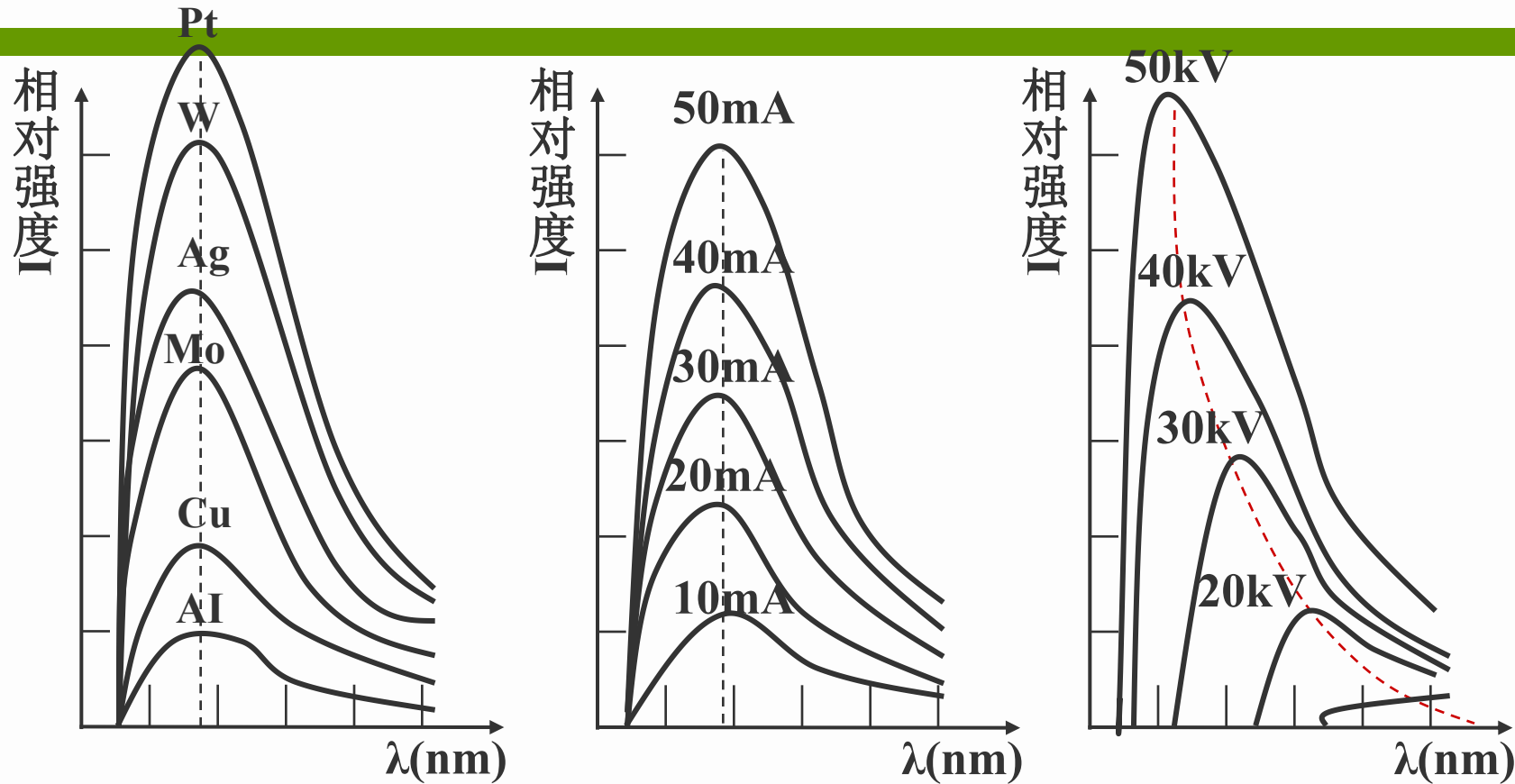


当 $U_p=U$ 时

脉动电压产生的  
x线平均能量

<

恒定电压产生的  
x线平均能量



$$I_{\text{连}} = K_1 i Z U^n \quad (3-7)$$

常数 $K_1=1.1 \times 10^{-9} \sim 1.4 \times 10^{-9}$ , 诊断用x线 $n=2$



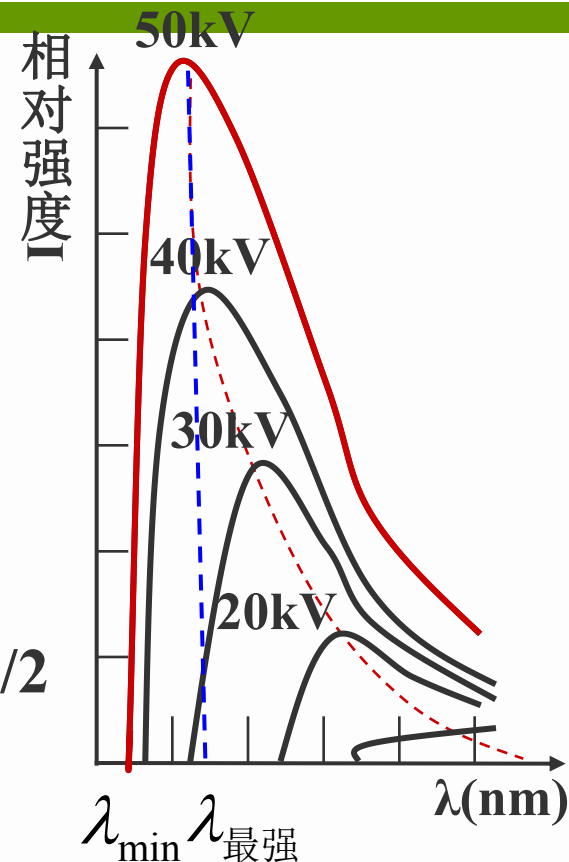
**最强波长：** 强度最大值所对应的波长值

$$\lambda_{\text{最强}} = 1.5\lambda_{\text{min}} \quad (3-8)$$

**平均波长：** 由于滤过不同

连续x线的平均能量=最大能量的1/3~1/2

$$\lambda_{\text{平均}} = 2.5\lambda_{\text{min}} \quad (3-9)$$





