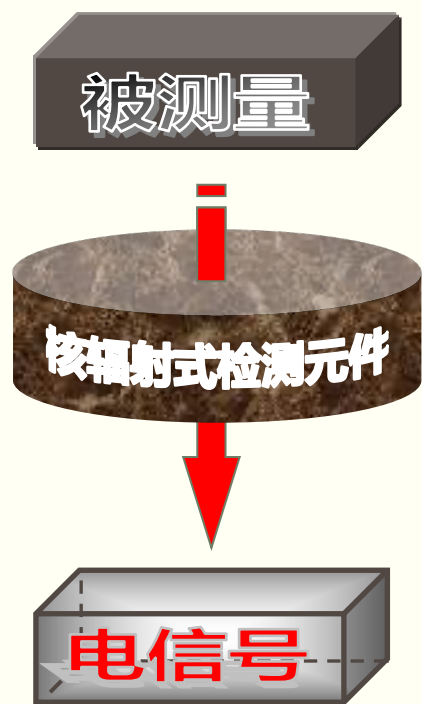




2.10 核辐射式检测元件

定义



利用被测物质对射线的**吸收**、**散射**、**反射**或射线对被测物质的**电离作用**

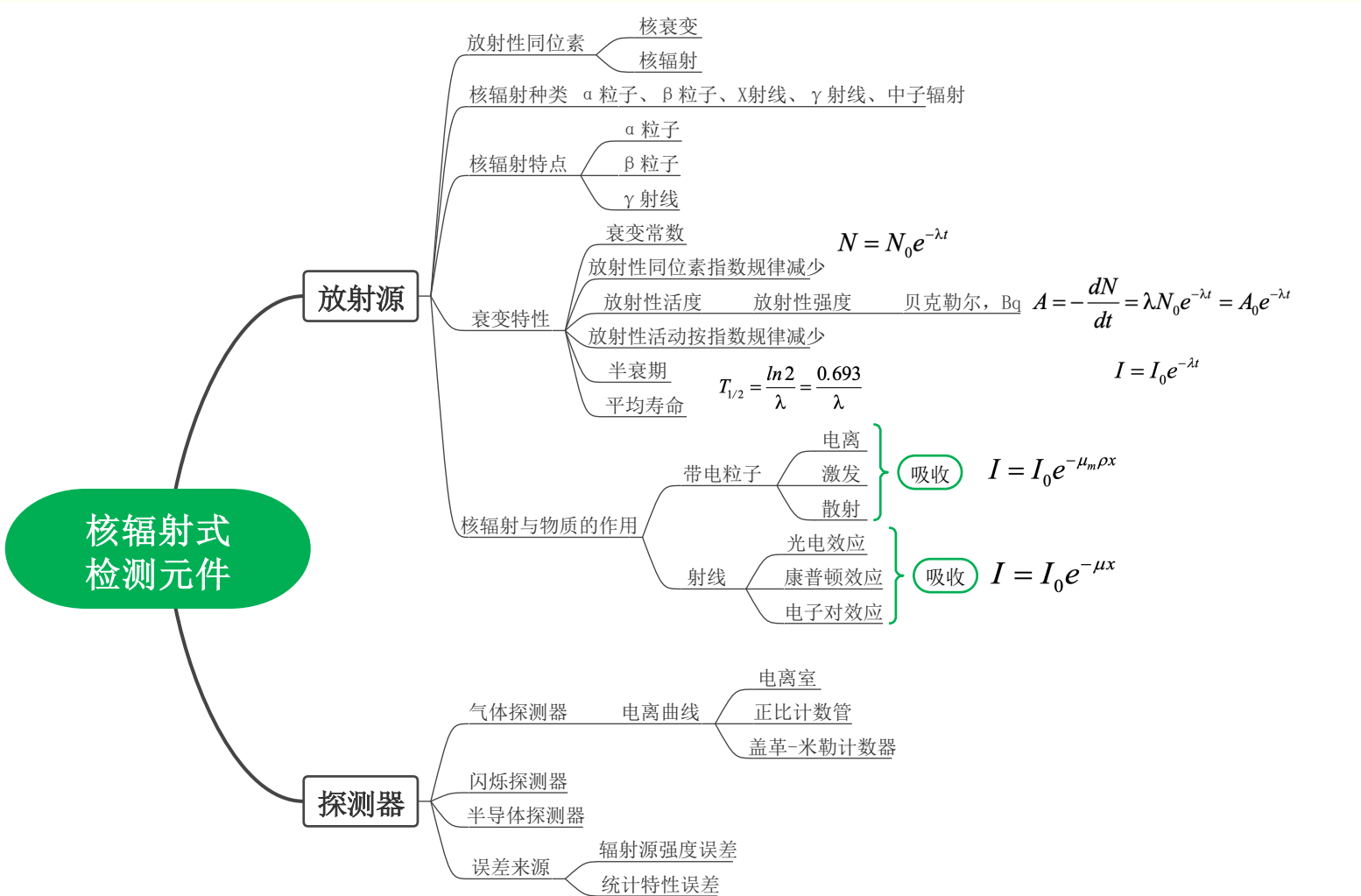
厚度 **物位** **密度** **成分** **金属探伤**

优点： **非接触式测量**，适合于腐蚀、高温、剧毒、爆炸性等恶劣环境

核辐射式检测元件的组成：

放射源、**探测器**、**转换电路**

知识要点



1、放射源

放射性同位素

质子数目相同，但中子数目不同

protons + neutrons	10	11	12	13	14
Atomic number = protons	${}^6_6\text{C},$	${}^6_6\text{C},$	${}^6_6\text{C},$	${}^6_6\text{C},$	${}^6_6\text{C}$
protons	6	6	6	6	6
neutrons	4	5	6	7	8

