

第十七章 X射线 (X-ray)

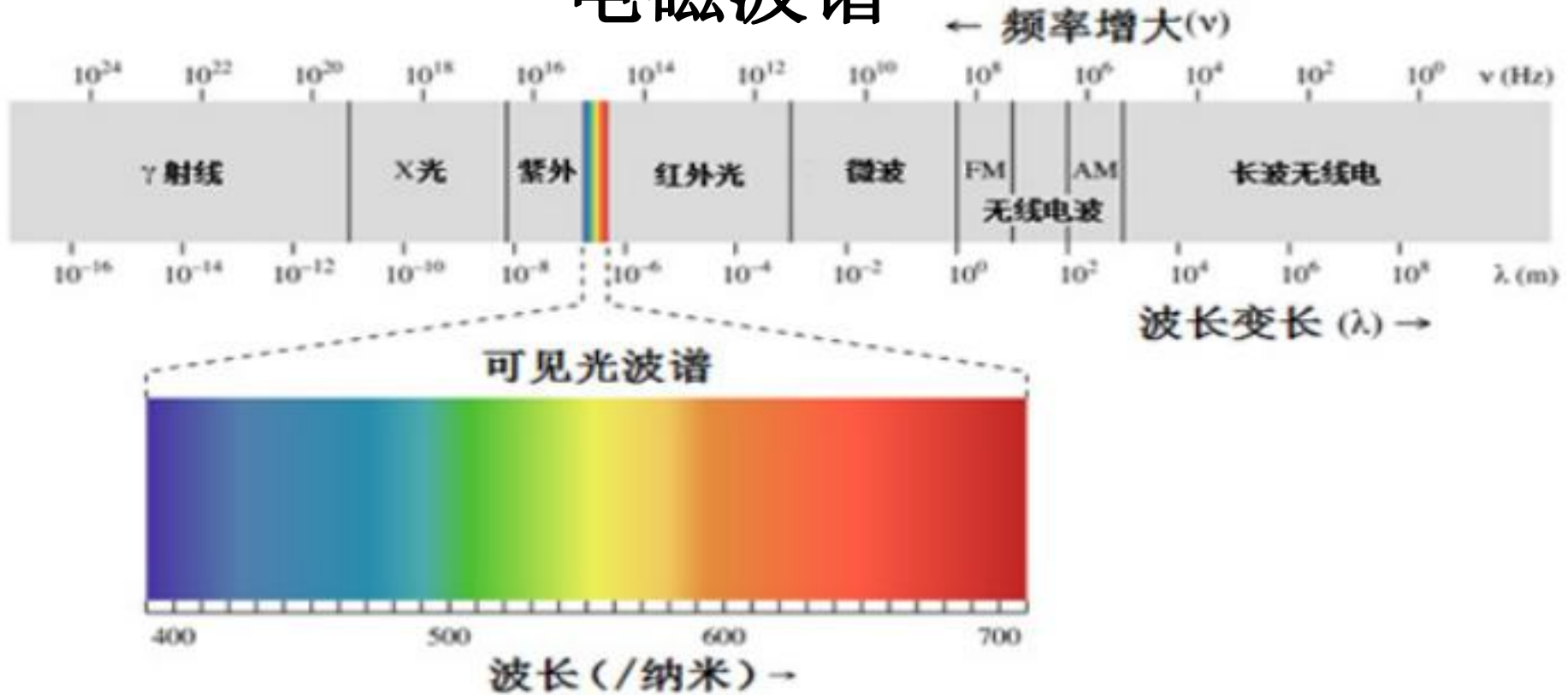
- 1895年：X射线发现
- 1901年：伦琴获首届诺贝尔物理奖
- 1979年：X-CT获诺贝尔生理学或医学奖
- 劳厄：电子衍射实验证实X-ray是较短波长的电磁波（1914年诺贝尔物理奖）



伦琴 (1845—1923)

- X射线的产生、X射线谱
- X射线的性质
- X射线的吸收和衰减规律

电磁波谱

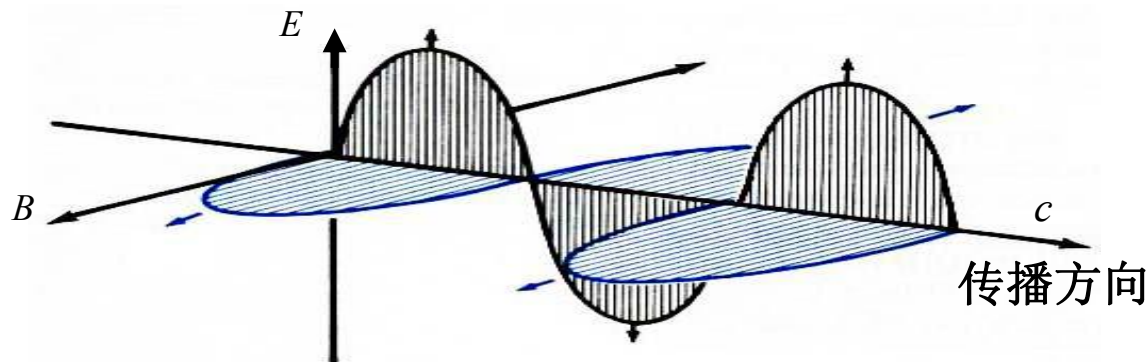


- 可见光的波长范围：400nm~760nm
- X-ray的波长范围：10nm ~0.001 nm
- 医用X-ray的波长范围：0.25 nm ~0.005 nm

第一节 X射线的产生

1. 产生X射线的方法

电磁辐射：变化的电场 $\leftrightarrow$ 变化的磁场



(1) 高速电子受阻（减速）产生电磁辐射

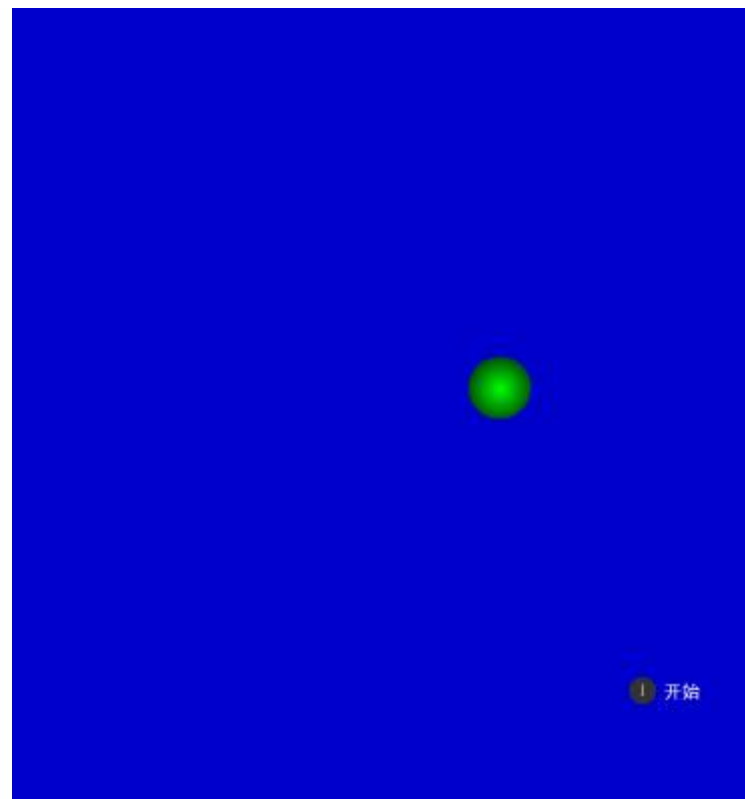
基本条件：

➤ 高速运动的电子流（几十~几百 keV）

➤ 适当的障碍物—金属靶

(2) 同步辐射：加速的高能带电粒子（ $E > 10\text{MeV}$ ）直接辐射X射线

中国科技大学中科院国家同步辐射实验室： $E \sim 800\text{MeV}$



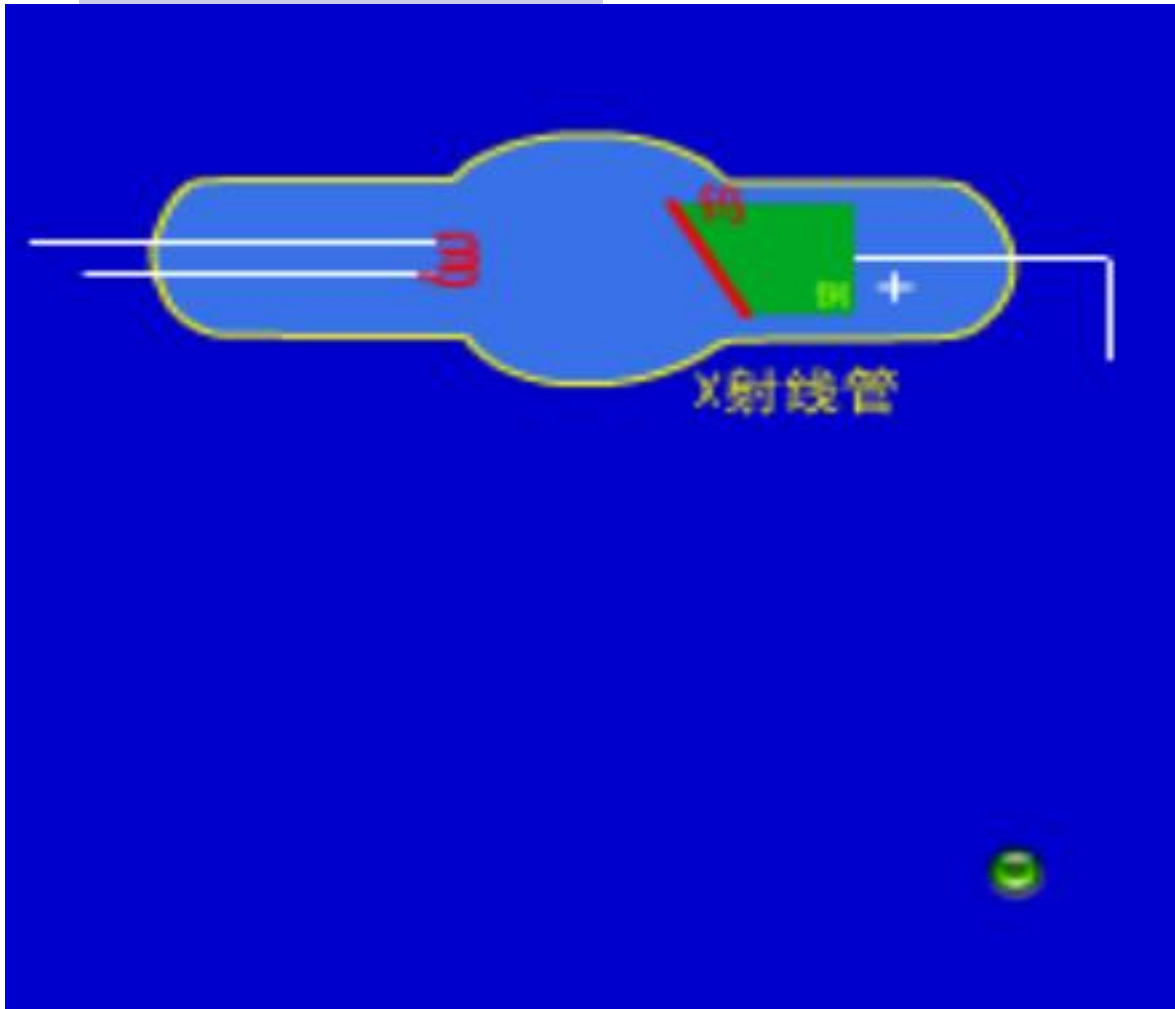
2. X射线的产生装置



X射线管(俗称球管)照片

现在人们已经发现了许多的X射线产生机制，其中最为实用的能获得有足够强度的X射线的方法仍是当年伦琴所采用的方法——用**阴极射线管**（高速电子受阻辐射）。

组成：**真空玻璃壳，阴极，阳极**



(1) X射线管

硬质真空玻璃管

- 阴极灯丝（钨丝）
- 阳极靶（钨、钼靶）

(2) 低压电源

降压变压器，为灯丝加热（5~10V）

(3) 高压直流电源

升压变压器，为电子加速（几十~几百kV）

管电压 U : 阴阳两极间的直流高压 (kV)