**例1：**求管电压为100kV时，产生连续x线的最短波长、最强波长、平均波长和最大光子能量

**解：**  $\lambda_{\min} = \frac{1.24}{U} = \frac{1.24}{100} = 0.0124nm$

$$\lambda_{\text{最强}} = 1.5\lambda_{\min} = 1.5 \times 0.0124 = 0.0186nm$$

$$\lambda_{\text{平均}} = 2.5\lambda_{\min} = 2.5 \times 0.0124 = 0.031nm$$

$$E = h\nu_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1.24 \times 10^{-2} \times 10^{-9}} = 1.6 \times 10^{-14} J$$



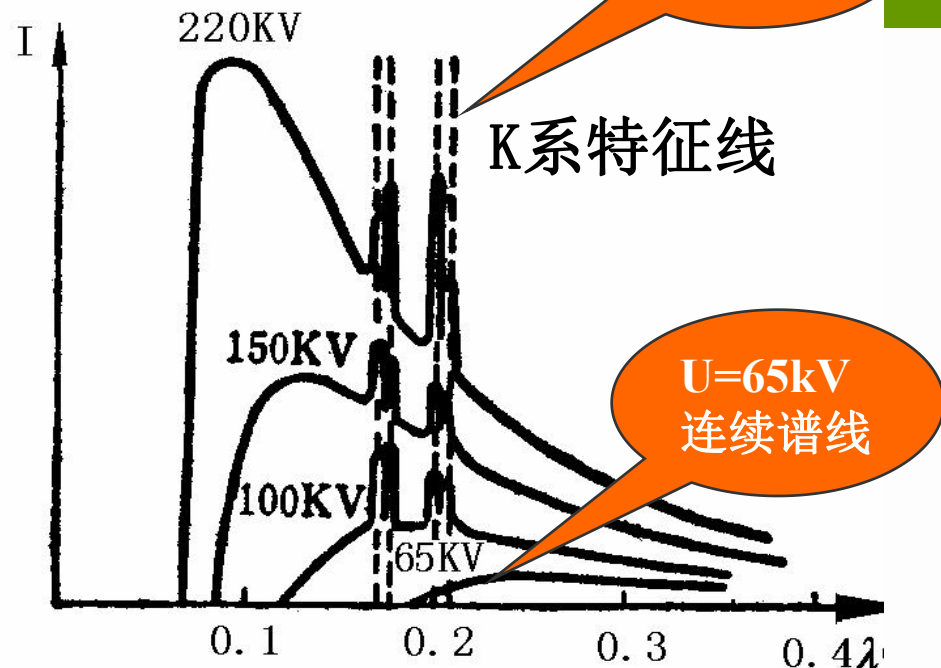
## (二) 特征X线的产生原理 (characteristic X-rays)