核衰变与核辐射

核衰变：放射性同位素的原子核是不稳定的原子核，在无任何外因作用下，会自动衰变，放出**粒子或射线**，变为另外的同位素。

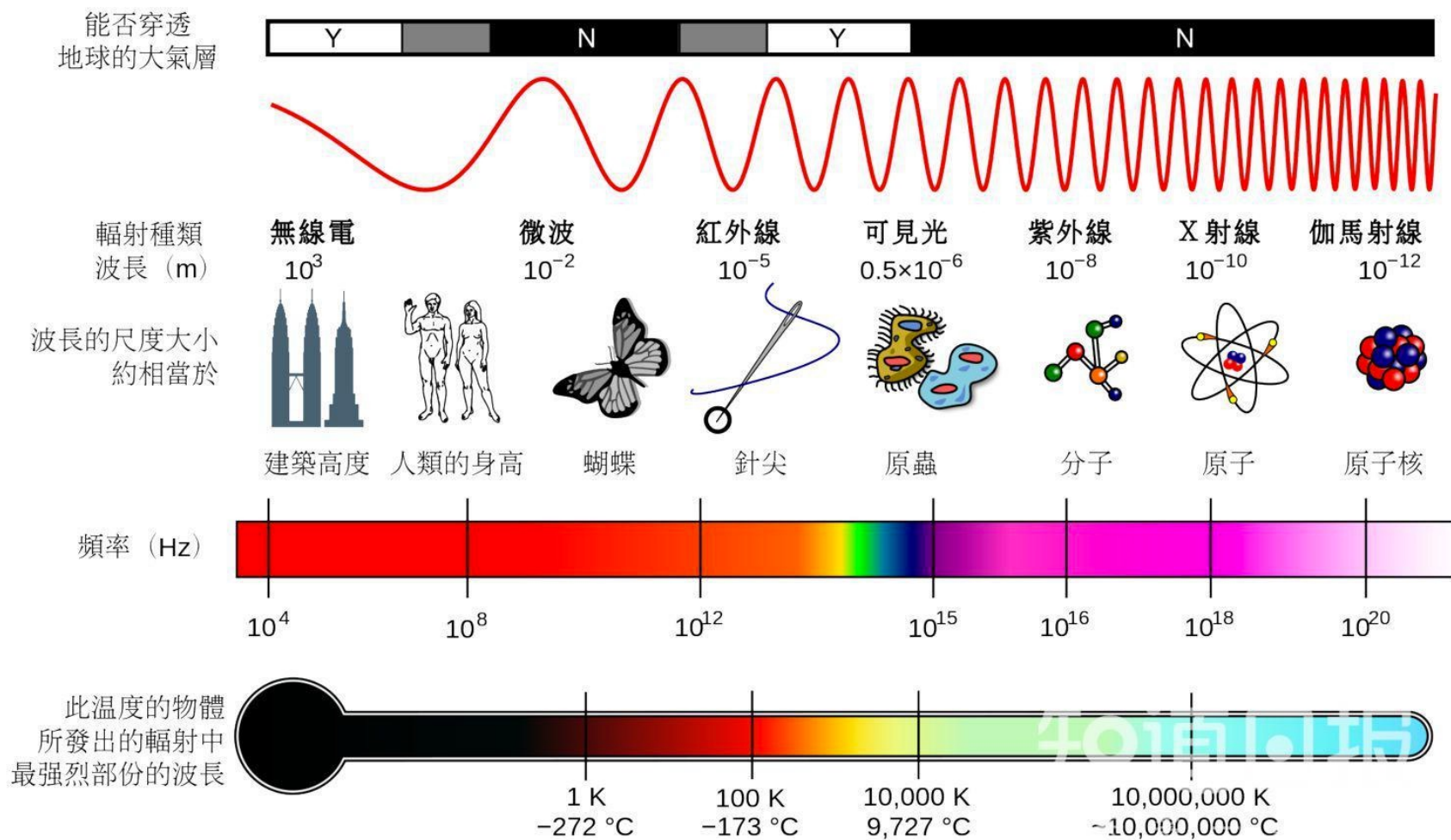
核辐射：核衰变中放出不同的**带有一定能量的粒子或射线**的放射性现象。

核辐射的种类

α 粒子、 β 粒子、X射线、 γ 射线、中子辐射

- 钴 (Co^{60}) : γ 、X射线
- 锶 (Sr^{90}) : β 粒子
- 铯 (Cs^{134}) : β 粒子、 γ 射线

按辐射本质分类



按与物质的作用能力分类

- ❖ **电离辐射**：通过初级和次级过程引起物质电离，如 α 粒子、 β 粒子、质子、中子、X射线和 γ 射线等，对于X、 γ 射线，一般当 $E > 10 \text{ eV}$ 时可以引起电离辐射，或当波长 $\lambda < 100 \text{ nm}$ 时可以引起电离辐射。
- ❖ **非电离辐射**：与物质作用不产生电离的辐射，如微波、无线电波、红外线等，但现在也不能忽视对人体的长期危害作用。

