



# 射线检测

## 第一章 射线检测的物理基础



## 1.3 射线与物质的相互作用

### 1.3.1~ 1.3.5 各种相互作用、及其相对概率

### 1.3.6 窄束、单色射线的强度衰减规律

### 1.3.7 宽束、多色射线的强度衰减规律

## 1.3 射线与物质的相互作用

X射线和 $\gamma$ 射线在穿透物质的过程中会与物质发生相互作用，而使射线强度衰减，衰减情况与所穿透物质的厚度、性质以及射线本身性质有关。

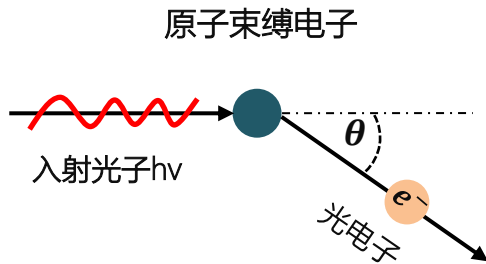
射线与物质作用主要形式有：

- 光电效应
- 康普顿效应
- 电子对效应
- 瑞利散射

### 1.3.1 光电效应

**光电效应：**光子与物质原子的束缚电子作用，光子把全部能量转移给这个束缚电子，使其发射出去（光电子），而光子本身消失。

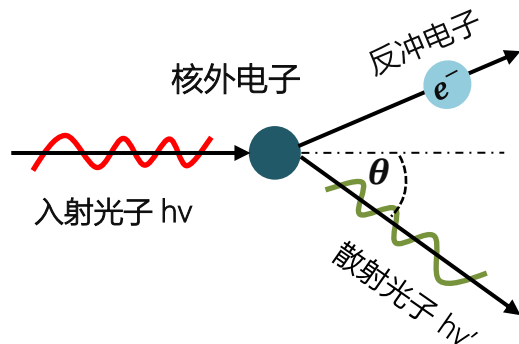
**结果：** 入射光子能量被全部吸收，光子消失。



## 1.3.2 康普顿效应

**康普顿效应（康普顿散射）**：是入射光子与原子的核外电子之间发生非弹性碰撞，入射光子的一部分能量转移给电子，使它脱离原子束缚成为反冲电子，而光子的运动方向和能量发生变化。

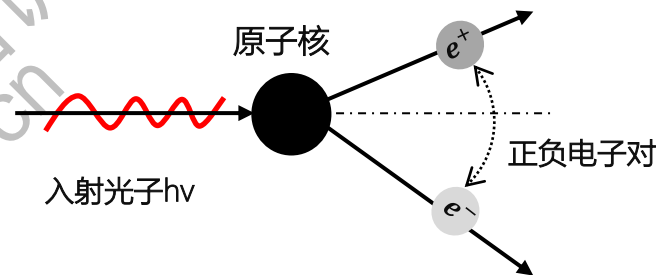
