



第五章 X(或γ)射线在物质中的衰减

学习目标

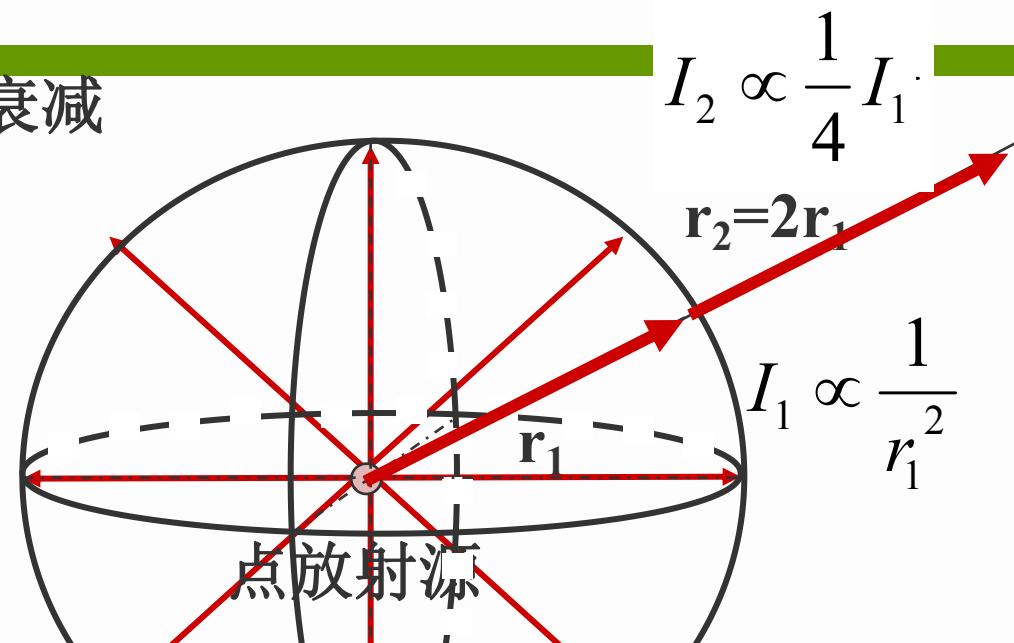
- ◆ 掌握连续X射线在物质中的减弱规律及影响诊断X线在人体中衰减吸收的主要因素
- ◆ 了解窄束X线及宽束X线的概念及其在介质中的衰减
- ◆ 能够根据X线在介质中的衰减规律，解释X线在医疗领域的应用