远离电离辐射



当心电离辐射
Caution, ionizing radiation



当心裂变物质
Caution, fission matter



当心激光
Caution, laser



当心微波
Caution, microwave



当心中毒
Caution, poisoning



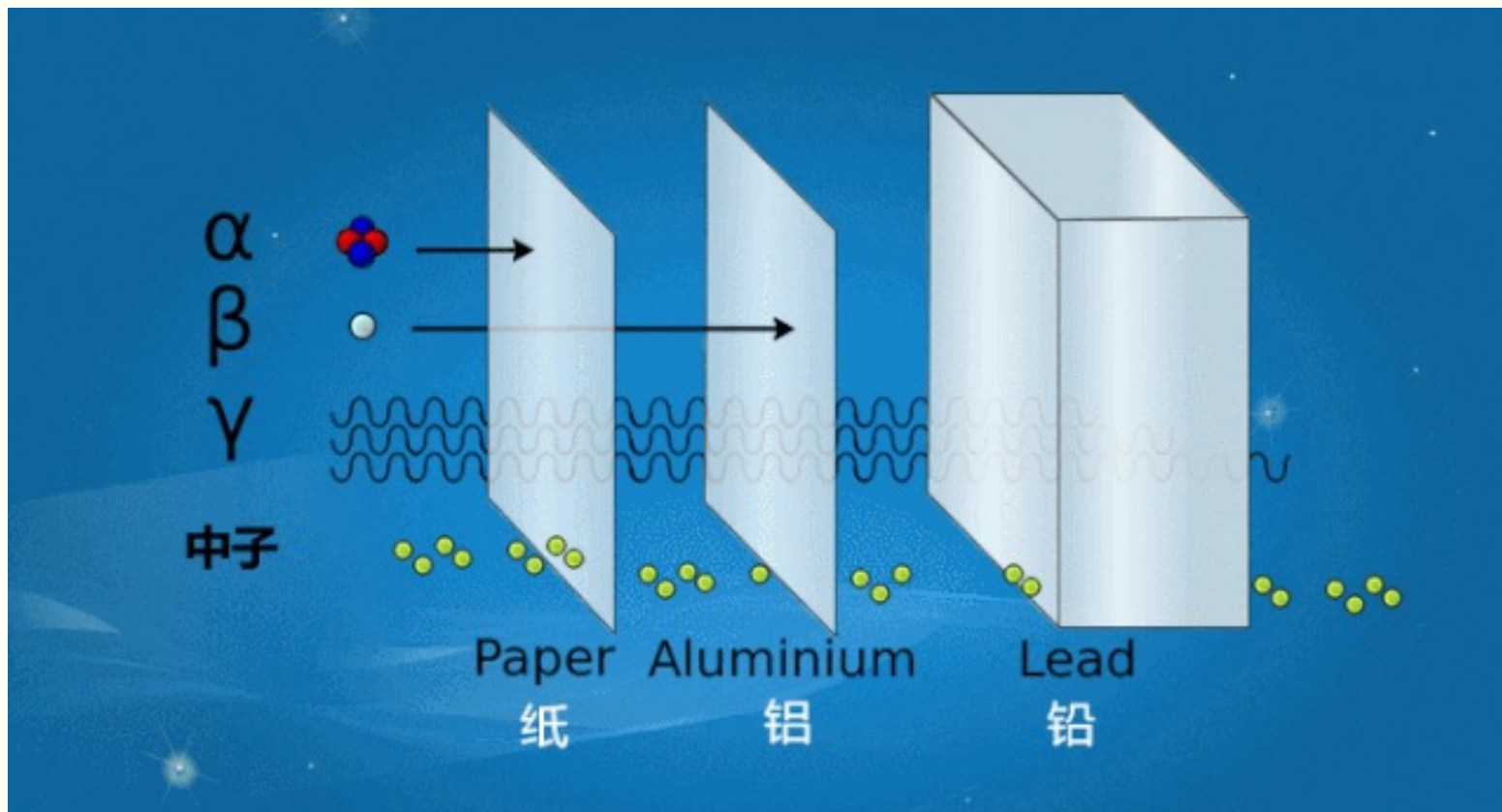
当心感染
Caution, infection

不同电离辐射的性质

- **α 粒子**：两个中子和两个质子，能量4-9 MeV，电离作用最强，主要用于气体成分分析，气体压力及流量测量
- **β 粒子**：中子转变为质子过程释放的高速运动电子，能量一般小于2 MeV
- **γ 射线**：核跃迁或粒子湮灭过程发射的电磁辐射，能量几十 keV到几MeV

	带电量	质量	速度	电离能力	穿透能力
α 粒子	+2e	4. 002775u	20km/s	很强	很弱
β 粒子	-e	0. 000549u	200km/s	较弱	较强
γ 射线	0	0	光速	极弱	极强

不同电离辐射的性质



放射源的强度衰减特性

- 对某一个原子核来说，在何时衰变，完全是偶然的。但是就大量这种原子核作为整体来说，在 t 到 $t+dt$ 时间内衰变的原子核数 dN 应当和时间间隔 dt 及 t 时刻的放射性原子核数 N 成正比

衰变常数

$$-\frac{dN}{N} = \lambda dt$$

放射源的强度衰减特性

- 放射性原子核数目

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

- 放射性核的数目随时间按指数规律减少(核衰变)。
- 组成核辐射检测器时，某个时刻放射源中还存在多少个放射性原子核没有衰变并不重要，重要的是单位时间内有多少个核发生衰变。