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = eU$$

管电流: 阴阳两极间电子流形成的电流 (mA)

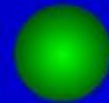
(1) 管电流 $I=1\text{mA}$:

单位时间内打到靶上的电子数目: $N \sim 6.2 \times 10^{15}$

(2) 产生X射线的
概率: $P \sim 1\%$

产生最大能量的X光
光子的概率: $P \rightarrow 0!$

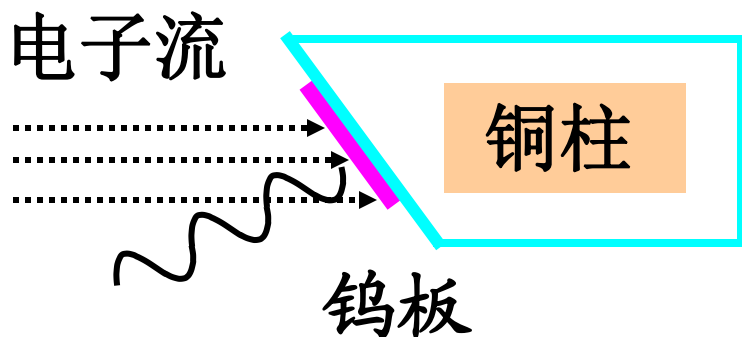
(3) X射线的频率 (波长) 有较宽的分布



说明：

（一）X射线的转换效率

- 电子动能转变化为X射线的能量不到1%
- 99% 以上的电子动能都转化为热能，使阳极温度升高
- 被轰击区域大多用熔点高的物质——钨、钼

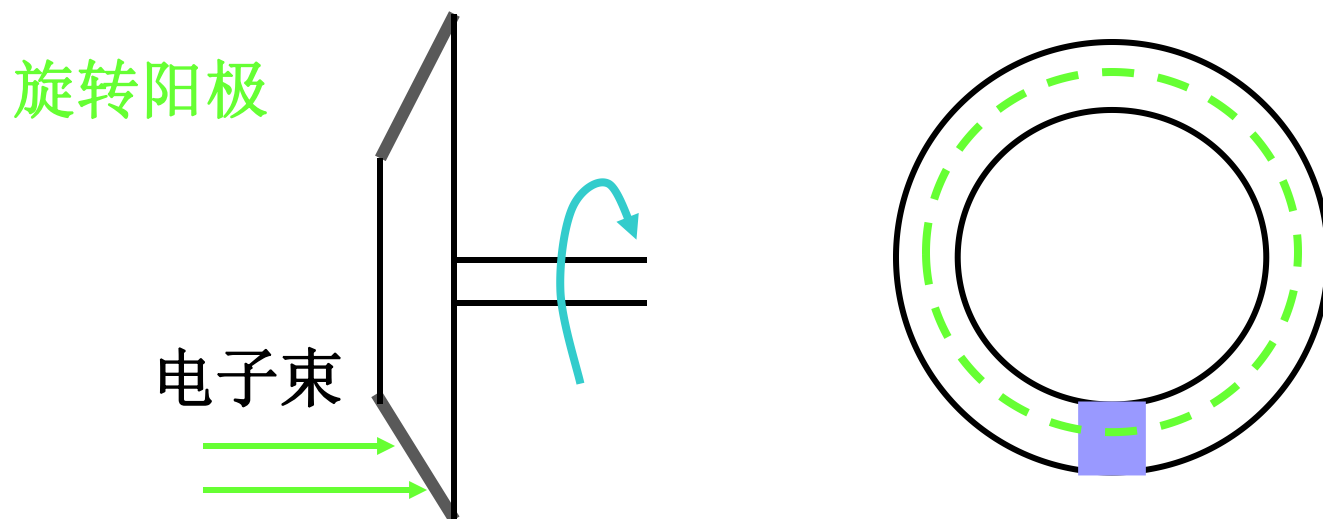


（二）靶的原子序数 Z 越大，产生X射线的效率越高

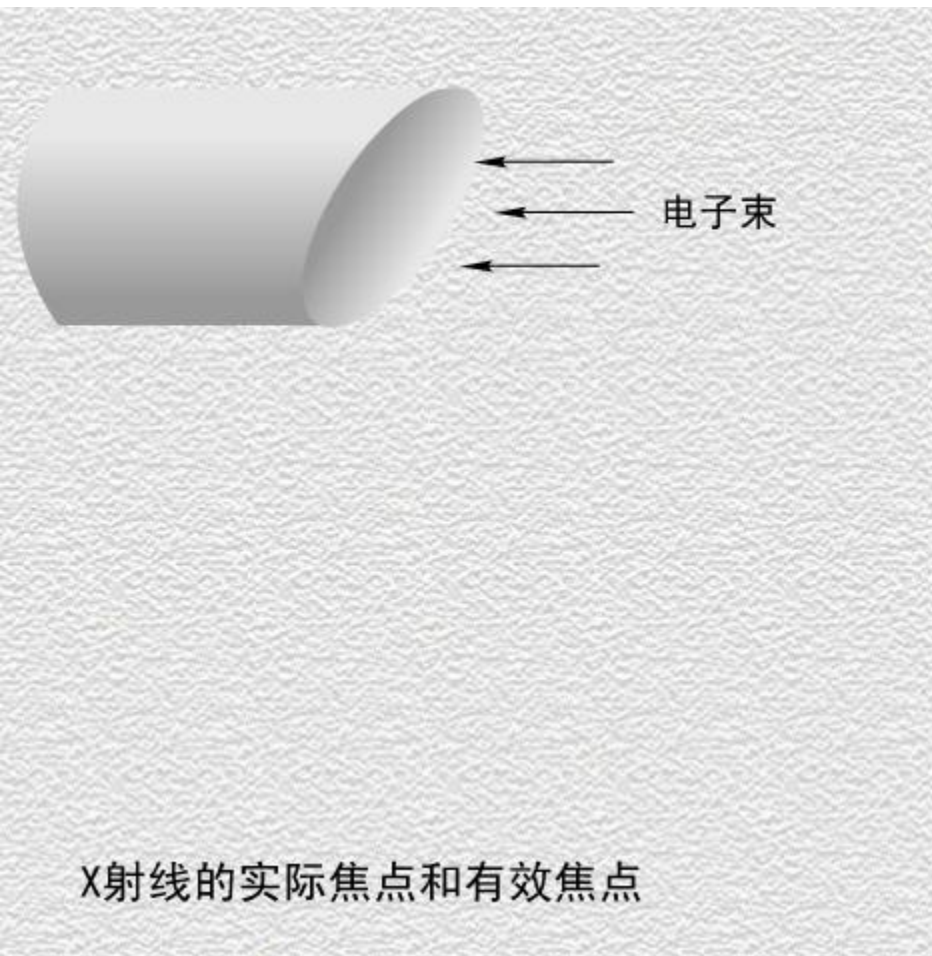
- 钨靶： $Z=74$ （高熔点、高原子序数）
- 钼靶： $Z=42$ ，软X射线用