**结果：**光子能量改变，方向改变，光子散射。



### 1.3.3 电子对效应

**电子对效应：**当光子从原子核旁经过时，在原子核的库仑场作用下，光子转化为1正电子和1负电子。

**结果：**入射光子能量全部吸收，光子消失。

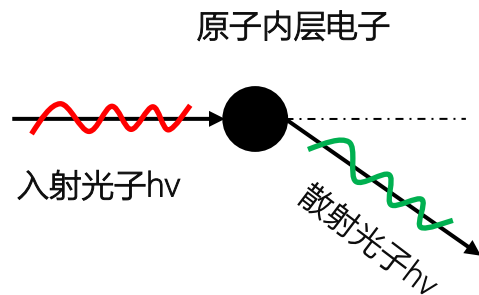


### 1.3.4 瑞利散射

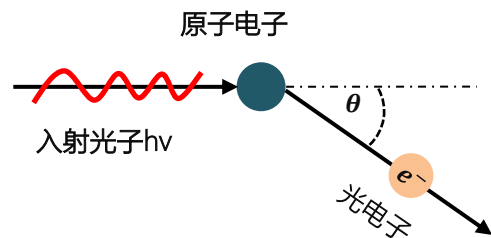
**瑞利散射：**是入射光子和束缚较牢的内层轨道电子发生的弹性散射过程；

**结果：**光子保留全部能量，方向改变，光子散射。

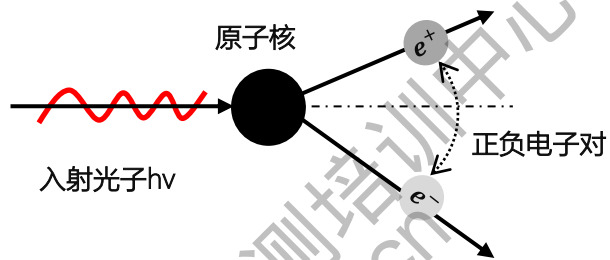
当入射光子能量在200KeV以下时，瑞利散射的影响不可忽略。



### 1.3.4 瑞利散射

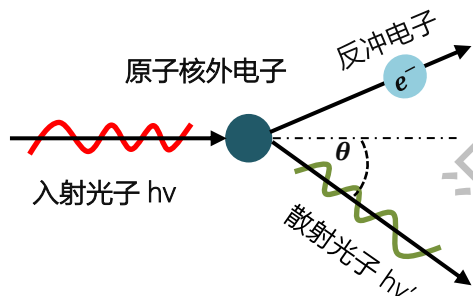


光电效应

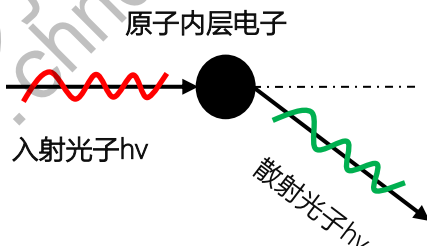


电子对效应

- ✓ 光子被吸收