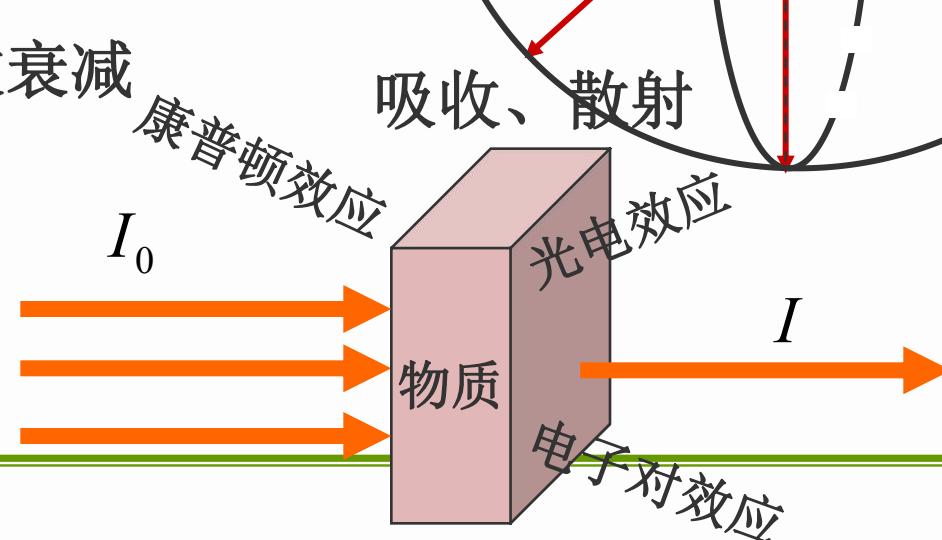
X(或 γ)射线在传播过程中强度的衰减

1. 距离所致衰减——扩散衰减

以点源为球心，半径不同的各球面上的射线强度，与距离(即半径)的平方成反比，这一规律称为射线强度衰减的平方反比法则



2. 物质所致衰减





第一节 单能X线在物质中的衰减规律

单能射线：由能量相同的光子组成的X线，
具有单一的波长或频率

单能射线的吸收衰减

一、窄束X线在物质中的衰减规律

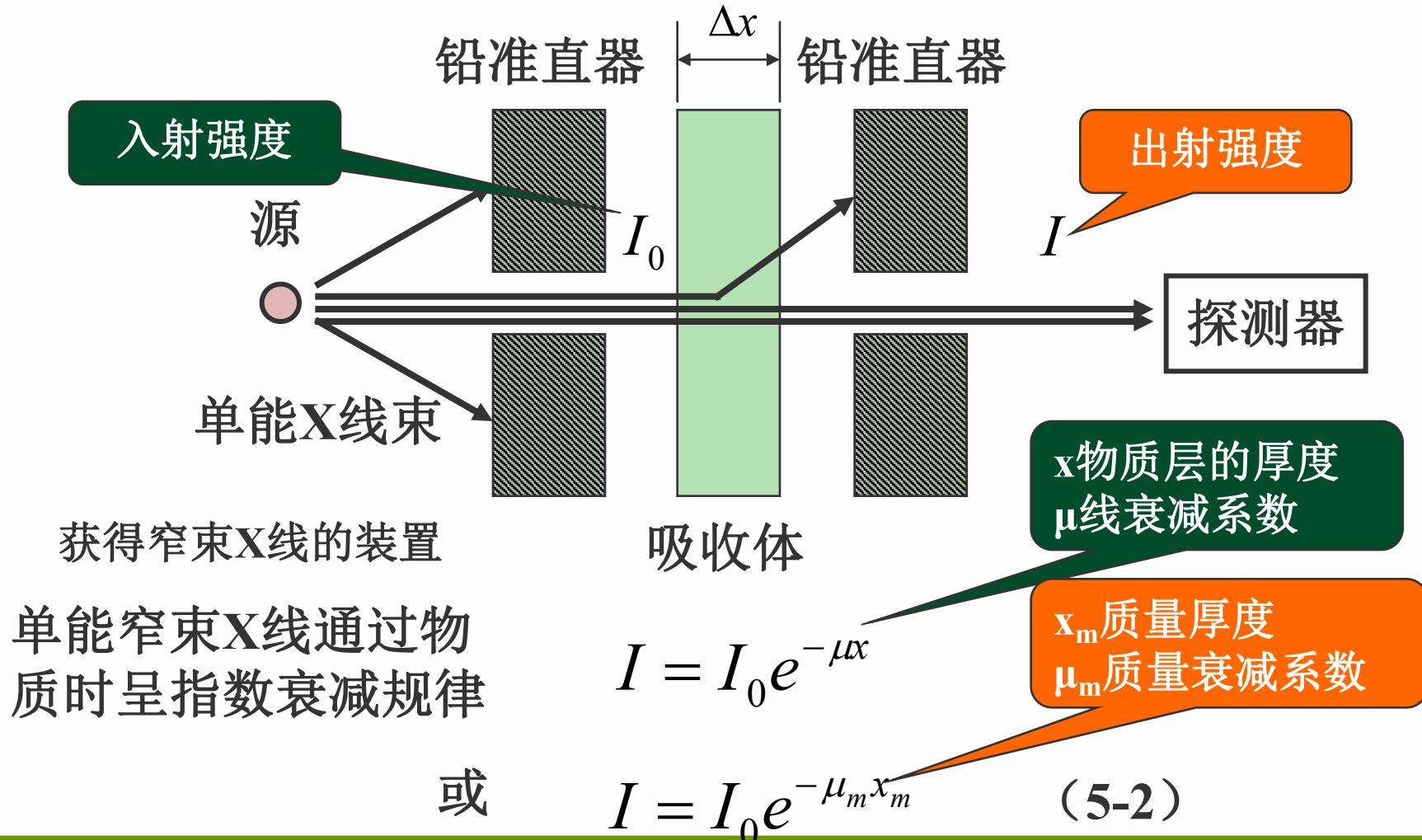
(一) 窄束X线概念

窄束是指所包括的散射线成份很少的辐射束
射线束中不存在散射成份



第一节 单能X线在物质中的衰减规律

(二) 窄束X线的衰减规律

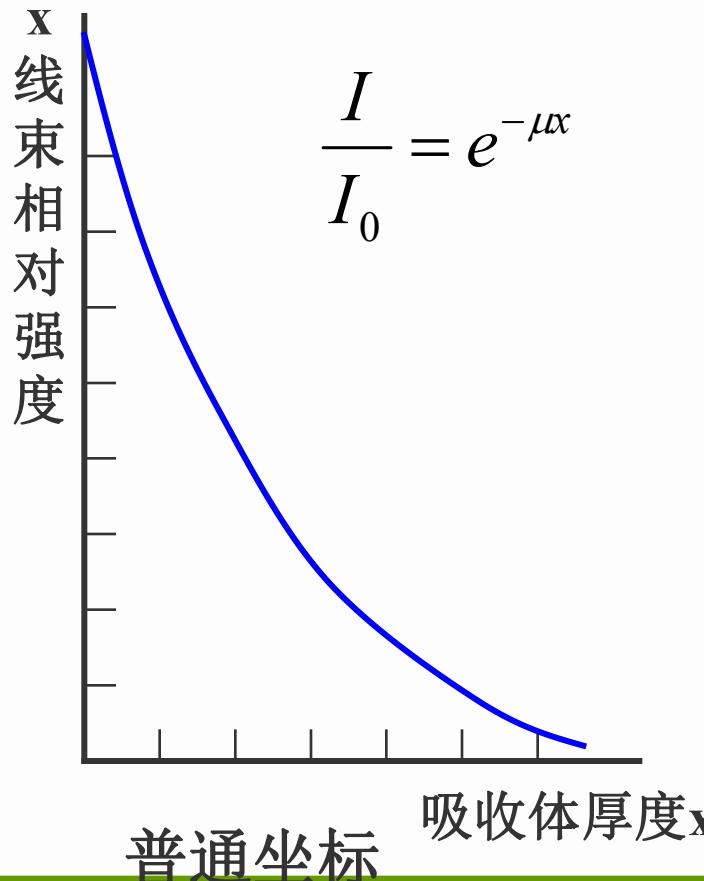




第一节 单能X线在物质中的衰减规律

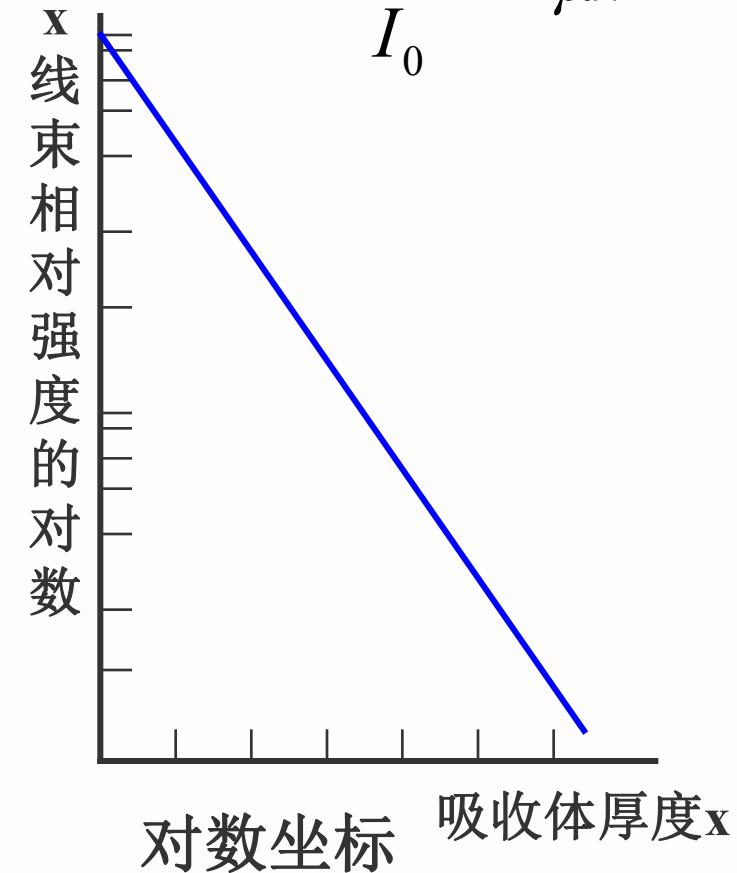
单能窄束X线通过物质时呈指数衰减规律

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



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

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\mu x$$



单能窄束X线和衰减曲线

影像技术专业



第一节 单能X线在物质中的衰减规律

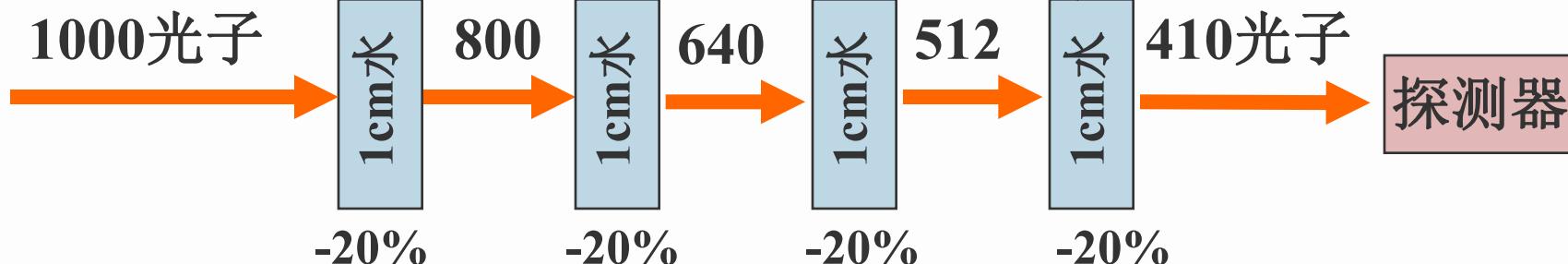
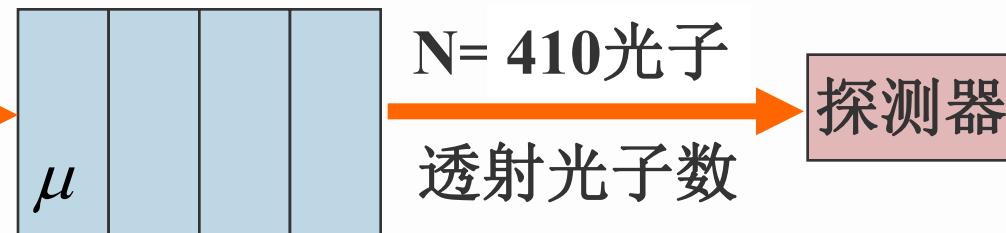
单能窄束X线的指数衰减规律