- 在给定时刻，单位时间内的核衰变数称为放射性活度A

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$$

放射源的强度衰减特性

$$I = I_0 e^{-\lambda t}$$

- I_0 : 开始时的放射源强度;
- I : 经过时间 t 后放射源强度;
- λ : 为放射性衰变常数, 与外界条件无关;

□ 放射源的辐射强度随时间按指数定律而衰减——校准

半衰期与平均寿命

- 半衰期：放射性同位素的原子核数衰减到一半时所需时间

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

- 平均寿命：在某特定状态下放射性核数减少到原来的1/e的平均时间，符号为 τ

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

2、核辐射与物质的作用

- 带电粒子和物质的作用
- γ 射线和物质的作用

(1) 带电粒子和物质的作用

电离：当入射粒子靠近原子时和物质中的原子发生**静电作用**，使原子中的束缚电子产生加速运动而变为**自由电子**。

激发：若入射粒子距原子远，束缚电子所获得的能量还不够使它逃逸出来时，则原子核由低能级**跃迁到高能级**而处于激发状态。

散射：**带电粒子**穿过物质因受原子核的电场作用而**改变运动方向**称为散射。

射线的吸收

- 当粒子穿过物质时，会发生电离、激发和散射等现象，其结果就表现为对射线的吸收。
- 当一平行射线穿过物质层时，其强度衰减规律可表示为

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

I : 穿过物质后的辐射强度;