- ✓ 提高射线照相对比度



康普顿效应



瑞利散射

- × 光子被散射
- × 降低射线照相对比度

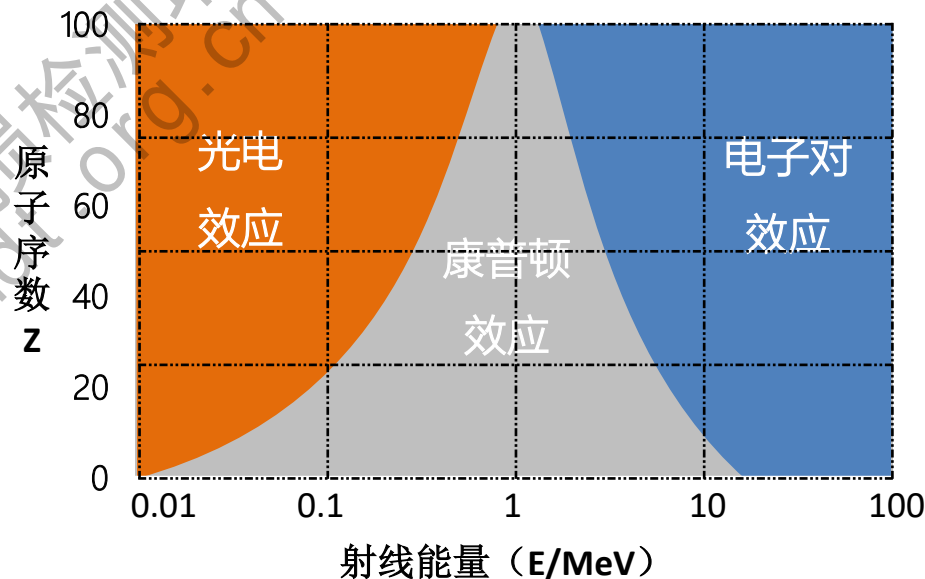


### 1.3.5 各种相互作用发生的相对概率

光电效应、康普顿效应和电子对效应的概率与原子序数 $Z$ 和入射光子能量有相关。

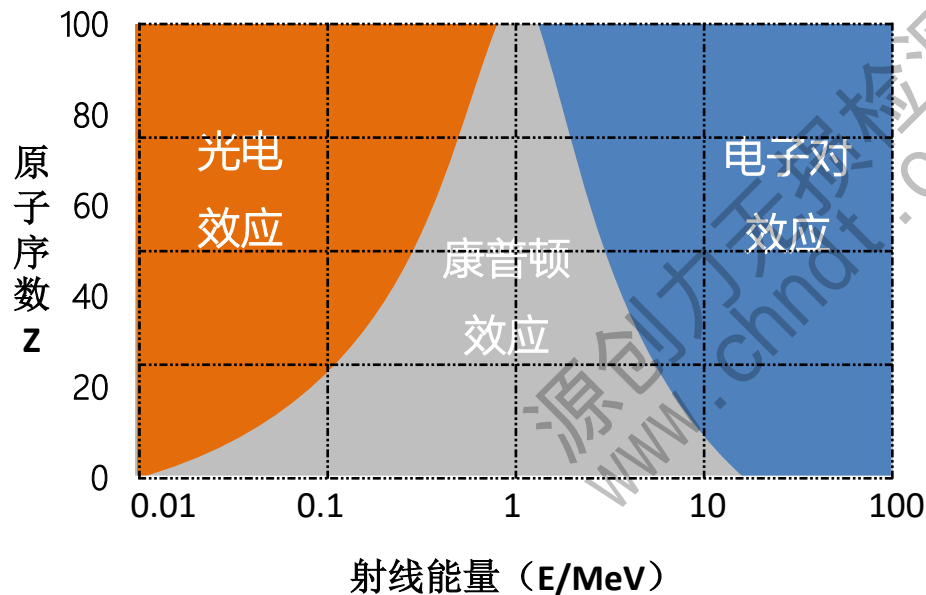
即：不同物质、不同能量区域，光电效应、康普顿效应和电子对效应相对比重不同。

- 低能量射线、原子序数高的物质，  
光电效应占优势；
- 中等能量射线、原子序数低的物质，  
康普顿效应占优势；
- 高能量射线、原子序数高的物质，  
电子对效应占优势。



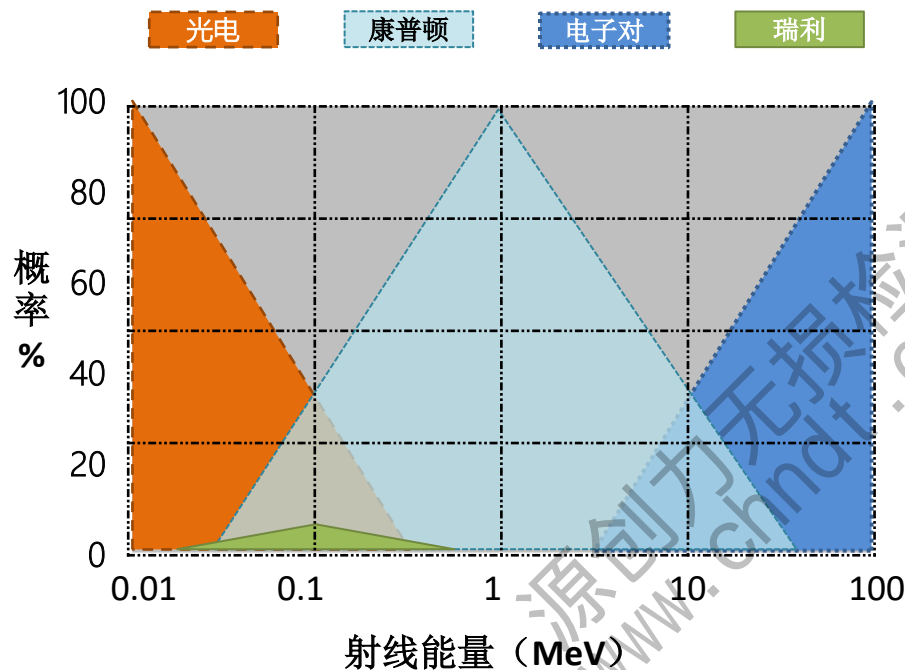
### 1.3.5 各种相互作用发生的相对概率

- 光电效应、电子对效应：光子被吸收，提高射线照相对比度；
- 康普顿效应：光子被散射，降低射线照相对比度。



- 轻金属材料照相质量往往比重金属材料照相质量差；
  - 使用1MeV左右能量射线照相，其对比度往往不如较低能量或更高能量射线；
- 这些都是**康普顿效应**影响所致。