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (5-3)$$

设 $\mu = 0.2 \text{ cm}^{-1}$

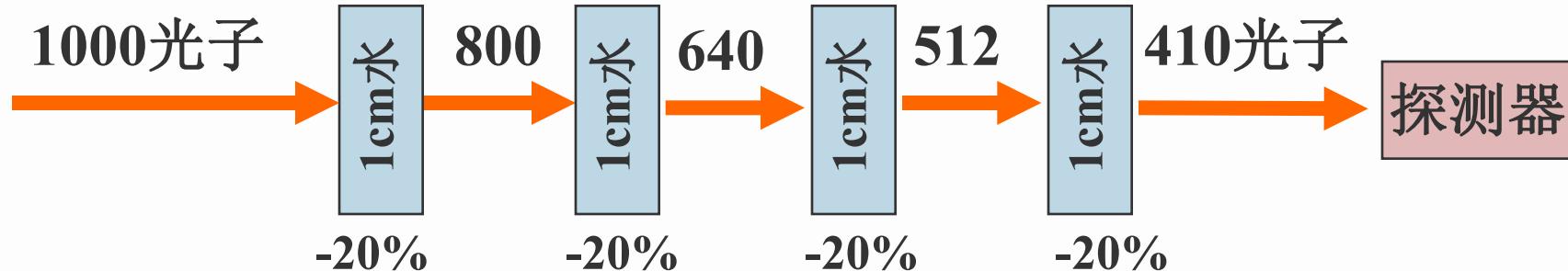
1cm水模型
(1cm × 4)