根据功率的不同采用散热片、通风冷却、阳极做成中空用水或油循环冷却；

大功率的X射线管，多采用旋转阳极



3、实际焦点与有效焦点（自学）



实际焦点：灯丝发射的电子，经聚焦加速后，投射到阳极靶上的面积。

有效焦点：实际焦点在垂直于X射线管轴线方向上投影的面积。

靶倾角：靶表面与X线输出方向的夹角

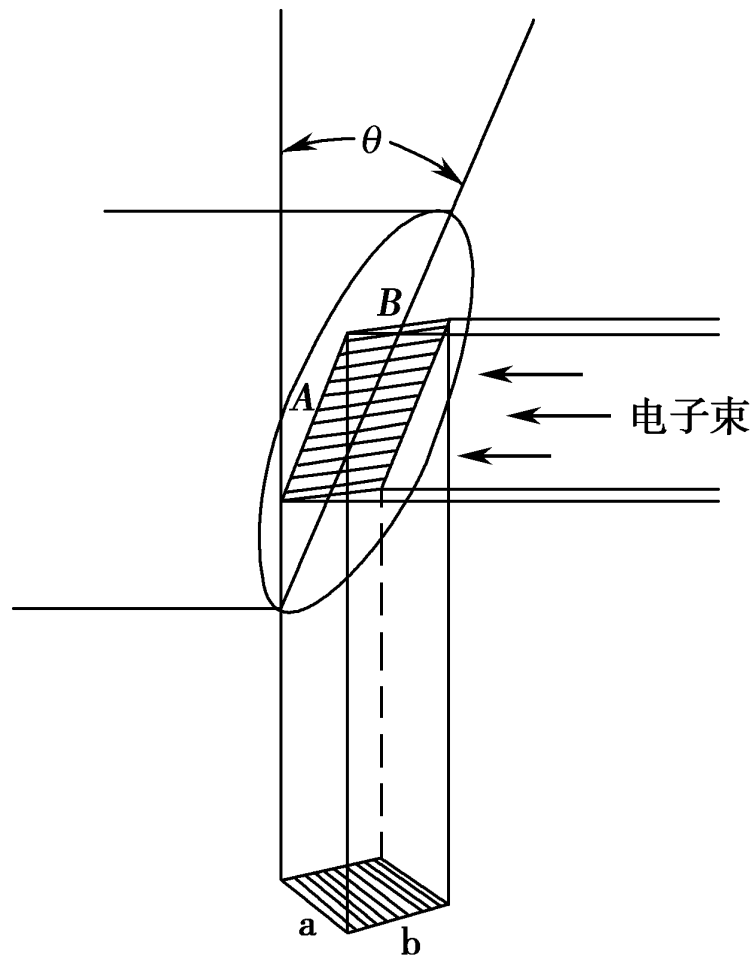
实际焦点： $A \times B$

有效焦点： $A \sin \theta \times B$

实际焦点愈大X射线管的散热愈好；有效焦点愈小，所成的像愈清晰。

长灯丝形成的焦点叫大焦点，治疗用。

短灯丝形成的焦点叫小焦点，诊断用。



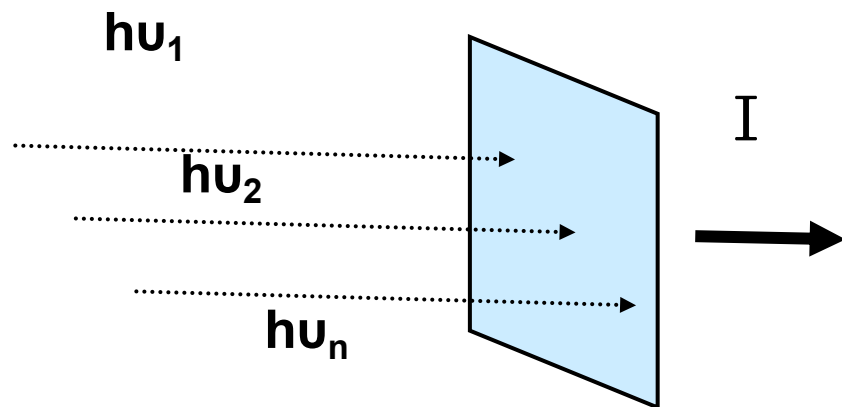
二、 X射线的强度和硬度

1. X射线的强度I

定义：

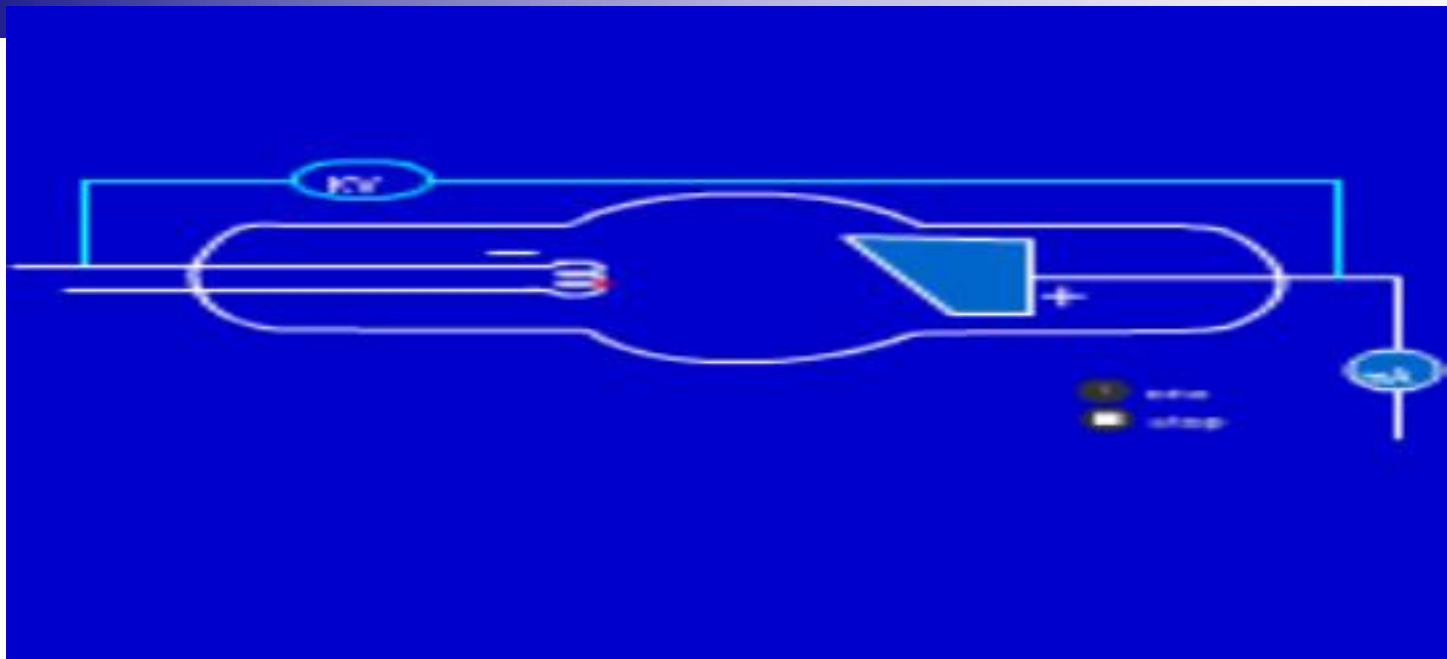
单位时间穿过与射线传播方向垂直的单位面积的X射线的能量。

用I表示。单位： $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$



$$I = \frac{\Delta E}{\Delta t \cdot \Delta S}$$

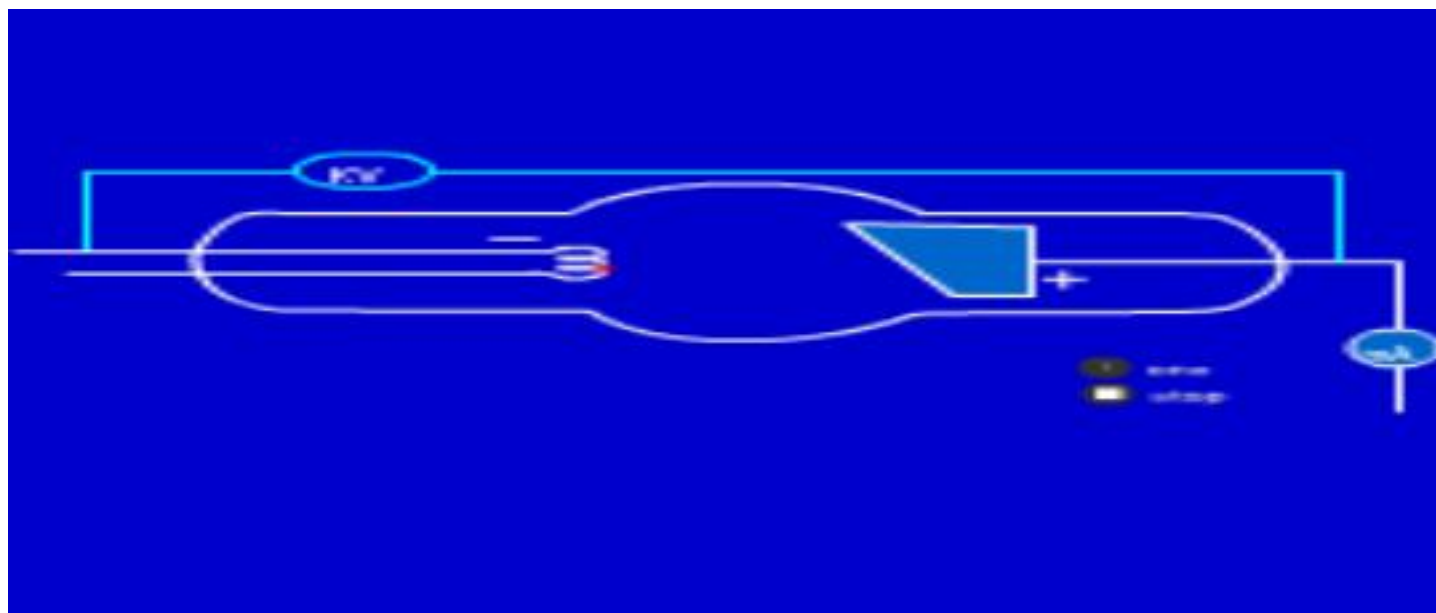
$$I = N_1 h \nu_1 + N_2 h \nu_2 + \dots + N_n h \nu_n = \sum N_i h \nu_i$$



$$I = \sum N_i h \nu_i = N_1 h \nu_1 + N_2 h \nu_2 + \dots + N_n h \nu_n$$

强度的调节方法:

1. 改变管电流: 光子数 $\propto$ 电子数
2. 改变管电压: 光子能量 $\propto$ 管电压



➤ 临床通常采用的方法：

- 保持管电压一定，即不改变X射线的贯穿本领
- 通过调节管电流来控制X射线的强度

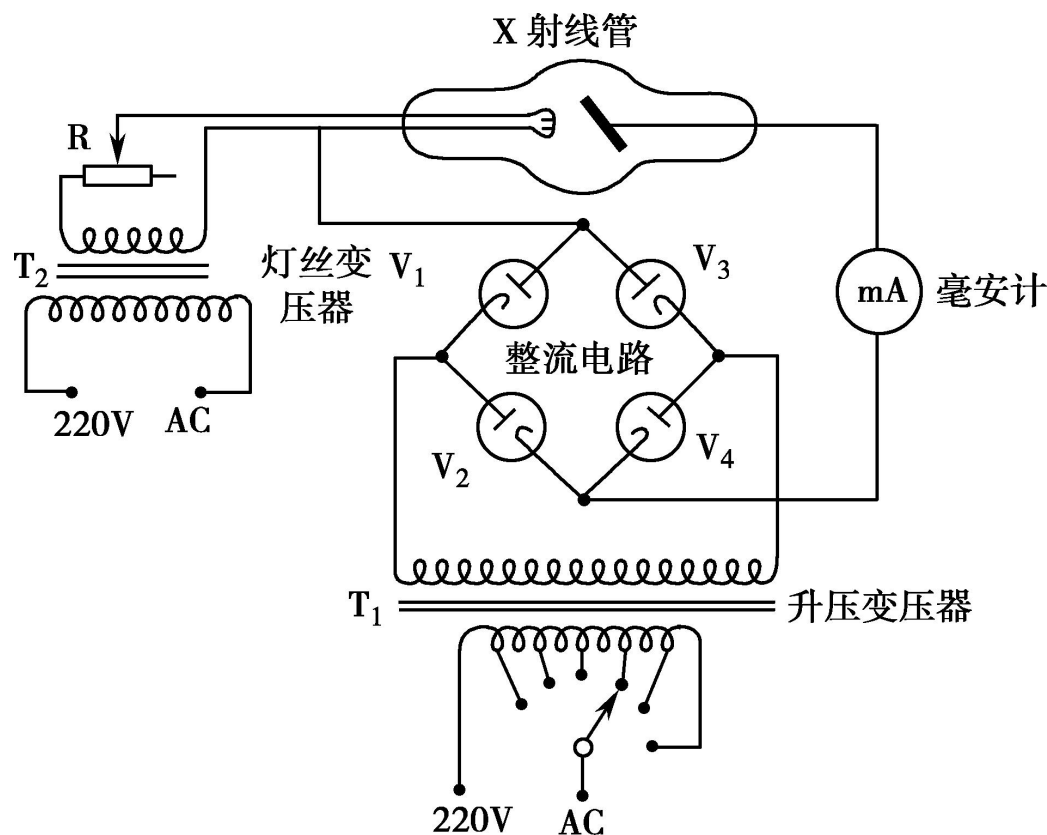
➤ 临床X射线强度的表示：管电流的毫安数（mA）

➤ 总辐射能量（**mA·s**）：

管电流的毫安数（mA）×照射时间（s）

例：关于x射线强度的调节,无效的方法是：

- A. 调节灯丝电流；
- B. 调节灯丝电压；
- C. 调节管电压；
- D. 调节照射时间。**



2. X射线的硬度

➤ 定义：

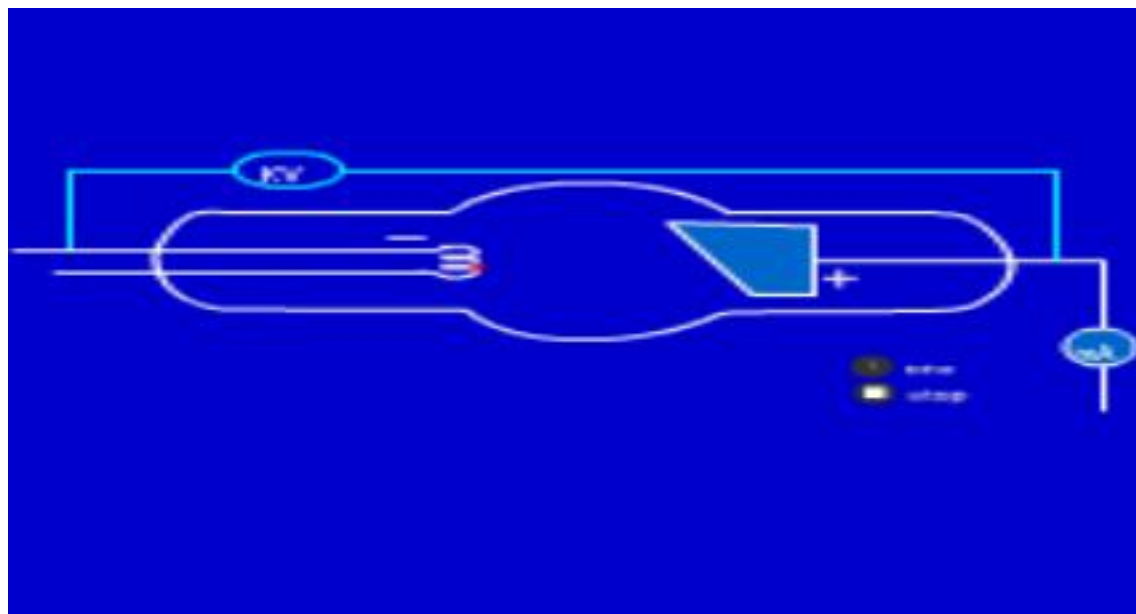
X射线的贯穿本领

□ 只决定于X射线光子的能量 $h\nu$

□ 与光子数目无关

➤ X射线的硬度表示：管电压的千伏数（kV）

➤ 提高X射线硬度的方法：增大管电压



根据临床用途，X射线按硬度分为极软、软、硬和极硬四类：

表17-1 X射线按硬度的分类

名称	管电压 (kV)	最短波长 (nm)	主要用途
极软X射线	5~20	0.25~0.062	软组织摄影,表皮治疗
软X射线	20~100	0.062~0.012	透视和摄影
硬X射线	100~250	0.012~0.005	较深组织治疗
极硬X射线	250以上	0.005以下	深部组织治疗

数字X线摄影 (Digital Radiography DR)

数字透视 (Digital Fluoroscopy DF)