### 1.3.5 各种相互作用发生的相对概率

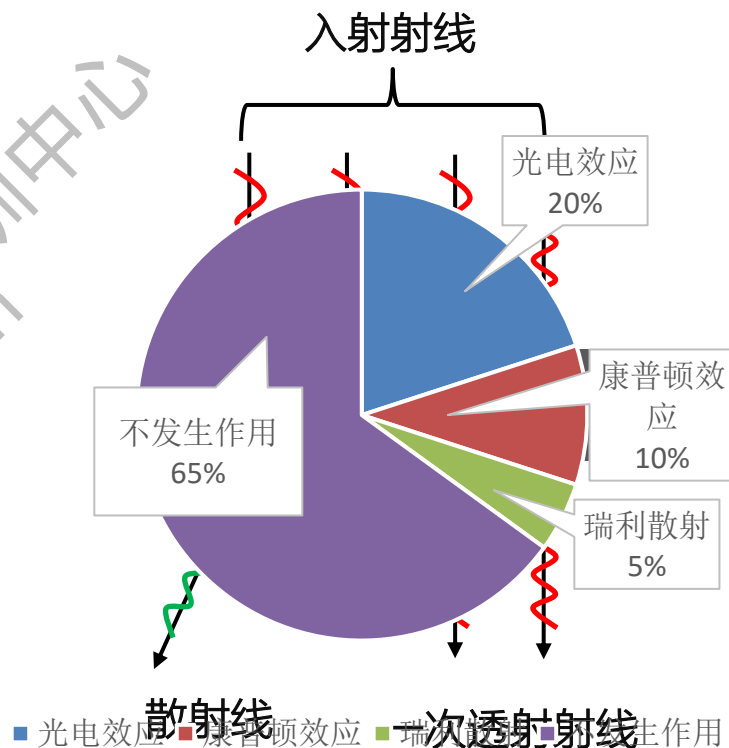


铁 ( $Z=26$ ) 中各种效应发生的概率

- 当能量为10KeV时, 光电 占绝对优势;
- 随着能量增大, 光电 逐渐减小, 康普顿 占比增大;
- 能量100Kev, 两种效应相等, 瑞利 在此能量附近发生概率达到最大, 但也不超过10%;
- 在1MeV左右, 射线强度衰减几乎都是 康普顿 造成的;
- 光子能量继续增大, 电子对 逐渐增大; 在10MeV左右, 电子对 与 康普顿 作用大致相等, 超过10MeV 电子对 越来越大。

### 1.3.6 窄束、单色射线的强度衰减规律

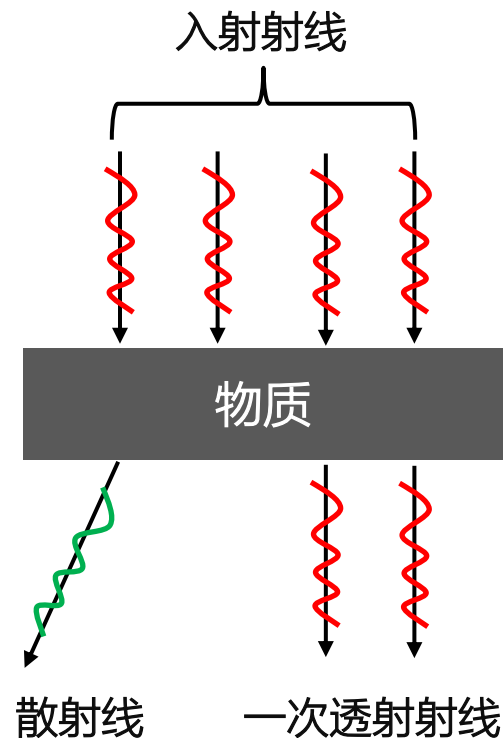
- ❑ 射线通过一定厚度物质时，有一部分光子与物质发生相互作用，有一部分则没有；
- ❑ 光子与物质发生光电效应和电子对效应，光子被吸收；
- ❑ 光子与物质发生康普顿效应，则光子被散射，散射光子也可能穿透物质，其能量和方向都发生变化，叫作散射线。
- ❑ 未与物质发生相互作用的光子，直接穿透物质，其能量和方向均未变化，叫作一次透射射线。