$N_0 = 1000 \text{ 光子}$
入射光子数





第一节 单能X线在物质中的衰减规律



结论 单能窄束X线在通过物质时只有光子个数的减少，而无光子能量的变化

其指数减弱规律就是射线强度在物质层中都以相同的比率衰减 按等比衰减永远也不会为零

很厚的吸收物质层，仍可能有一定强度的射线透过
不可能完全被吸收



第一节 单能X线在物质中的衰减规律

二、宽束X线在物质中的衰减规律

(一) 宽束X线概念

宽束X线是指含有散射线成份的X线束

窄束与宽束的区别就在于是否考虑了散射线的影响

(二) 积累因子 材料的屏蔽效果，安全防护设计

在物质中所考虑的那一点的光子总计数与未经碰撞原射线光子计数率之比，用B表示

$$B = \frac{N}{N_n} = \frac{N_n + N_s}{N_n} = 1 + \frac{N_s}{N_n} \quad (5-4)$$



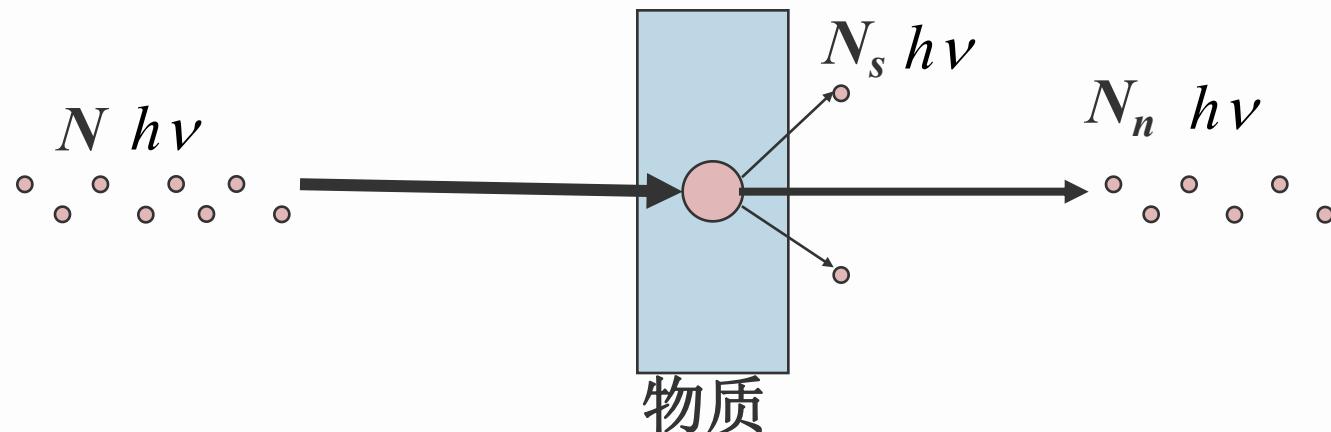
第一节 单能X线在物质中的衰减规律

$$B = \frac{N}{N_n} = \frac{N_n + N_s}{N_n} = 1 + \frac{N_s}{N_n} \quad (5-4)$$

式中： N_n 为物质中所考虑的那一点的未经碰撞的原射线光子的计数率

N_s 为物质中所考虑的那一点的散射光子的计数率

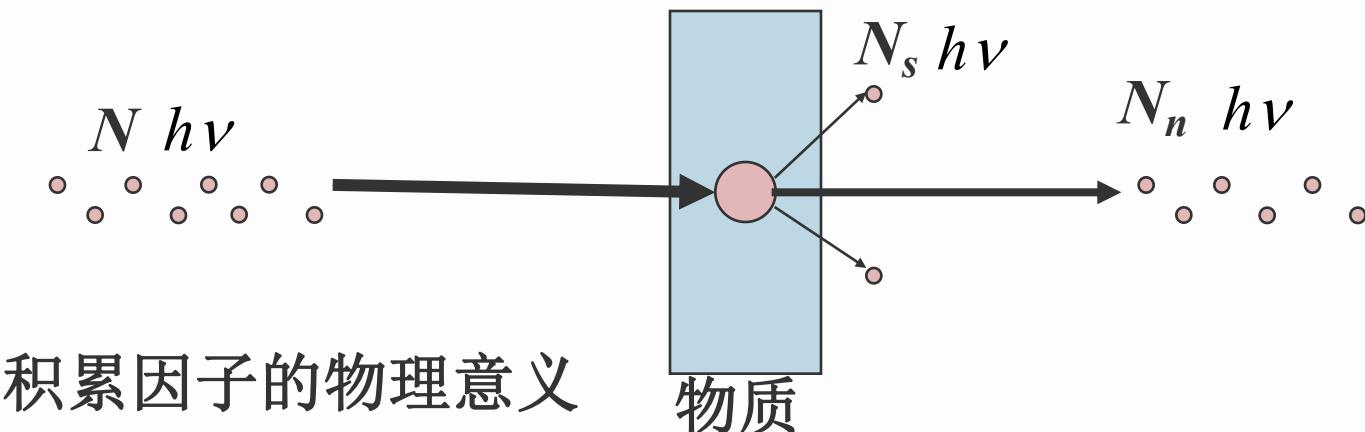
N 为物质中所考虑的那一点的光子的总计数率 $N=N_n+N_s$





第一节 单能X线在物质中的衰减规律

$$B = \frac{N}{N_n} = \frac{N_n + N_s}{N_n} = 1 + \frac{N_s}{N_n} \quad (5-4)$$



B 的大小反映了在考虑的那一点散射光子数对总光子数的贡献

对宽束而言， $B > 1$ ；在理想窄束条件下， $N_s=0, B=1$

描述散射光子影响的物理量，它反映了宽束与窄束的区别