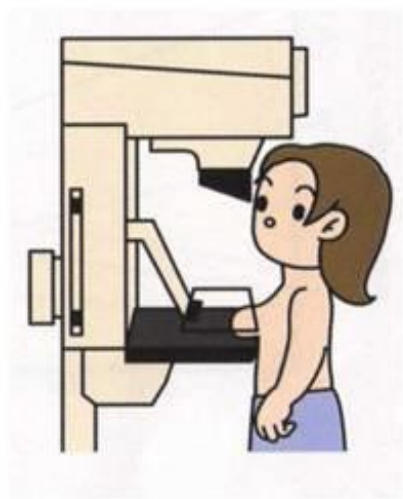
X光片：冲洗→打印



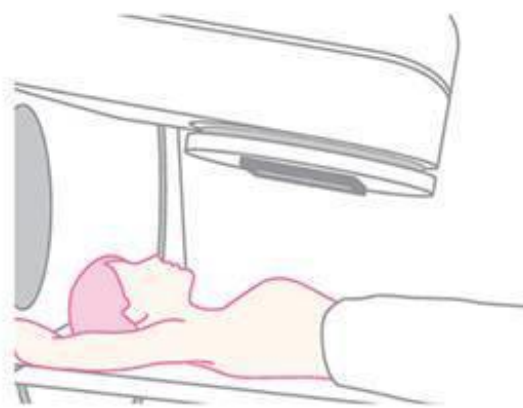
正片

反转片

- ✓数字透视 (DF)
- ✓数字X线摄影 (DR)
- ✓X-CT等已经成为医学影像诊断中普遍应用的检查手段



(a)



(b)



钼靶乳腺x光机 (25kV)



例：X射线的贯穿本领决定于

A. X射线的强度；

B. X射线的硬度；

C. 照射物质时间的长短；

D. 靶面积的大小。



例：产生X射线的必要条件是：

A.加热灯丝

B.高速电子流与靶材料

C.高压电源

D.散热装置



例：在产生X射线时，提高X射线的效率的方法是：

A.利用轻的元素作靶材料

B.利用原子序数高的物质作靶材料

C.利用任意元素作靶材料

D.加强散热装置

例：用管电流的毫安数表示x射线的辐射强度是因为：

- A.管电流的毫安数就是打在靶上的高速电子数；
- B.管电流的毫安数就是x射线的总光子数
- C.管电流的毫安数就是x射线的实际辐射强度
- D.x射线的辐射强度与管电流成正比

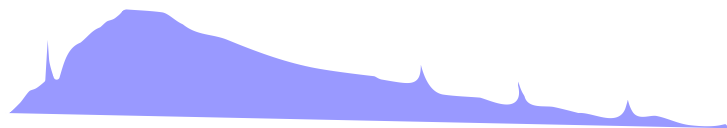
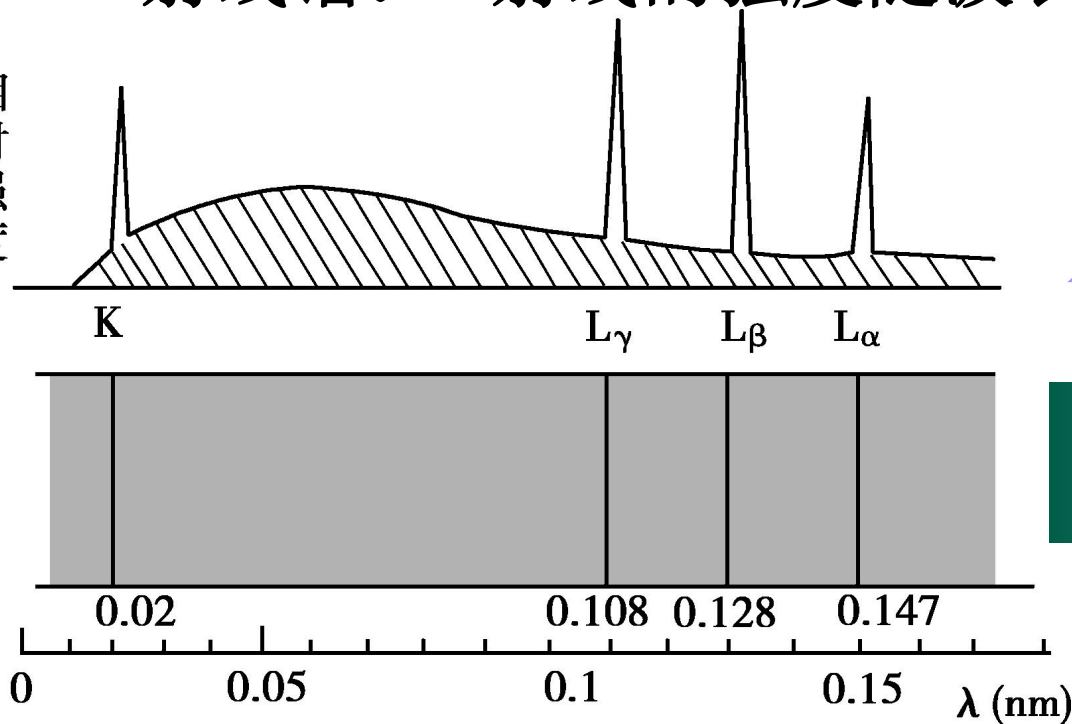
例：调节x射线强度的主要方法是：

- A. 调节灯丝电压；
- B. 调节管电压；
- C. 调节散热装置；
- D. 调节辐射时间。

第二节 X射线谱(X-ray Spectrum)

X射线谱：X射线的强度随波长的顺序排列的图谱

相对强度



成像用X射线？

- 连续X射线（连续谱）：包含各种波长，且强度随波长连续分布
- 标识X射线（标识谱）：某些特定波长处强度较大的离散（线状）谱

一、连续 X 射线谱

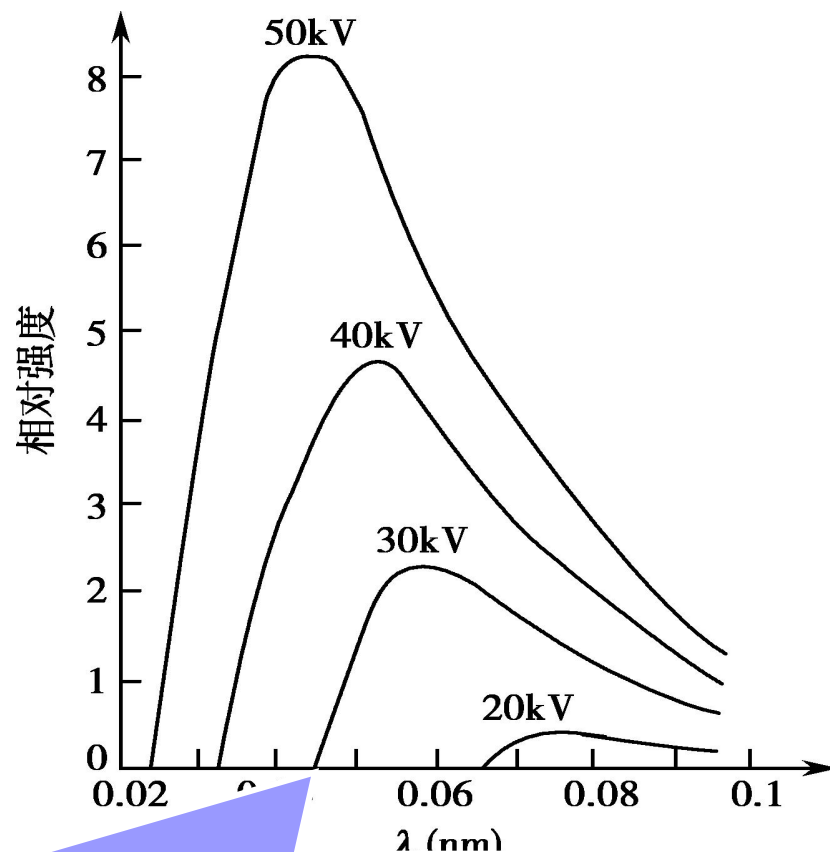
管电压较低时（低于50KV），只出现连续 X 射线谱。

1. 连续谱的特点

(1) 管电压一定时，谱线的相对强度随波长连续变化，并存在短波极限。

(2) 随着管电压增大，短波极限 $\lambda_{\min}$ 向短波方向移动。

(3) 随着管电压增大，X射线管的辐射能量增大。



相对强度为零的波长称为短波极限 $\lambda_{\min}$

2. 连续 X 射线的产生机制

幻灯片 16

轫致辐射：制动导致的 X 射线辐射

带电粒子速度（能量）变化产生的电磁波辐射。

短波极限 $\lambda_{\min}$

一个电子的动能全部转换为一个 X 光子的能量：

$$h\nu_{\max} = \frac{1}{2}mv^2$$

$$eU = \frac{1}{2}mv^2$$


$$h\nu_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}} = eU \quad \Rightarrow \quad \lambda_{\min} = \frac{hc}{eU}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1.6 \times 10^{-19} U} = \frac{1.242 \times 10^{-6}}{U} (m)$$

即：

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

例：若 X 射线管的管电压为100kV。
则连续X射线谱的最短波长和相应光子
能量为多大？

解：

$$\lambda_{\min} = \frac{1.242}{U(kV)} (nm) = \frac{1.242}{100} = 0.01242(nm)$$

$$E = eU = 10^5 (eV) = 100 (keV)$$

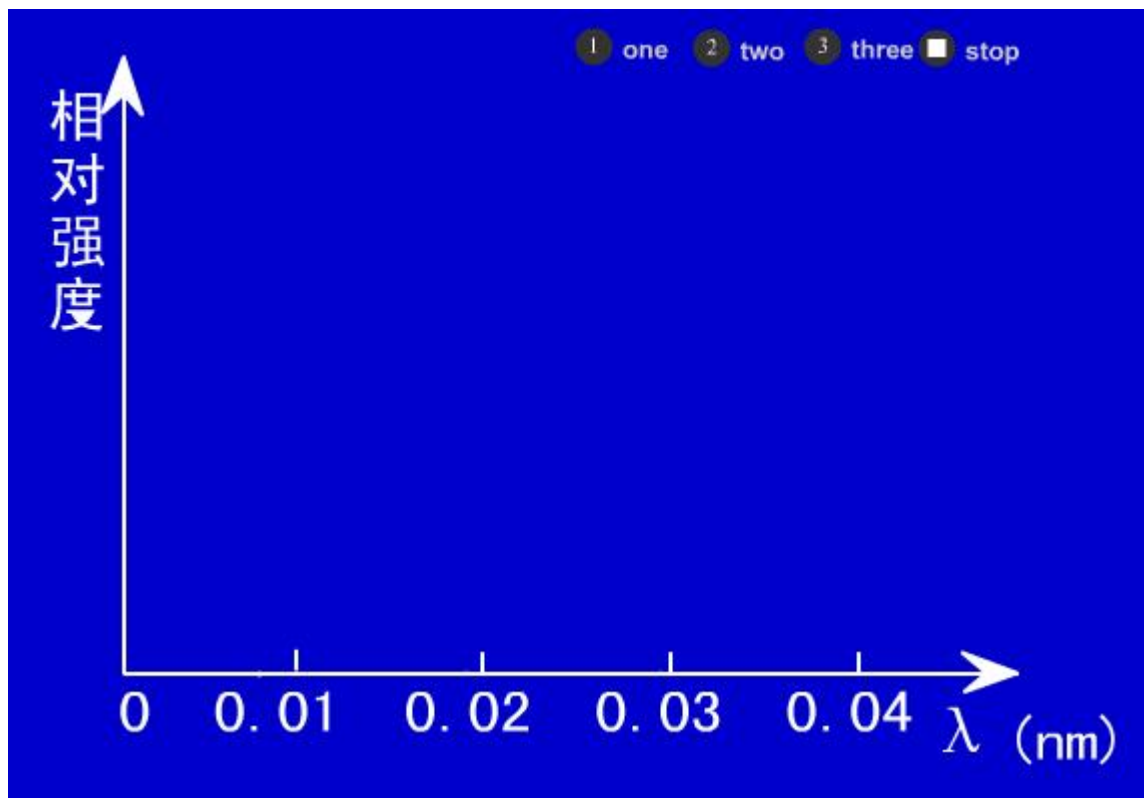
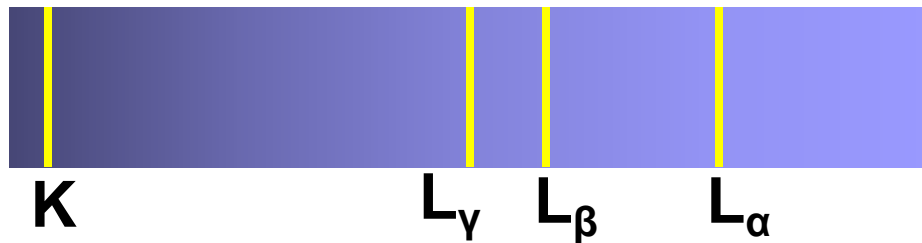
二、标识X射线谱(characteristic X-ray Spectrum)