### 特点:

- \* 在较高管电压下在三条连续谱线上叠加了一组能量位置不变、强度很大的线状光谱
- \* 随着管电压继续增高, 连续X线谱明显变化, 而线状光谱线的位置不变 (即波长不变)

### 特征X线谱:

每一种元素 (靶) 有一套一定波长的**特征X线谱**, 成为其**标识**。比如: 指纹成为人的标识



钨在较高管电压下的X线谱



(高速电子)

(光子)

K系标识线

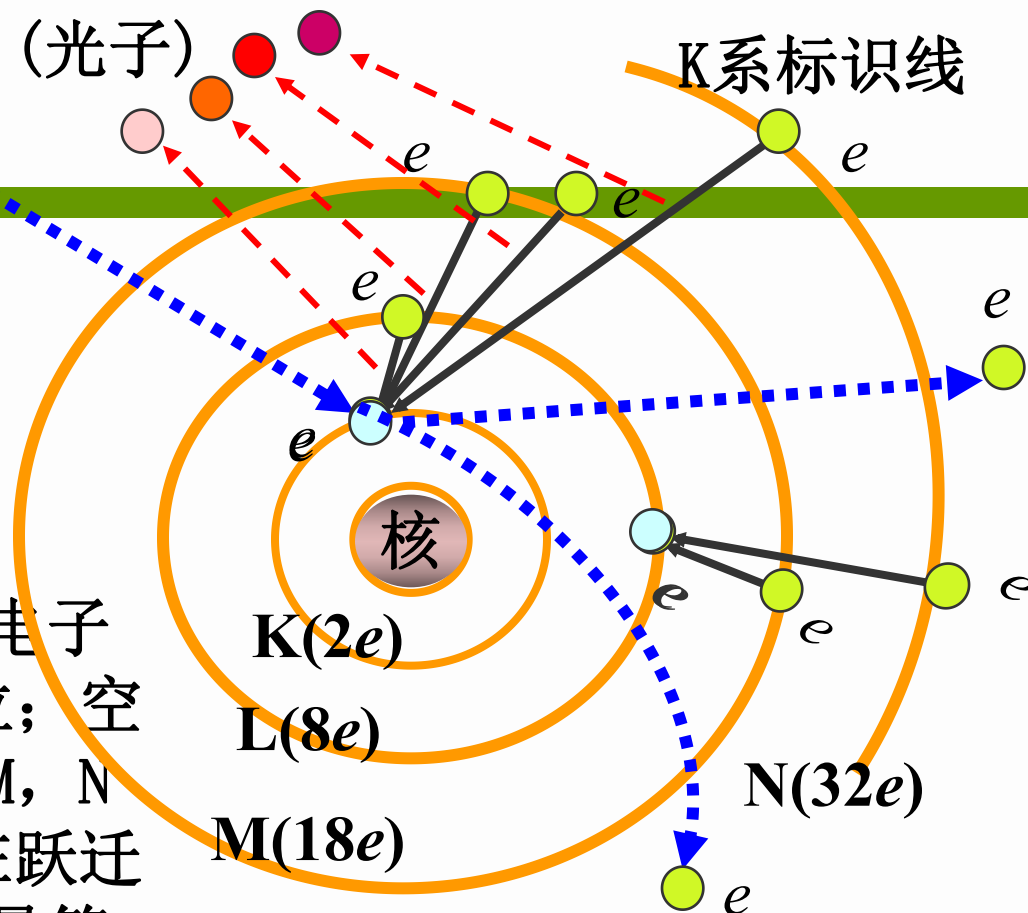
## 1.特征(标识)X射线产生机制

原子内部各壳层电子跃迁形成标识谱

高速电子击出某个内层电子(如: **K壳层**电子), 产生空位; 空位由其它壳层电子(如: L, M, N或更外层电子)填补, 电子在跃迁过程中发出一个光子, 其能量等于两能级能量之差。从而形成确定波长的线状X射线谱