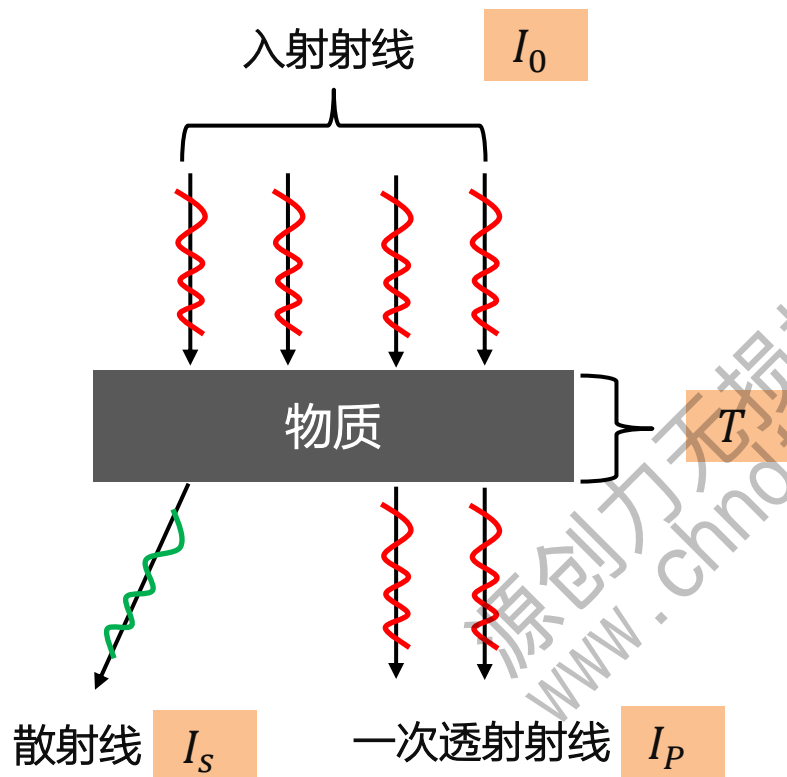
### 1.3.6 窄束、单色射线的强度衰减规律

**窄束射线**：指通过物质后的射线束，仅由未与物质发生相互作用的光子组成（一次透射射线），反之为宽束。  
即：只要没有散射线成分，便可称为“窄束”。

**单色射线**：指由单一波长电磁波组成的射线，或者说相同能量光子组成的射线，又称单能射线，反之为多色。



### 1.3.6 窄束、单色射线的强度衰减规律



$I_0$ : 射线初始强度或入射强度。

$T$ : 穿透物质的厚度

$I_s$ : 散射线强度

$I_p$ : 一次透射射线强度。

窄束单色：射线强度衰减公式：

$$I_p = I_0 e^{-\mu T}$$

$\mu$ : 线衰减系数

### 1.3.6 窄束、单色射线的强度衰减规律

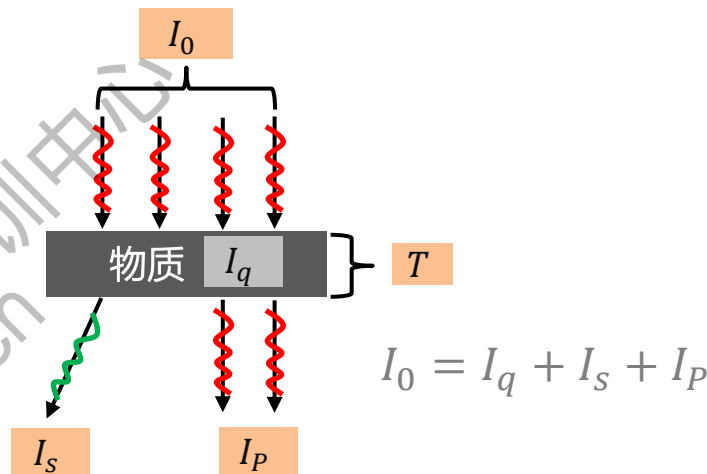
窄束单色：射线强度衰减公式：

$$I_P = I_0 e^{-\mu T}$$

$\mu$ ：线衰减系数

$$\frac{I_P}{I_0}$$

$\mu$



- $\mu$ ：意义是射线通过单位物质厚度时，与物质发生相互作用的概率  $I_q + I_S = \mu I_0 T$ ；
- 线衰减系数 $\mu$ ：与射线能量、物质的原子序数和密度有关，同一种物质，射线能量不同时线衰减系数不同；同一能量射线，通过不同物质时，线衰减系数也不同；
- 线衰减系数 $\mu$ ：一般与物质的密度 $\rho$ 成正比，与射线能量成反比；
- $\mu_m$ ：质量衰减系数， $=\mu/\rho$ ，质量衰减系数不受物质密度影响。

### 1.3.6 窄束、单色射线的强度衰减规律

几种材料的线衰减系数 ( $cm^{-1}$ )

射线能量 (MeV)	水	碳	铝	铁	铜	铅
0.25	0.121	0.26	0.29	0.80	0.91	2.7
0.5	0.095	0.20	0.22	0.665	0.70	1.8
1.0	0.069	0.15	0.16	0.469	0.50	0.8
1.5	0.058	0.12	0.132	0.370	0.41	0.58
2.0	0.050	0.10	0.016	0.313	0.35	0.524