1. 标识谱的特征

➤ 只有达到一定的管电压
(钨靶 $\geq 70\text{kV}$)，标识 X
射线才会出现。

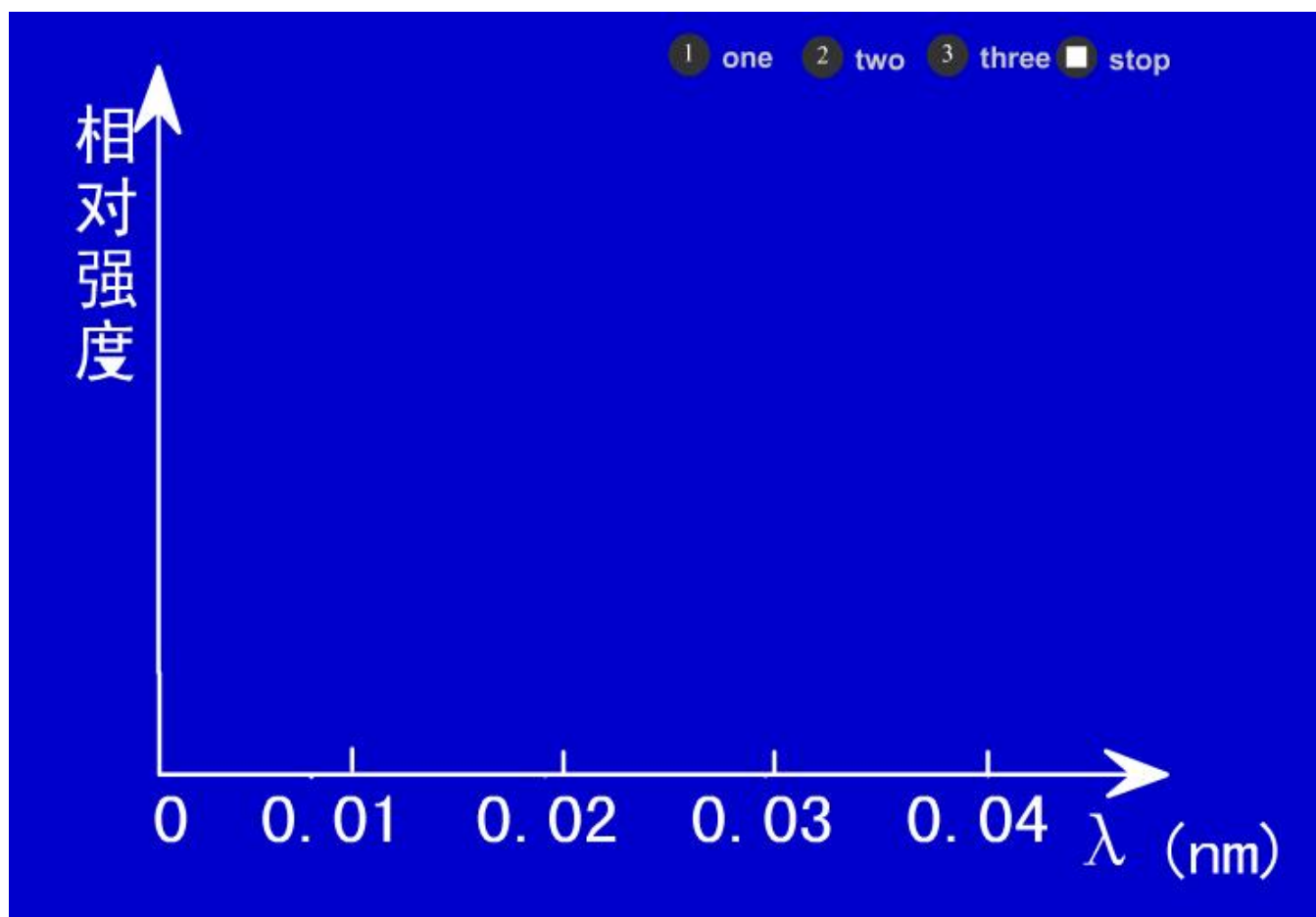
➤ 谱线的 λ 决定于靶
材料，与管电压无关。

0.02nm

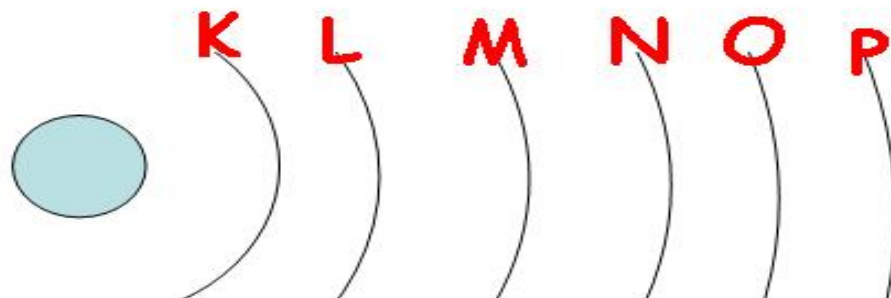
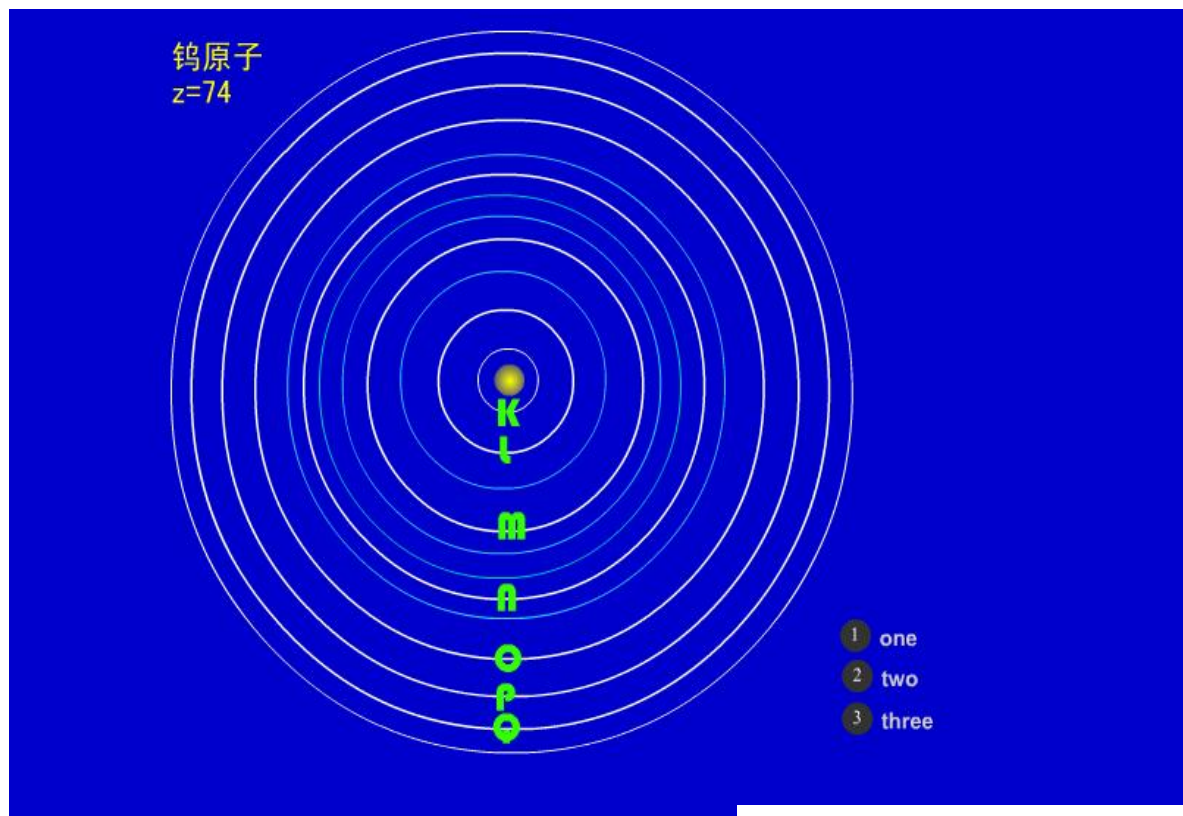


不同元素制成的靶，具有不同的线状 X 射线谱，可作为这种元素的标识，称“标识 X 射线”。

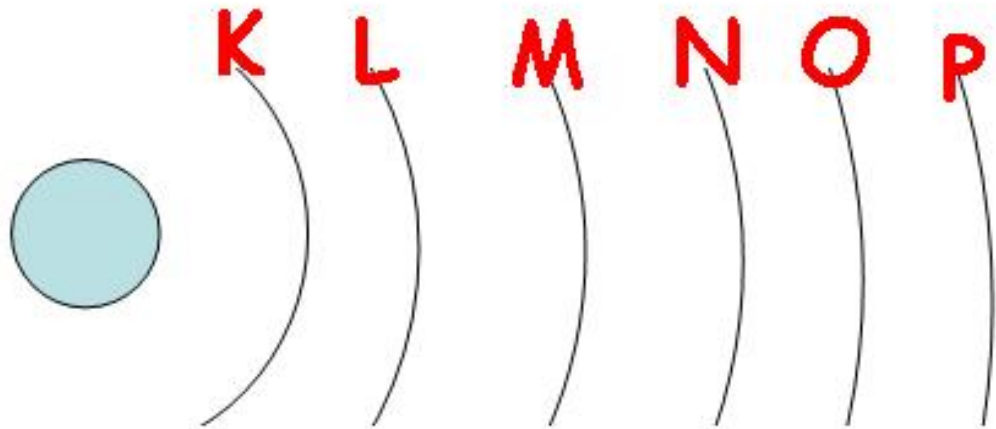
利用微区
分析技术
鉴定元素
成分。



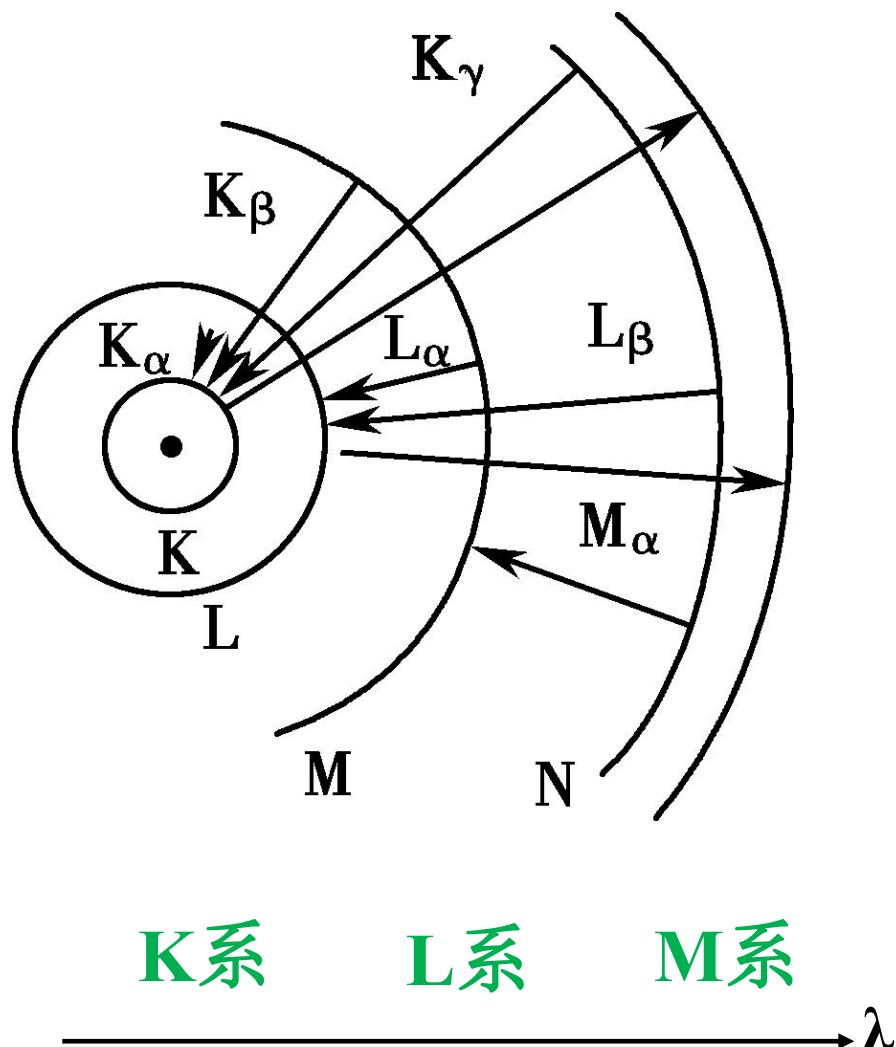
2、产生机制 内层电子受激的结果



从原子物理学知道，原子内的电子分布在各个能级上（电子轨道），用记号K、L、M、N.....表示。K层最靠近原子核，能量最低，稳定性最强（电子束缚能最高）。



能级差 $\Delta E = h\nu$



若K层出现空位形成的X射线即称为**K线系**。即K α 、K β 、及K γ 射线

L层出现空位即形成**L线系**

M层出现空位即形成**M线系**

$$E_L - E_K = h\nu_{K\alpha}$$

$$E_M - E_K = h\nu_{K\beta}$$

.....