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (3-10)$$

\* 标识X射线谱应用: 化学元素的分析



不同壳层电子填补某壳层同一空位时所辐射的标识谱组成一个线系

影像技术专业



(高速电子)

(光子)

K系标识线

## 2.特征X线的激发电压

入射高速电子的动能 $E_k=eU$

靶原子的轨道电子的结合能 $W$

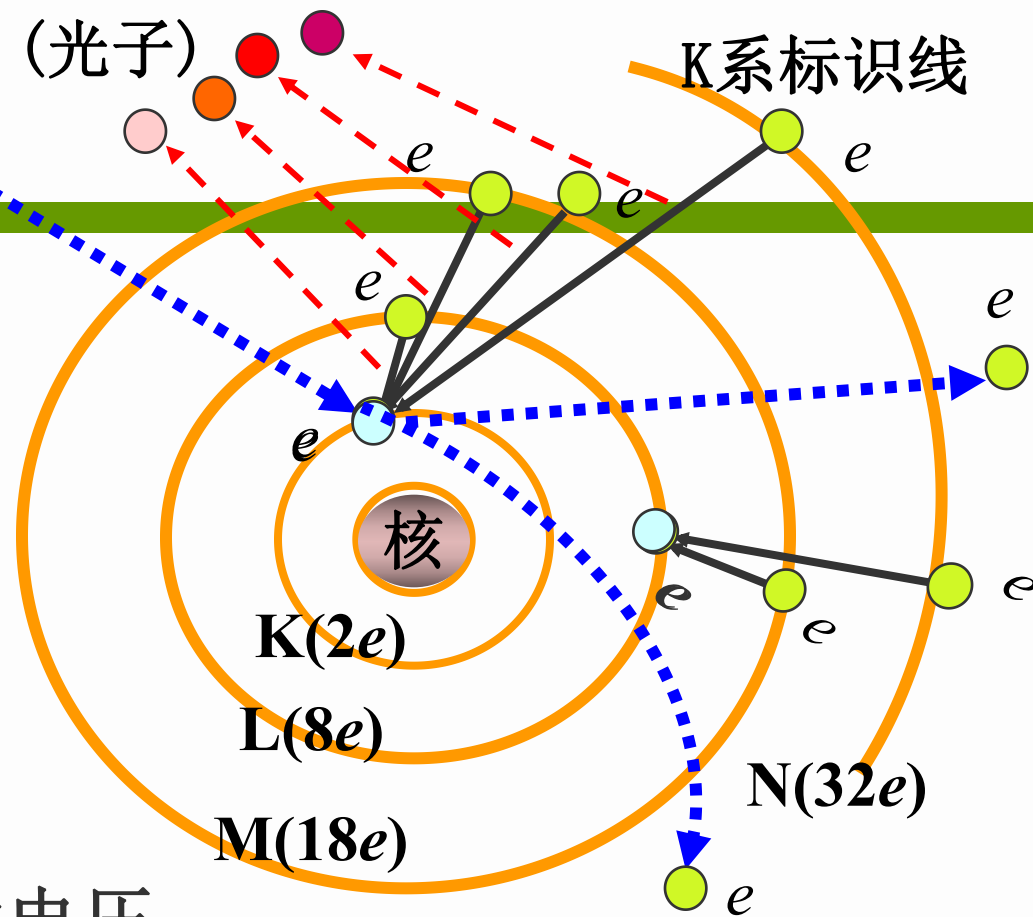
$$eU \geq W \quad (3-11)$$

当 $eU=W$ 时，为最低激发电压