3.0	0.041	0.083	0.100	0.270	0.295	0.482





### 1.3.6 窄束、单色射线的强度衰减规律

$$I_P = I_0 e^{-\mu T} \rightarrow \frac{I_P}{I_0} = e^{-\mu T} = \frac{1}{2} \rightarrow T = \frac{\log_e \frac{1}{2}}{-\mu} = \frac{0.693}{\mu}$$

- 入射射线强度减小一半的吸收物质厚度，称为**半价层**，用 $T_{1/2}$ 表示；
  - $T_{1/2}$ ，常被用来描述某种能量射线的穿透能力或衰减作用程度；
  - 对于同一种材料半价层越大，射线穿透能力越强，衰减程度则越小；
  - 也有1/10价层，1/20价层这样的描述。
- 
- 两种能量射线，钢中的半价层厚度分别是20mm和30mm，哪种射线穿透能力强？（30mm）
  - 同一种射线，第一种材料半价层为20mm，第二种材料半价层为30mm，哪种材料对射线衰减作用大？（20mm）

### 1.3.6 窄束、单色射线的强度衰减规律

例：已知某窄束单能射线穿过20mm钢后，强度减弱到原来的20%，求该射线在钢中的衰减系数。

$$\frac{I_P}{I_0} = e^{-\mu T}$$

已知：  $\frac{I_P}{I_0} = 0.2$        $T = 20\text{mm}$

则有：  $e^{-\mu \times 20} = 0.2$

求得：  $\mu = -\frac{\ln 0.2}{20} = 0.08/\text{mm} = 0.8/\text{cm}$

### 1.3.7 宽束、多色射线的强度衰减规律

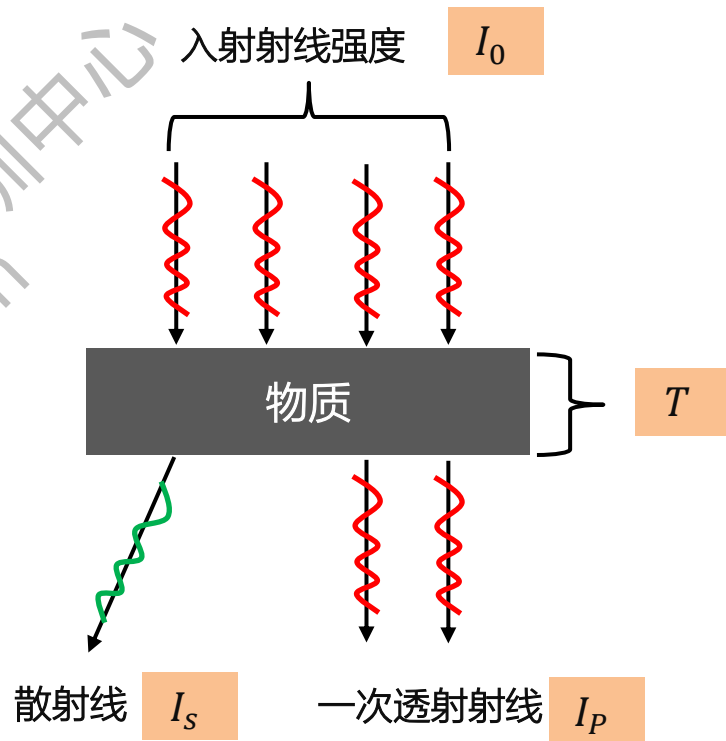
- ❑ 工业检测中应用的射线，不可能是“窄束、单色”射线，总是包含散射射线的成分，称为“宽束”射线。
- ❑ 射线中的光子往往也不具有相同能量，如常用的 $\gamma$ 射线是由几种、几十种能量光子的组合，即“多色”射线，X射线的波长更是连续变化的，称为“白色”射线。
- ❑ 宽束、多色射线通过物质时，强度衰减具有不同与前面窄束、单色射线特点。