$$E_{\text{自}} - E_K = h\nu_{\text{max}} \\ = hc / \lambda_{\text{min}}$$

普通的原子、分子发光：
外层间电子跃迁

标识x射线小结:

- ① 标识x射线是内层电子受激的结果
- ② 每一线系都有自己的最短波长边界

$$E_{\text{自}} - E_{\text{K}} = h\nu_{\text{max}} = hc/\lambda_{\text{min}}$$

- ③ 靶元素原子序数愈高，对应的线系（K、L...线系）的波长愈短。

∴ 靶的标识谱决定于靶材料各层的能量差值。



例：连续x射线谱中的最短波长与什么因素有关？

- A. 与管电流有关；
- B. 与靶材料有关；
- C. 与靶面积大小有关；
- D. 只与管电压有关。**

例：x射线机在固定电压下产生的连续 x 射线谱，具有下列哪一个特征？

- A. 单一波长；
- B. 范围从 $\lambda=0$ 到 $\lambda \rightarrow \infty$ 的波长；
- C. 最小波长；
- D. 最小频率。

例：若某X射线管的管电压**200KV**，
则连续谱的短波极限为

A. $6.2\text{\AA}$

B. $0.062\text{\AA}$

C. $12.4\text{\AA}$

D. 6.2×10^{-5}

$$\lambda_{\min} = \frac{1.242}{U(KV)} nm = 6.2 \times 10^{-3} nm = 0.062 \text{ \AA}$$

例：X射线管的管电压为100KV，其辐射的X光子的最大能量和最短波长分别为 $E_{\max}$ 、 $\lambda_{\min}$ ，则

- ① $E_{\max}=100\text{keV}$, $\lambda_{\min}=0.124\text{\AA}$
- B. $E_{\max}=100\text{keV}$, $\lambda_{\min}=1.24\times 10^{-4}\text{\AA}$
- C. $E_{\max}=100\text{kJ}$, $\lambda_{\min}=0.124\text{\AA}$
- D. $E_{\max}=100\text{eV}$, $\lambda_{\min}=1.24\times 10^{-4}\text{\AA}$

$$E_{\max}=eU, \quad \lambda_{\min}=\frac{1.242}{U}$$

例：若已知 X 射线管上的电压增加了一倍后，连续 X 射线谱的最短波长变化了 $0.5\text{\AA}$ ，试求该波长的最小值。

解：
$$\lambda_{\min} = \frac{1.242}{U(KV)} (nm)$$

$$\lambda'_{\min} = \lambda_{\min} - \Delta\lambda = \frac{1.242}{2U} = \frac{1}{2} \lambda_{\min}$$

$$\lambda_{\min} = 2\Delta\lambda = 2 \times 0.5 = 1\text{\AA} = 0.1nm$$

例：如果要得到最短波长为 $0.5\text{\AA}$ 的X射线，至少要加多大的电压于X射线管？在此情况下，电子运动到阳极有多大的动能？

$$\lambda_{\min} = \frac{1.242}{U(kV)}(nm) \Rightarrow U = \frac{1.242}{\lambda_{\min}} = \frac{1.242}{0.5 \times 0.1} = 24.84(kV)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mV^2 = eU &= 24.84(KeV) = 24.84 \times 10^3 \times 1.6 \times 10^{-19} \\ &= 3.97 \times 10^{-15}(J) \end{aligned}$$

$$\text{或} \quad \frac{1}{2}mV^2 = \frac{hc}{\lambda_{\min}} = 3.97 \times 10^{-15}(J)$$

第三节 X射线的基本性质

X射线具有强电离作用、荧光作用、光化学作用、生物效应、强穿透性等基本性质或作用。

1. 电离作用（X射线:电离辐射）

- 使原子、分子电离：外层电子脱离轨道成为离子
- 引发生物损伤

（1）禁忌：孕妇、胎儿、胚胎

（2）X射线治疗：浅表放射治疗、X刀

2. 荧光作用

- 照射磷、铂氰化钡、硫化锌镉、钨酸钙等时，能使原子、分子处于激发态。
- 原子、分子在回到基态的过程中，辐射可见光或紫外线，即荧光。
- X射线透视



数字X射线摄影 (Digital Radiography DR)

数字透视 (Digital Fluoroscopy DF)



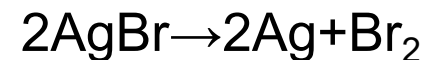
X射线管

平板探测器

X光机

3. 光化学作用

- X射线能使胶片感光



- X射线摄影

4. 生物效应

- X射线照射生物体时，生物细胞受到抑制、破坏甚至坏死（如白细胞下降）
- 致使机体发生不同程度的生理、病理和生化等方面的改变
- 放射病（辐射病）

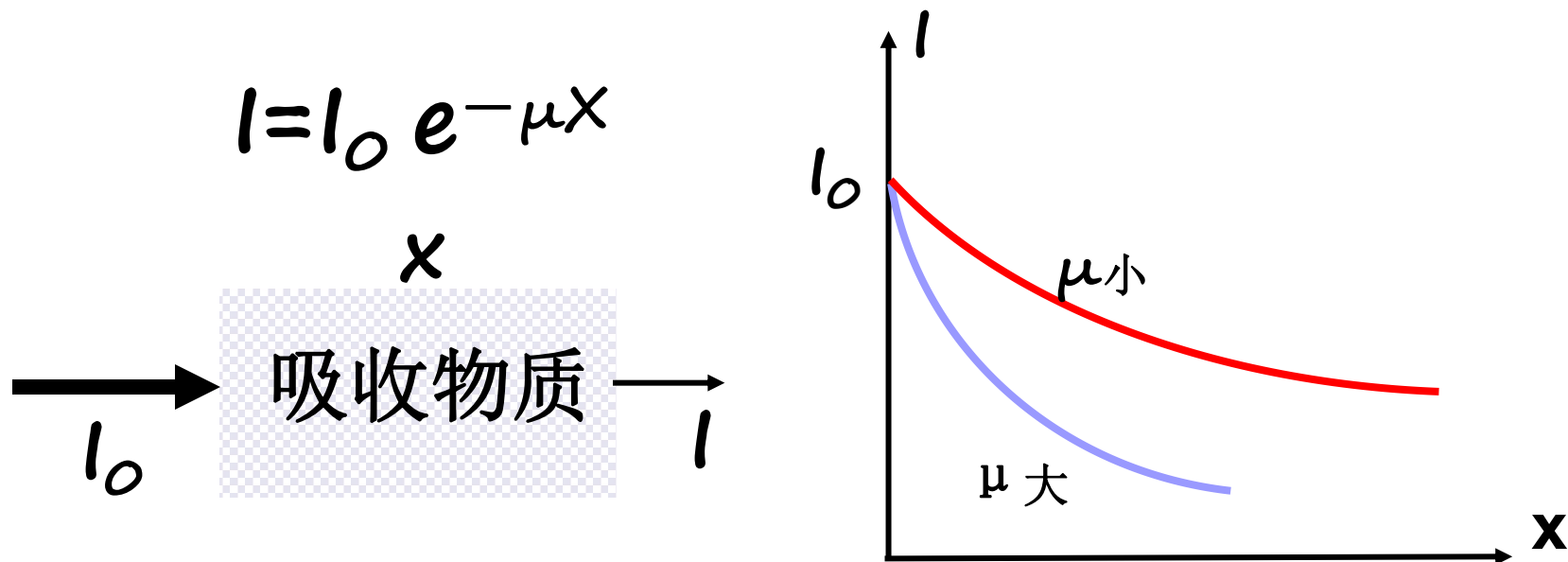
5. 贯穿本领：决定于介质的衰减系数（吸收系数）

- 衰减系数与X射线的波长 λ 有关（管电压的kV数）
- 衰减系数与原子序数有关
- 衰减系数与吸收物质的密度有关



第四节 物质对X射线的衰减规律

单色、平行的（滤线器）X射线的衰减：指数衰减规律



1. μ : （吸收物质的）线性衰减系数

- 单位: m^{-1} 、 cm^{-1}
- μ 越大, 强度衰减得越快, 物质对X射线的吸收越强
- 同种物质: μ 与密度成正比

2. μ_m : 质量衰减系数

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

μ : 线性衰减系数

ρ : 吸收物质的密度

- 同种物质在不同物态下 μ_m 相同
- 用来比较不同物质对 x 射线的吸收本领

3. 质量厚度

$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho x} = I_0 e^{-\mu_m x_m}$$

$x_m = x \rho$ 称为质量厚度单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$

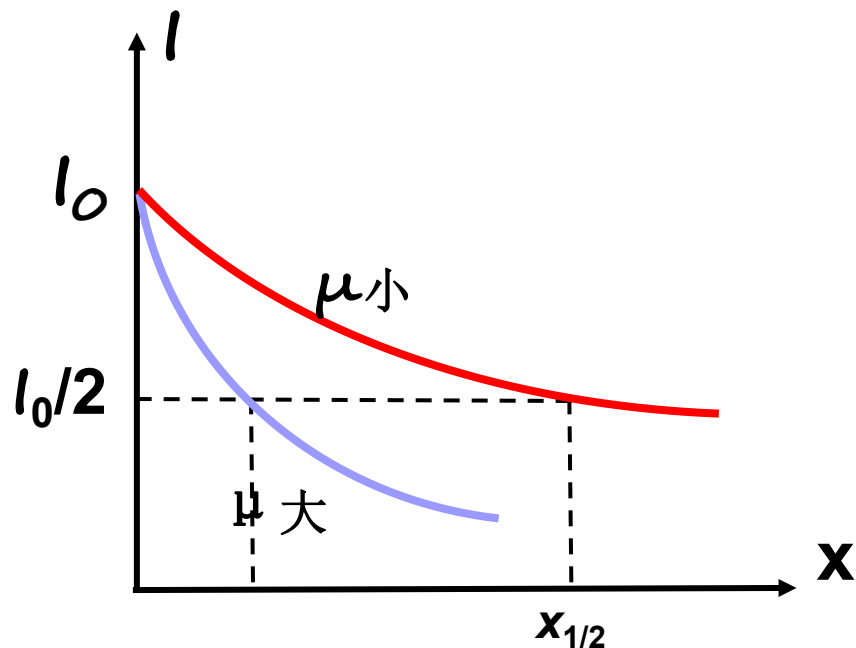
4. 半价层 $x_{1/2}$ （半吸收厚度）

X射线在物质中强度衰减一半对应的厚度

$$I = \frac{I_0}{2} = I_0 e^{-\mu x_{1/2}}$$

$$\therefore x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu}$$

$$x_{m1/2} = \frac{\ln 2}{\mu_m} = \frac{0.693}{\mu_m}$$



故X射线的衰减
规律又可写为:

$$I = I_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{x}{x_{1/2}}}$$

$$I = I_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{x_m}{x_{m1/2}}}$$

例：一束强度为 I_0 的单色平行X射线，通过厚度为 x_1 的物体后，强度为 I_1 ，若使它通过厚度为 $x_2=2x_1$ 的同类物体，强度为 I_2 ，则