第一节 单能X线在物质中的衰减规律

（三）宽束X线的衰减规律

欲较准确地用来计算屏蔽体的厚度，可在窄束X线的指数衰减规律上引入积累因子 B 加以修正

$$I = BI_0 e^{-\mu x} \quad (5-5)$$

积累因子近似计算法

$$B = 1 + \mu x \quad (5-6)$$

式中： μ 为线衰减系数
 x 为吸收物质的厚度



第二节 连续X线在物质中的衰减规律

窄束和宽束X线的指数衰减规律只是对单能的X线而言
一般情况下，X线束是由能量连续分布的光子组成，当穿过一定厚度的物质层时，各能量成分衰减的情况并不一样，并不遵守单一的指数衰减规律

一、连续X线在物质中的衰减特点

连续能谱窄束X线的衰减

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n$$

$$I = I_{01}e^{-\mu_1 x} + I_{02}e^{-\mu_2 x} + \cdots + I_{0n}e^{-\mu_n x} \quad (5-7)$$

式中： I_1, I_2, \dots, I_n 为各种能量X线束的透过强度

$I_{01}, I_{02}, \dots, I_{0n}$ 为各种能量X线束的入射强度

$\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ 为线衰减系数， x 为吸收物质的厚度



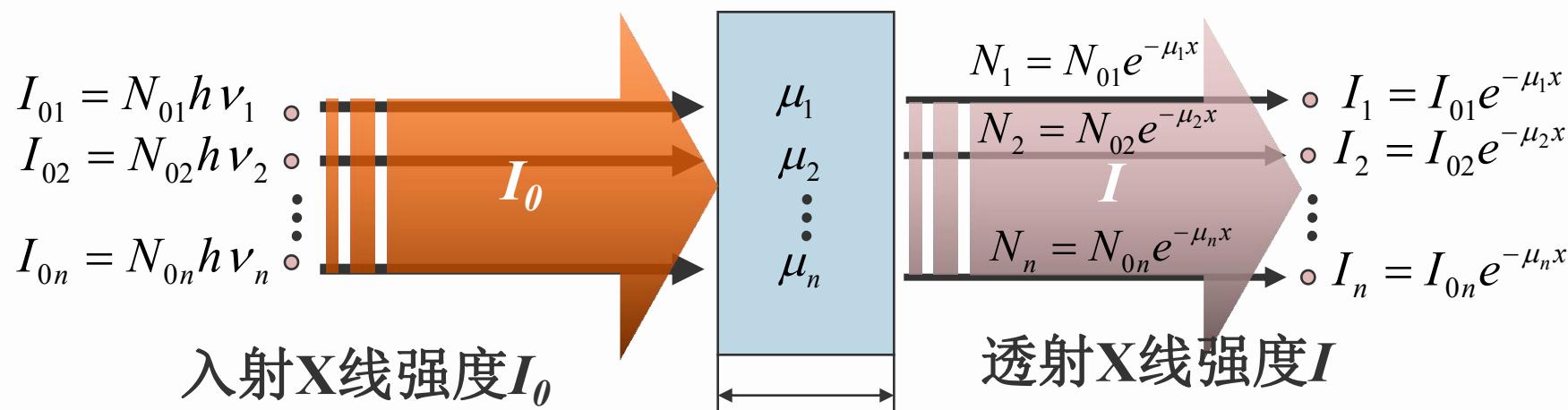
第二节 连续X线在物质中的衰减规律

连续能谱窄束X线的衰减 特点：X线强度变小(量减小)

硬度变大(质提高)

$$I = I_1 + I_2 + \cdots + I_n$$

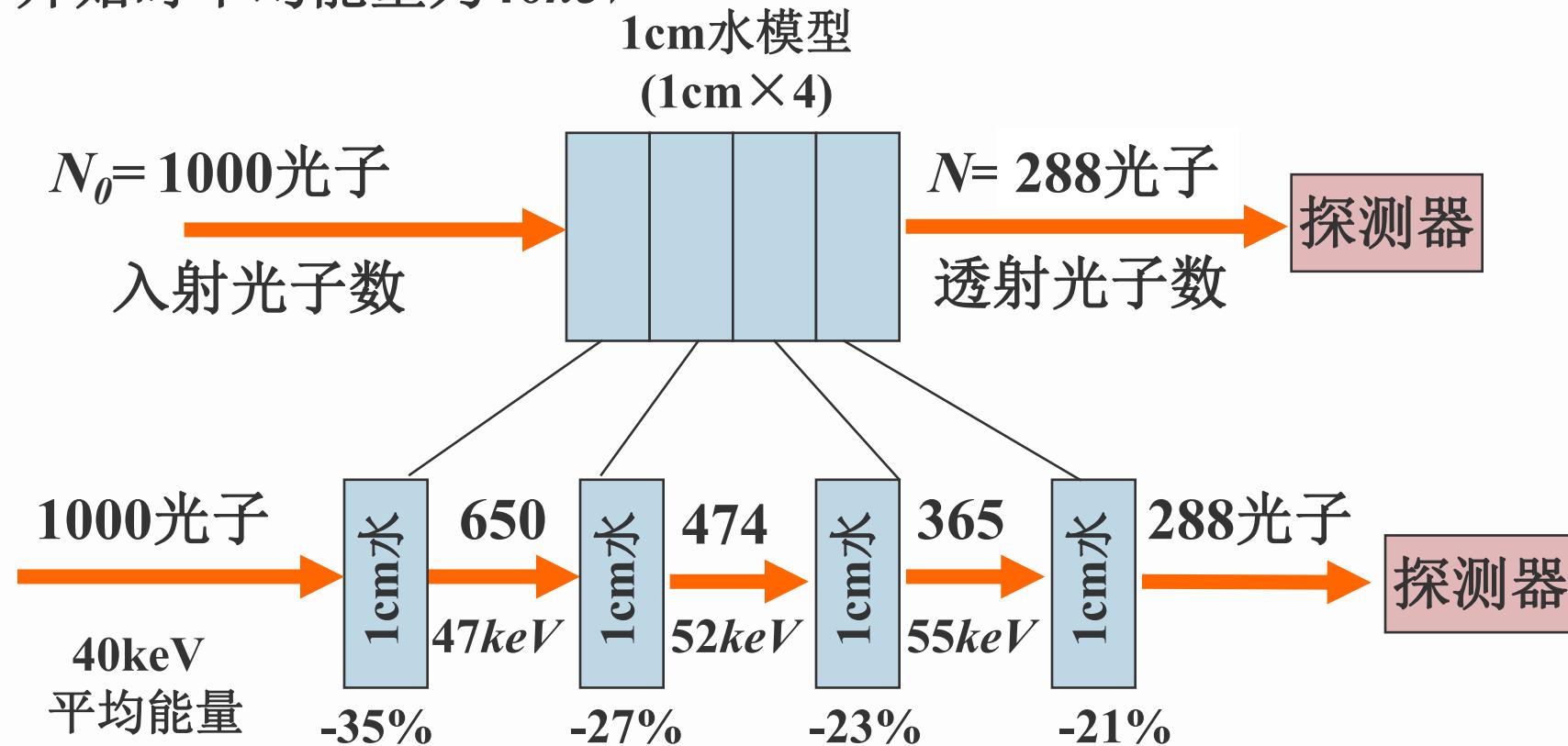
$$I = I_{01}e^{-\mu_1 x} + I_{02}e^{-\mu_2 x} + \cdots + I_{0n}e^{-\mu_n x} \quad (5-7)$$