### 1.3.7 宽束、多色射线的强度衰减规律

宽束单色：射线强度衰减公式：

$$I_P + I_S = I_P \left( 1 + \frac{I_S}{I_P} \right) = I_P (1 + n)$$

- $n = \frac{I_S}{I_P}$ ，称为**散射比**，散射线主要来自于康普顿效应；
- 散射比 $n$  大小与射线能量、穿透物质种类、穿透厚度等诸多因素有关。

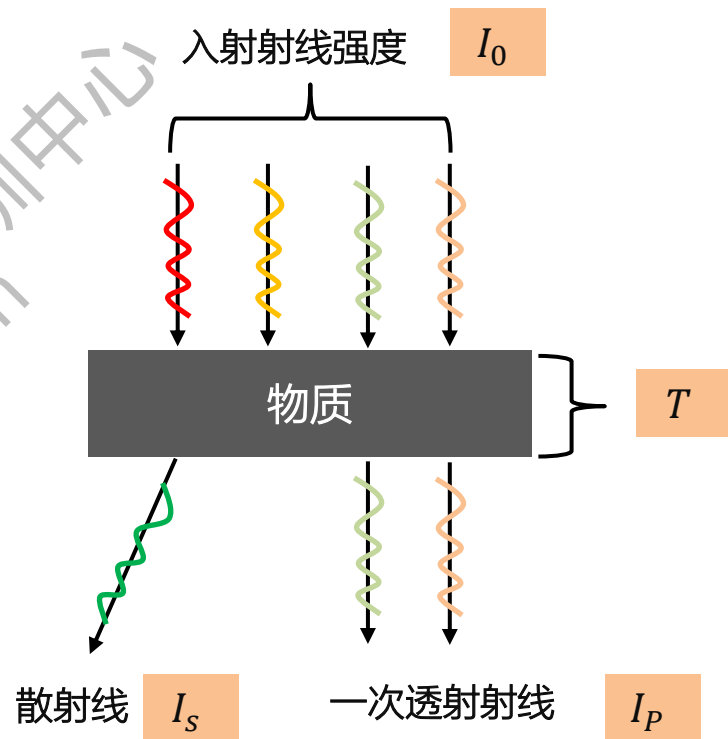


### 1.3.7 宽束、多色射线的强度衰减规律

多色窄束：射线强度衰减公式：

$$I_P = I_0 e^{-\bar{\mu}T}$$

$\bar{\mu}$ ：称为平均衰减系数，射线束中不同能量光子的平均衰减系数，可根据试验数据计算得出



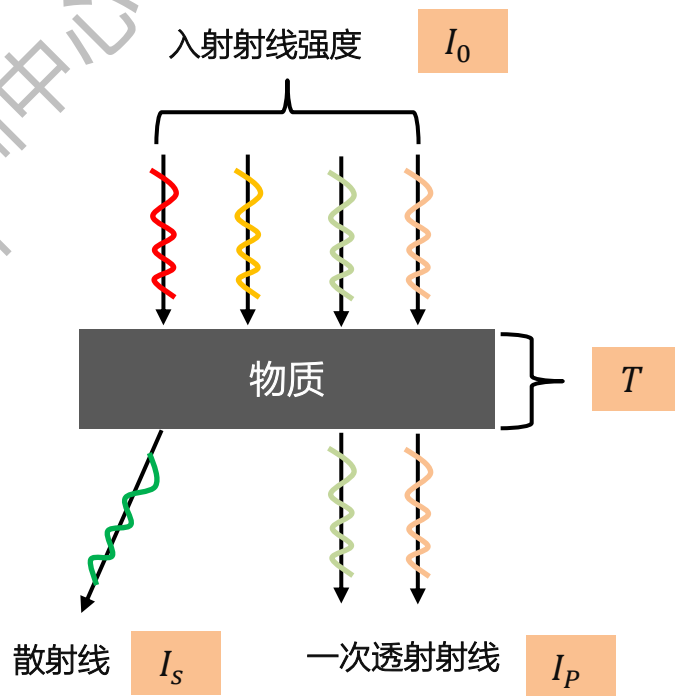
### 1.3.7 宽束、多色射线的强度衰减规律

宽束 单色:  $I = I_P + I_S = I_P \left(1 + \frac{I_S}{I_P}\right) = I_P(1 + n)$

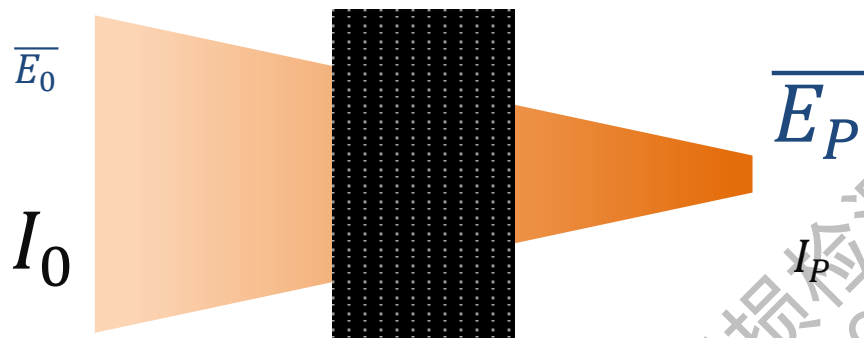
多色 窄束:  $I_P = I_0 e^{-\bar{\mu}T}$

宽束、多色射线强度衰减公式:

$$I = I_0 e^{-\bar{\mu}T} (1 + n)$$



### 1.3.7 宽束、多色射线的强度衰减规律



- **线质**：是对射线穿透物质能力的度量，穿透力较强的射线称为线质较硬，穿透力弱的射线称为线质较软。