对于给定的靶原子， $U_K > U_L > U_M > U_N$

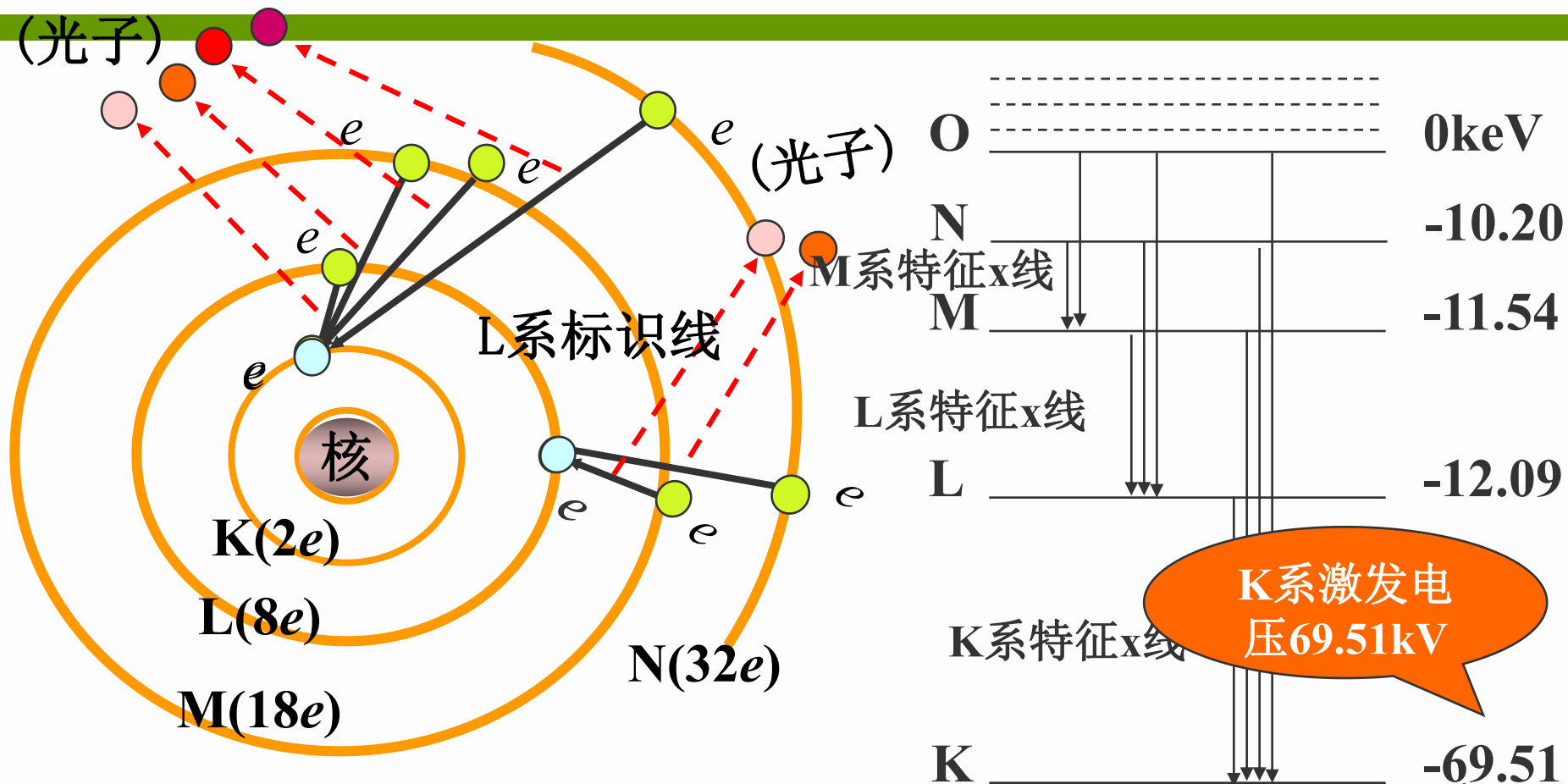
壳层越接近原子核，最低激发电压越大

若管电压低于某激发电压，则此系特征x线不会发生





## K系标识线



钨靶原子的特征放射示意图



### 3. 影响特征x线的因素

K系特征x线的强度( $I_k$ )

$$I_k = K_2 i (U - U_k)^n \quad (3-12)$$

式中：i为管电流；U为管电压；  
U<sub>k</sub>为K系激发电压；K<sub>2</sub>和n均为常数  
n≈1.5~1.7