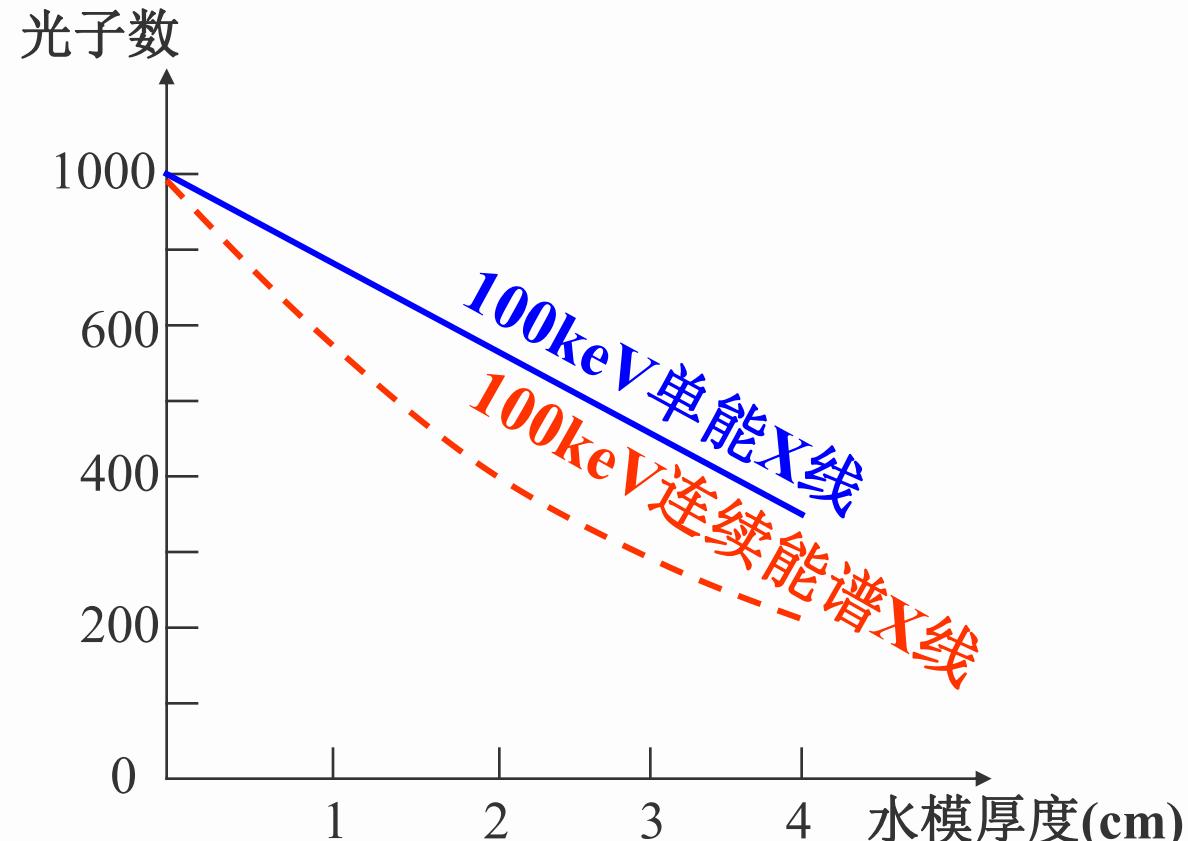
连续X线在物质中的衰减规律

设最高能量为 $(h\nu)_{\max} = 100keV$ 的连续X线束，
开始时平均能量为 $40keV$





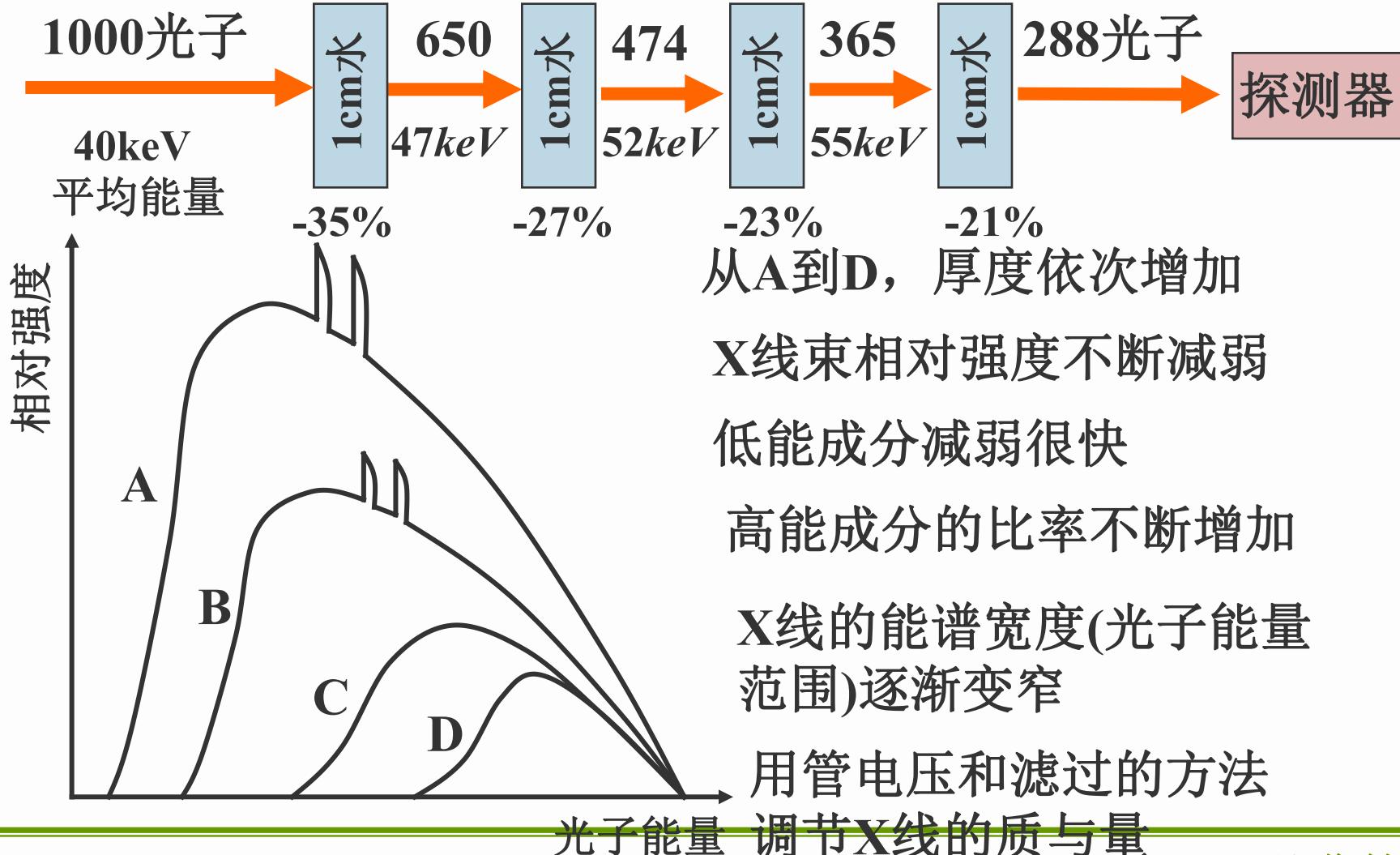
第二节 连续X线在物质中的衰减规律



与相同条件下的单能X线相比
连续能谱X线有更大的衰减



第二节 连续X线在物质中的衰减规律





第二节 连续X线在物质中的衰减规律

二、影响X线衰减的因素

$\left\{ \begin{array}{l} \text{X线本身的性质} \\ \text{吸收物质的性质} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{原子序数Z} \\ \text{物质的密度}\rho \\ \text{每克物质含的电子数 } \frac{N_0}{A} Z \end{array} \right.$



第二节 连续X线在物质中的衰减规律

(一) 射线性质对衰减的影响

通过10cm的水单能窄束X线透过百分比

| 能量(keV) | 透过百分数(%) | 能量(keV) | 透过百分数(%) |
|---------|----------|---------|----------|
| 20 | 0.04 | 60 | 13.0 |
| 30 | 2.5 | 80 | 16.0 |
| 40 | 7.0 | 100 | 18.0 |
| 50 | 10.0 | 150 | 22.0 |

射线能量越高，衰减越少



第二节 连续X线在物质中的衰减规律

(二) 物质原子序数对衰减的影响

原子序数愈高的物质，吸收X线也愈多

(三) 物质密度对衰减的影响

X线的衰减与物质密度成正比关系

密度 ↑ → 单位体积内的
原子、电子数 ↑ → 相互作用的几率 ↑

(四) 每克电子数对衰减的影响

X线的衰减与一定厚度的电子数有关

每克电子数 ↑ → X线衰减 ↑



第二节 连续X线在物质中的衰减规律

三、X线的滤过

1.为什么要滤过?

2.定义:

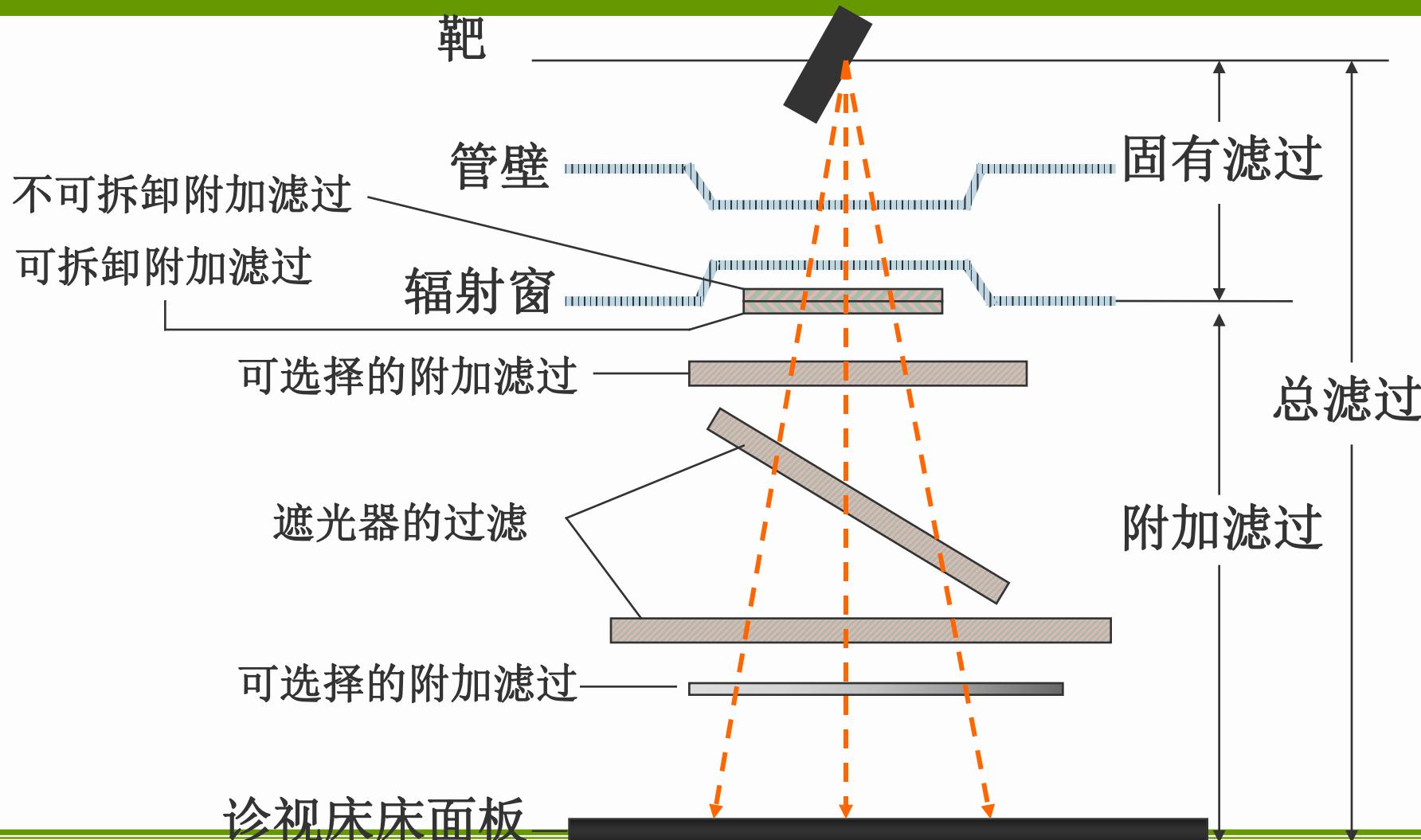
在X线管出口放置一定均匀厚度的金属，预先把X线束的低能成分吸收掉，将X线的平均能量提高，这种过程就是所谓滤过，所用的金属片叫滤过板