- 对于单色射线，线质可用光子能量或波长定量表示；
- 对于多色射线，一般可用半价层、衰减系数或者有效能量来定量表示。

- 多色射线穿透物质过程中，能量较低的部分衰减快，这样透过射线的平均能量就高于初始射线的平均能量，这个过程也叫**线质硬化现象**。
- 多色射线随着穿透厚度增加，线质逐渐变硬，平均衰减系数 $\mu$ 数值逐渐变小，平均半价层  $T_{1/2}$ 逐渐增大。

## 射线的能量和强度

### 射线能量 (E)

单个粒子携带的能量 (大小)

波长、频率、eV、线质、半价层

决定了射线的穿透能力

X射线: 管电压 (KV)

γ射线: 放射性同位素的种类

### 射线强度 (I)

所有携带能量粒子的数量 (多少)

照射量、曝光量、底片黑度

决定了可透过射线的多少

X射线:  $I_0 = K_i Z i V^2$

γ射线: 放射性同位素的数量



## 能量和强度的关系

- 1、当X射线穿过三个半价层后，其**强度**剩下最初的 $1/8$ 。 ( ☒ )
- 2、当X射线穿过三个半价层后，其**能量**剩下最初的 $1/8$ 。 ( ☐ )
- 3、**X射线**穿透物质后，透射射线平均**能量**将增加。 ( ☒ )
- 4、 **$\gamma$ 射线**经过 $n$ 个半衰期后，它的射线**能量**不变。 ( ☒ )
- 5、连续X射线穿透厚工件时 ( ☒ )
  - A. 第二半价层小于第一半价层
  - B. 第二半价层等于第一半价层
  - C. 第二半价层大于第一半价层
  - D. 都有可能