A. $I_2/I_1=e^{-\mu x_{1/2}}$

B. $I_2/I_1=e^{-\mu x_1}$

C. $I_2/I_1=2$

D. $I_2/I_1=1/2$

$$I_1 = I_0 e^{-\mu x_1}$$

$$\frac{I_2}{I_1} = e^{-2\mu x_1 + \mu x_1} = e^{-\mu x_1}$$

$$I_2 = I_0 e^{-\mu 2x_1}$$

例：强度为 I_0 的x射线通过物质时，该物质对x射线的吸收强度 I 与物质厚度 x 及物质的衰减系数 μ 的关系为

A. $I = \mu x I_0$

B. $I = I_0 e^{-\mu x}$

C. $I = I_0 e^{\mu x}$

D. $I = I_0 (1 - e^{-\mu x})$

吸收强度 I = 入射强度 I_0 - 透射强度 $I_0 e^{-\mu x}$

例：两种物质对x射线吸收的半价层之比为 $1/\sqrt{2}$ ，则它们的衰减系数之比为：

A、 $1/\sqrt{2}$

B、 $1/2$

C、 $\sqrt{2}/1$

D、 $2/1$

$$x_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\mu}$$

例：X射线通过5个半价层的物质后，
强度减小为原来的

A. 1/4

B. 1/5

C. 1/16

D. 1/32

$$\frac{I}{I_o} = \left(\frac{1}{2}\right)^5 = \frac{1}{32}$$

例：某物质对某种波长的x射线的衰减系数为 20cm^{-1} 。欲使透过的x射线的强度为入射x射线强度的50%，则该物质的厚度应为

A. 3.465cm

Ⓐ $3.465 \times 10^{-2}\text{cm}$

C. 13.86cm

D. 1.386cm

$$x_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

例：某物质对x射线的质量吸收系数为
 $0.05\text{cm}^2/\text{g}$,则它的质量半价层为：

A. $13.86\text{g}/\text{cm}^2$

B. $138.6\text{ g}/\text{cm}^2$

C. $13.86 \times 10^{-2}\text{ g}/\text{cm}^2$

D. $1.386\text{ g}/\text{cm}^2$

$$x_{m\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\mu_m} = \frac{0.693}{0.05} = 13.86(\text{g} / \text{cm}^2)$$

二、衰减系数与波长、原子序数的关系（自主学习）

质量衰减系数： $\mu_m = kZ^\alpha \lambda^3$

1. 对 λ 一定的X射线：**z**愈大的物质，吸收本领愈强

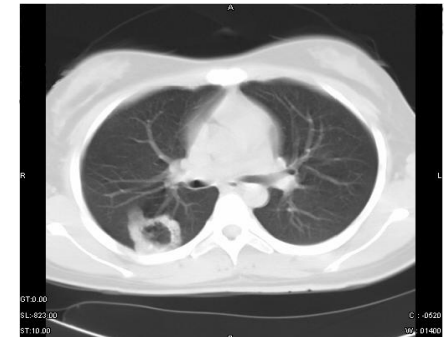
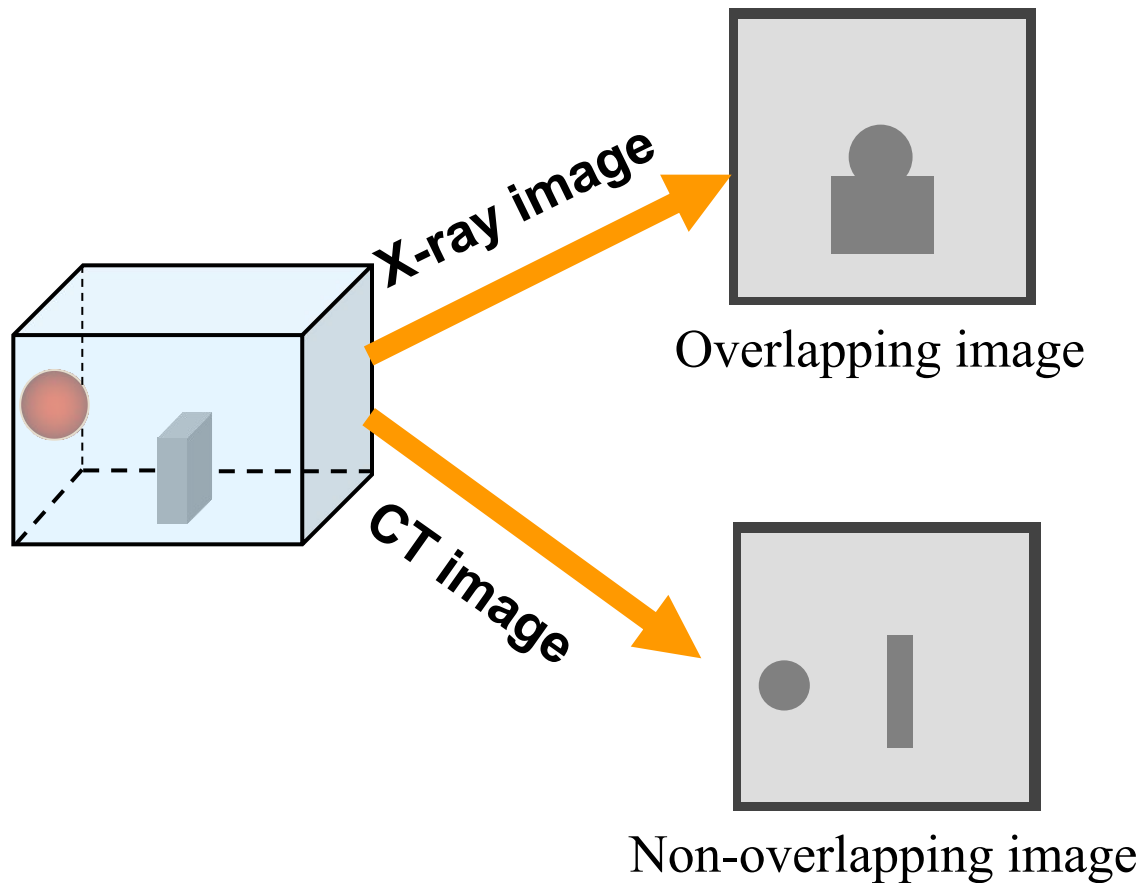
- 骨：Ca、P，Z较大，吸收强
- 软组织：H、O、C，Z较小，吸收弱
- 胃肠造影：服用钡盐（钡餐，**Z=56**）
- 血管造影：影像增强剂
- 射线防护：铅（**Z=82**）

2. 贯穿本领与X射线的波长 λ 的关系

- 波长 λ 愈短， μ_m 愈小，贯穿本领愈强
- 浅部治疗用较低的管电压
- 深部治疗用较高的管电压

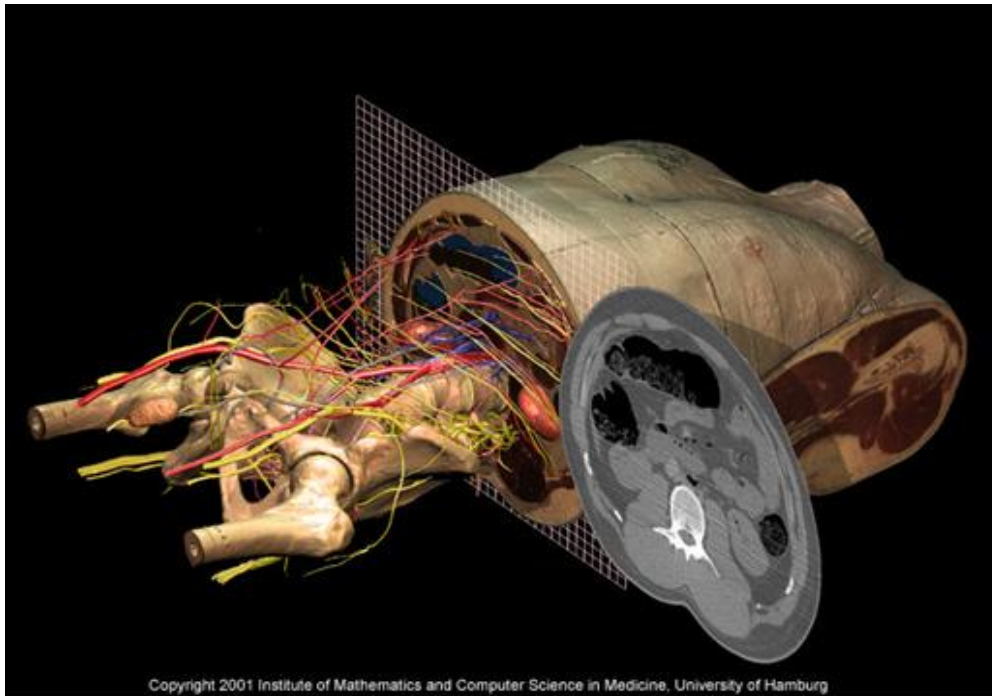


CT Broke the Barrier



Definition of CT

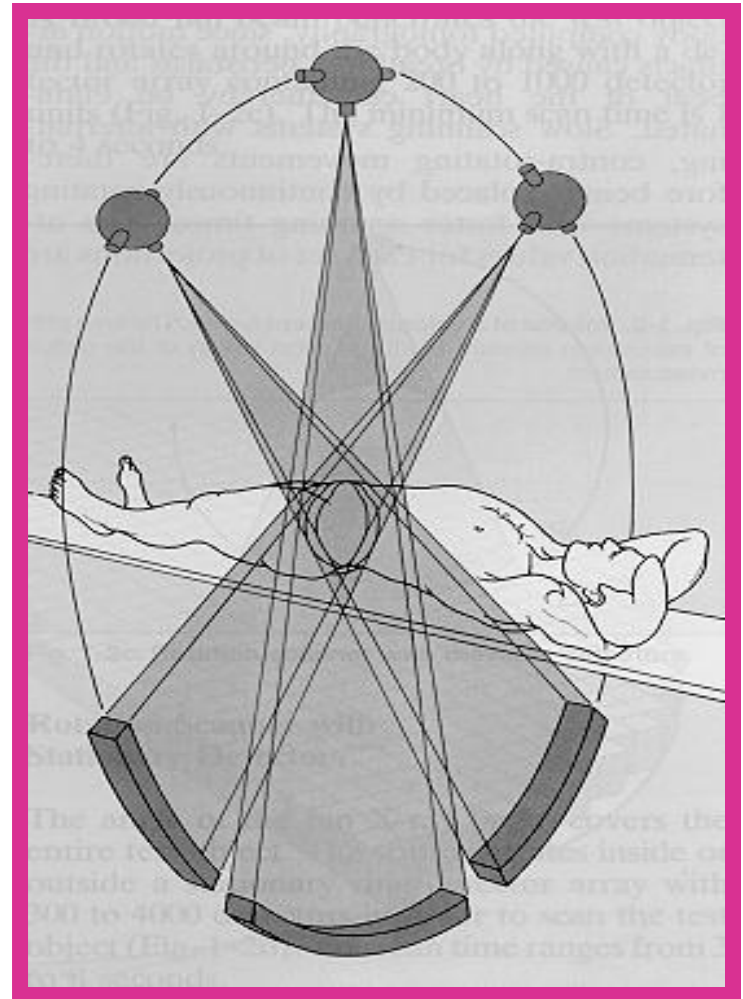
- **CT: computed tomography** (计算机断层成像)



X-ray goes through
an layer of the object,
called **“slice”** (断层)

How does CT Work?