3.滤过的分类

{ 固有滤过
附加滤过



第二节 连续X线在物质中的衰减规律





第二节 连续X线在物质中的衰减规律

(一) 固有滤过

X线管组装体本身的滤过

玻璃管壁
绝缘油
管套上的窗口
不可拆卸的滤过板

用铝当量表示

铝当量(mmAl)是指一定厚度的铝板与其他滤过材料相比较具有相同的衰减效果，则此铝板厚度(mm)就是该滤过材料的铝当量

一般诊断用X线机的固有滤过 $0.5\sim2\text{mmAl}$



第二节 连续X线在物质中的衰减规律

(二) 附加滤过

附加滤过 { 可拆卸的附加滤过板
可选择的附加滤过板
遮光器中的反光镜
有机玻璃窗的滤过

1. 滤过板的选择

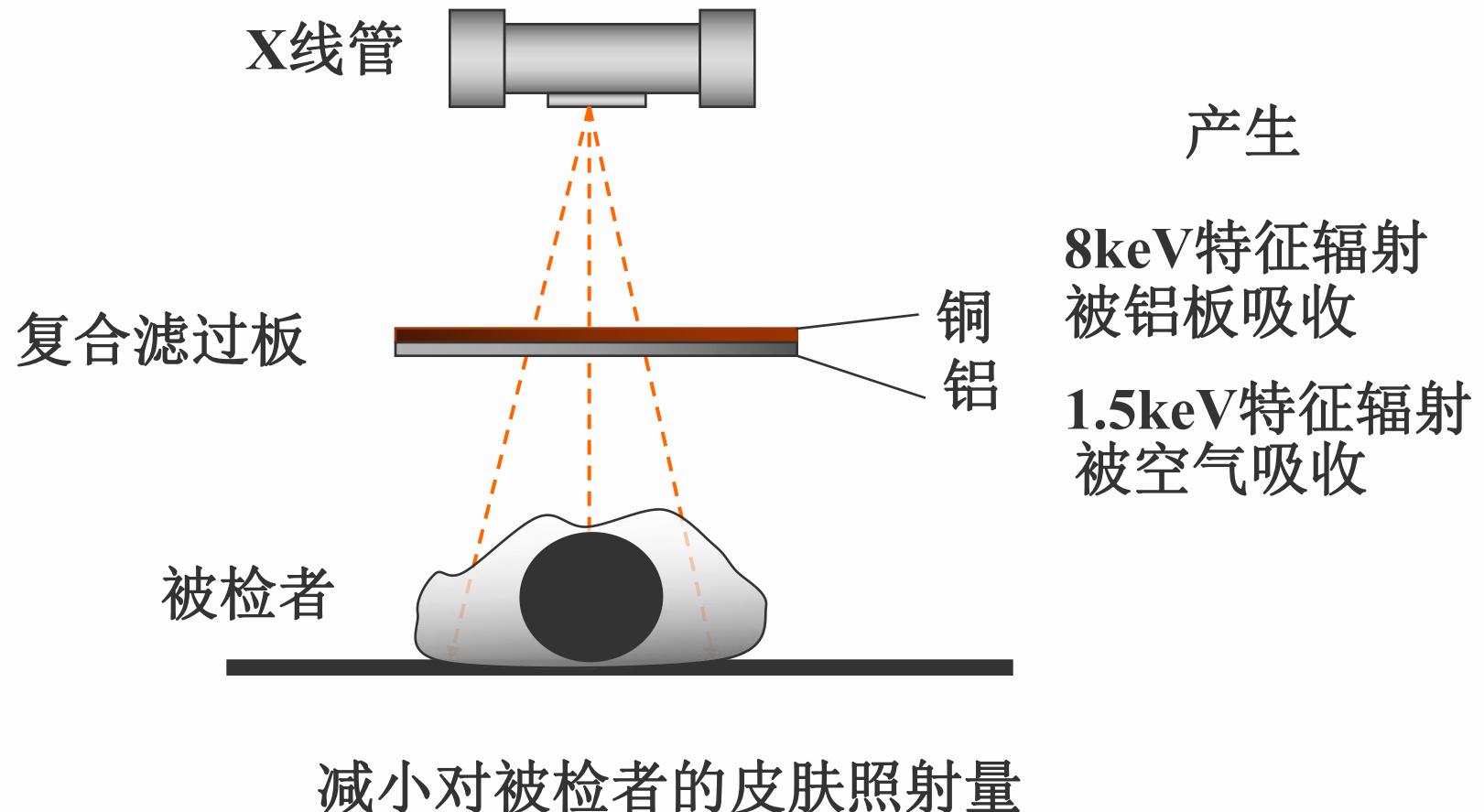
X线诊断中 { 铝 $Al(Z=13)$, 对低能射线有很好的滤过
铜 $Cu(Z=29)$, 对高能射线有很好的滤过

注意 高原子序数物质不能单独作滤过板使用应从X线管窗口由里向外，按滤过板的原子序数由高到低依次排列，组成复合滤过板使用

为什么要这样？



第二节 连续X线在物质中的衰减规律





第二节 连续X线在物质中的衰减规律

2. 滤过板的厚度

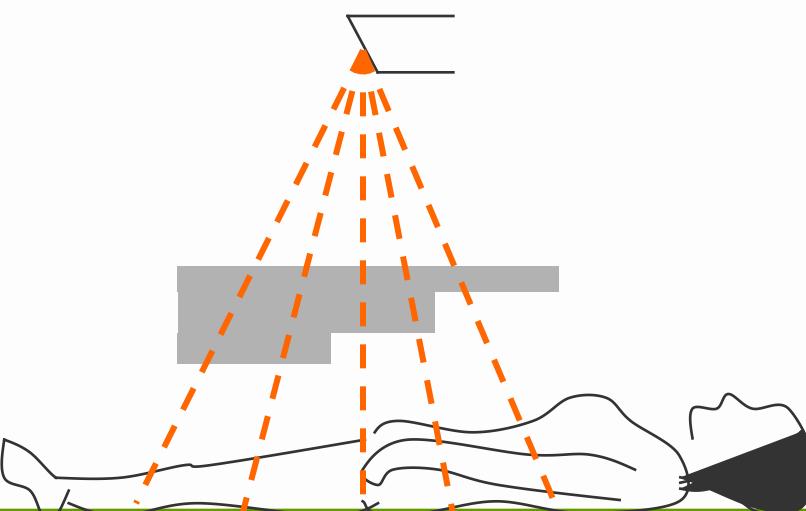
随着滤过板厚度的增加，低能射线迅速衰减，
但高能射线衰减缓慢

3. 滤过板的厚度对受照剂量的影响

厚滤过技术可降低对受检者的照射剂量

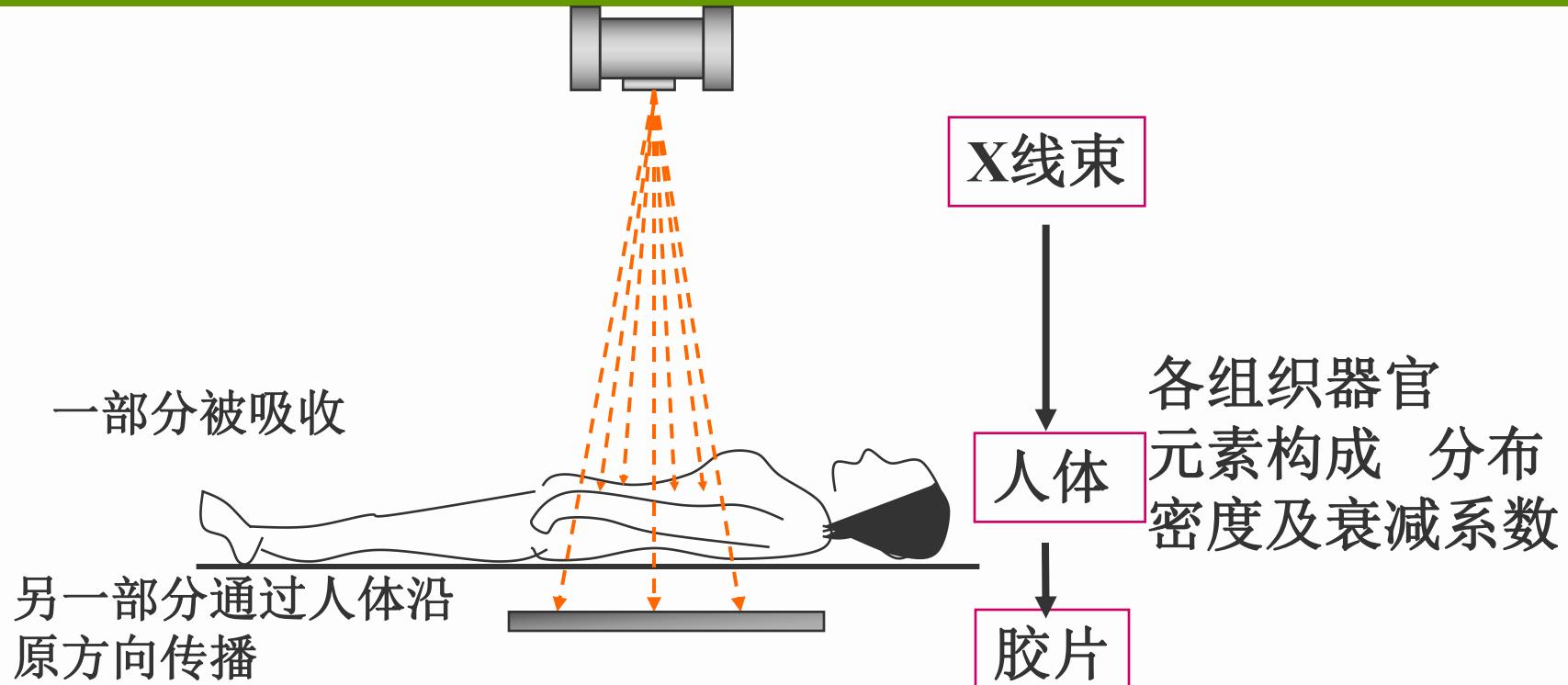
4. 滤过与投照时间

5. 楔形或梯形滤过板





第三节 诊断放射学中X线的衰减



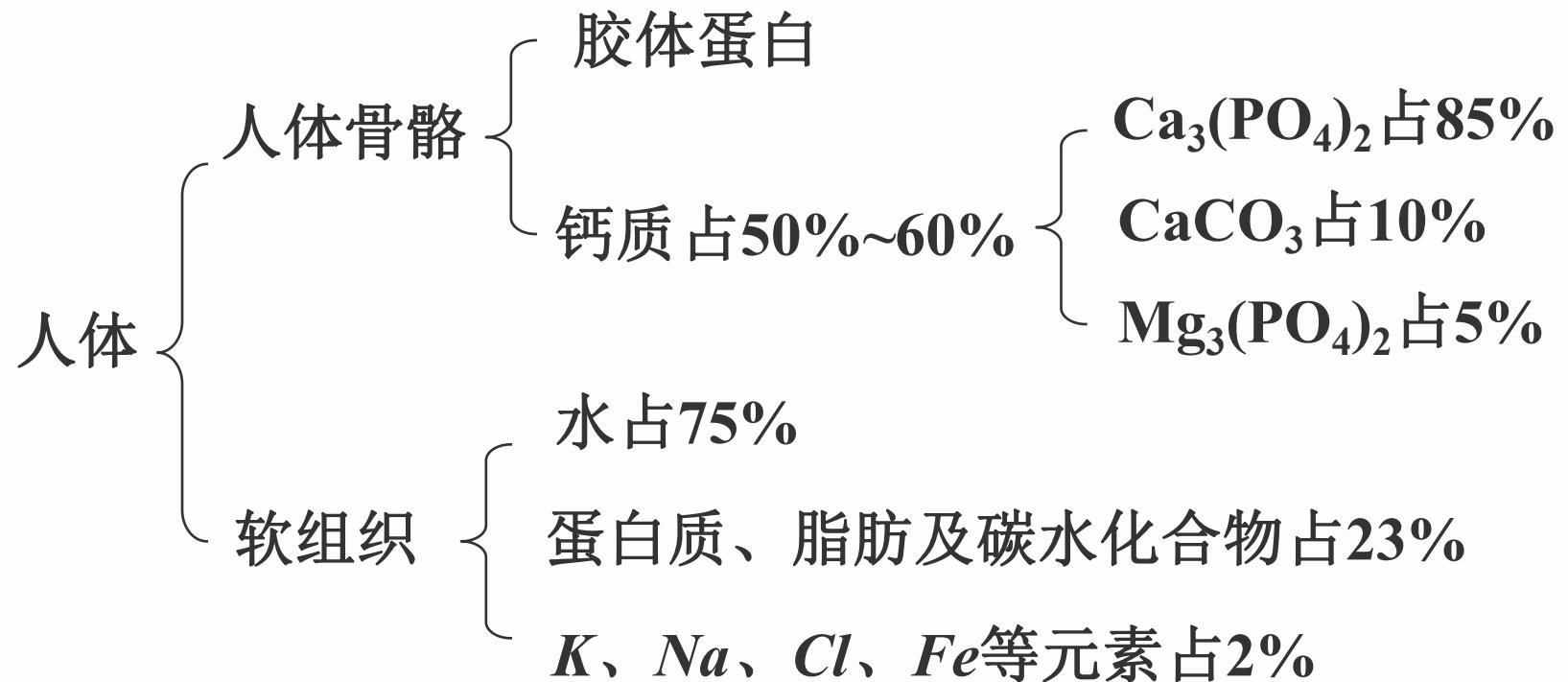
透过的X光子按特定形式分布
形成X线影像

是人体的不同组织对X射线不同衰减的结果



第三节 诊断放射学中X线的衰减

一、人体的构成元素和组织密度





第三节 诊断放射学中X线的衰减

有效原子序数 (\bar{Z})

在相同照射条件下，1kg复杂物质与1kg单质物质所吸收的辐射能相同时，则此单质的原子序数 (Z) 就称为复杂物质的有效原子序数 (\bar{Z})

$$\bar{Z} = \left(\sum a_i Z_i^{2.94} \right)^{\frac{1}{2.94}} \quad (5-8)$$

式中： a_i 为第 i 种元素在单位体积中电子数占有比率

Z_i 为第 i 种元素的原子序数

近似计算公式

$$\bar{Z} = \left(\frac{a_1 Z_1^4 + a_2 Z_2^4 + \cdots + a_n Z_n^4}{a_1 Z_1 + a_2 Z_2 + \cdots + a_n Z_n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5-9)$$



第三节 诊断放射学中X线的衰减

二、X线通过人体的衰减规律 单能宽束X线的指数减弱规律

$$\mu = K\lambda^3 \bar{Z}^4 \rho \quad (5-9)$$

式中： μ 为被检体的线衰减系数
 λ 为 X 光子的波长 ρ 为组织密度
 \bar{Z} 为有效原子序数 K 为一比例常数



第四节 X线的临床应用

一、常规X线摄影技术

二、数字化X线成像技术

(一)计算机X线摄影CR
(二)直接数字化X线摄影系统DR
(三)数字减影DSA

三、介入放射技术

四、计算机断层成像技术X-CT

五、利用X线的肿瘤放射治疗技术