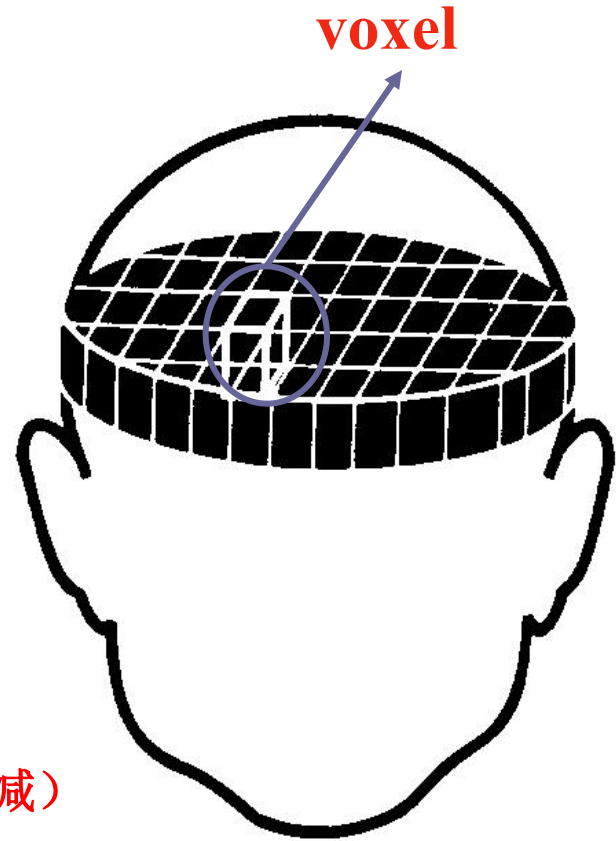
- ☐ Patient is placed in the center of the measurement field
- ☐ X-ray is passed through the patient's slice from many direction along a 360° path
- ☐ The transmitted beams are captured by the detectors which digitizes these signals
- ☐ These digitized signals called raw data are sent to a computer which create the CT image



How is CT Image generated?

The object slice is divided into very small volume elements called **voxels** (体素) .

Each voxel is assigned a value which is dependent on the average amount of **attenuation** (衰减)

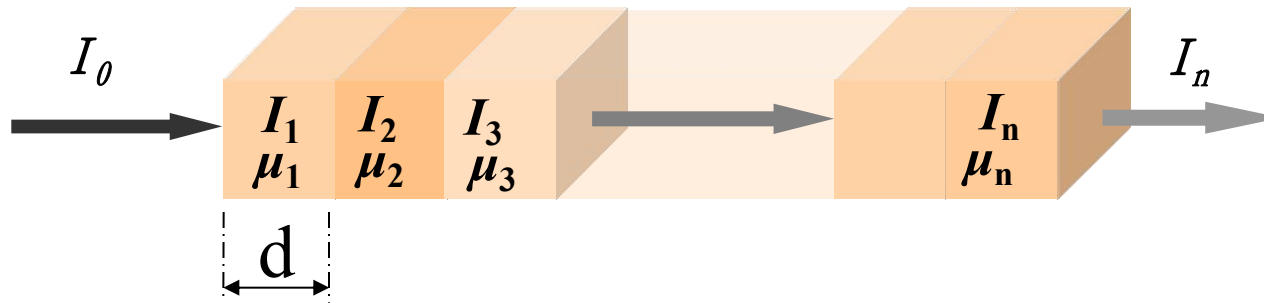


Voxel (体素) : very small volume elements

μ : attenuation coefficient

X-ray through the inhomogeneous medium

When μ is discontinuous changes



$$I_n = I_0 e^{-(\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n)d}$$

↪
$$\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n = \frac{1}{d} \ln \frac{I_0}{I_n}$$



$$\sum \mu_i = p$$

P is projection (投影)

I_0 —Incident intensity

I —out put intensity

d —thickness of voxel

μ — linear attenuation coefficient

How is CT Image generated?

- data acquisition

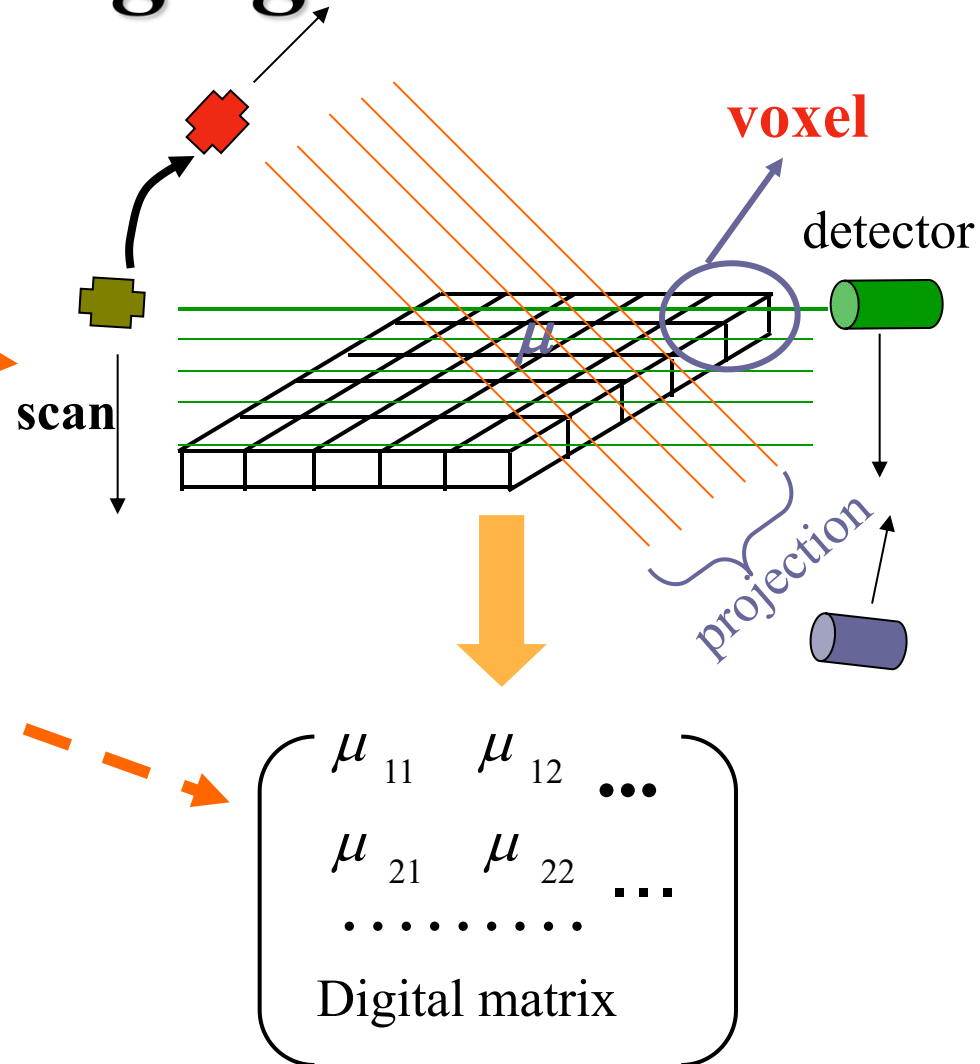
数据采集

- image reconstruction

图像重建

- image display

图像显示

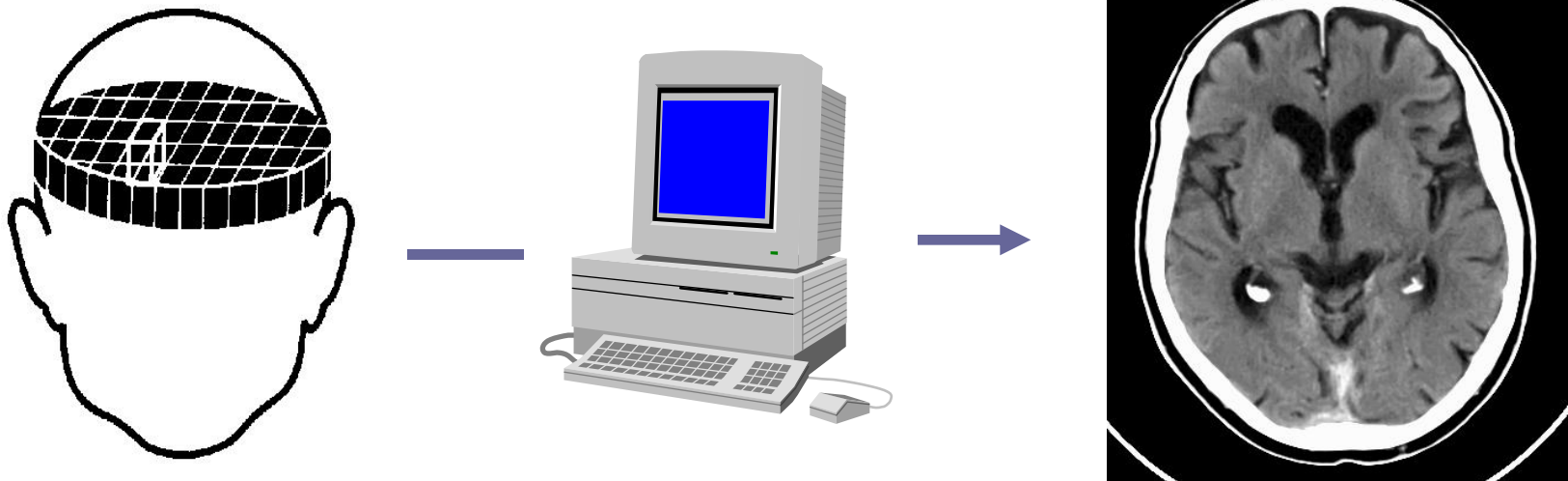


How is CT Image generated?

- image display

图像显示

The attenuation values are transferred to the computer where they are coded & used to create a slice image



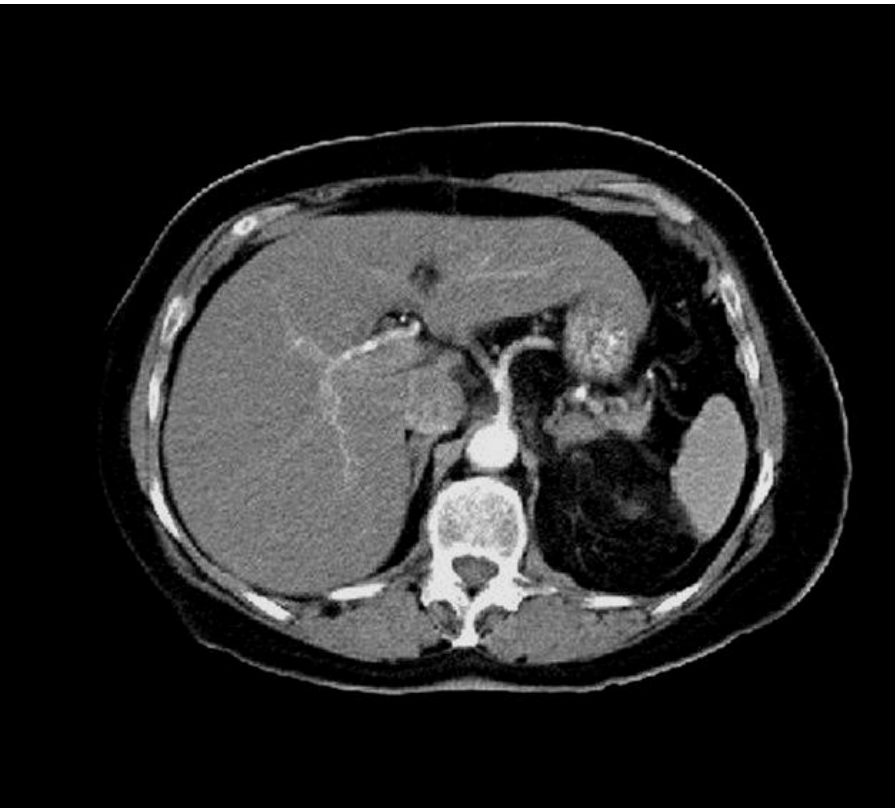
Spiral CT (螺旋CT)

What is Spiral Scan? --just 4“C”

- ☐ **C**ontinuously rotating tube/detector system
- ☐ **C**ontinuously generating X-ray
- ☐ **C**ontinuously table feed
- ☐ **C**ontinuously data acquisition



20th century



Two-dimensional tomography

21th century



Longitudinal three-dimensional



CT colonoscopy
CT结肠镜检