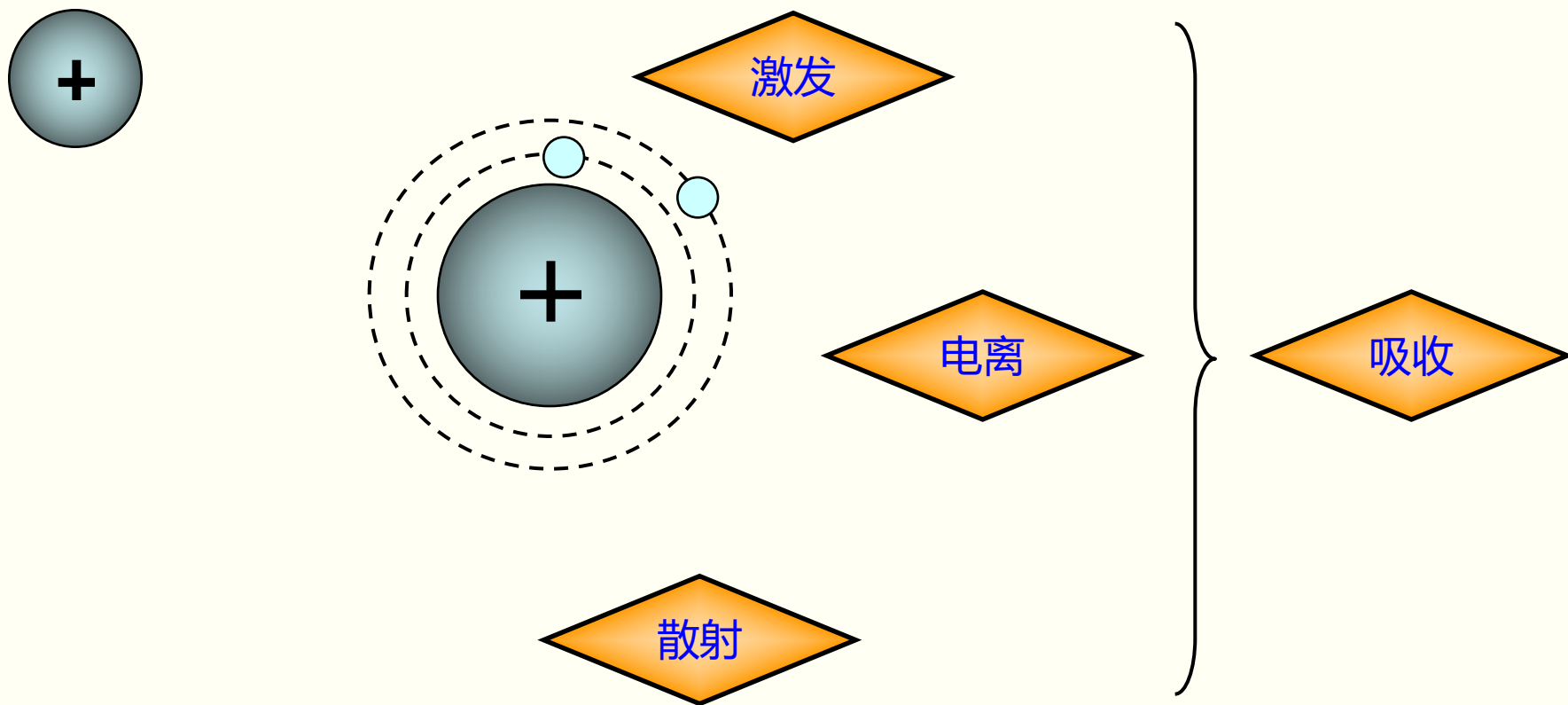
I_0 : 射入物质前的辐射强度;

μ_m : 为物质的吸收系数;

ρ : 物质的密度。

x : 厚度

带电粒子和物质的作用



(2) γ 射线和物质的作用

光电效应： γ 光子穿过物质时和物质中的原子发生碰撞，把自己的能量交给原子核外的一个电子使其成为自由电子（**光电子**），而 γ 光子本身被吸收。

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = h\gamma - A$$

康普顿效应：随着入射 γ 光子能量的增加，入射 γ 光子和物质中的电子发生碰撞，偏离它原来的运动方向，失去一部分能量，然后将能量转移给了电子，使电子（**康普顿电子**）从原子内部冲出来

电子对效应：当入射 γ 光子能量足够高，从原子核旁经过时，在核库仑场的作用下，转化为一个正电子和一个电子，而 γ 光子则消失

$$h\nu = E_{e+} + E_{e-} + 2m_0c^2$$

γ 射线通过物质时强度衰减

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

μ — 物质对射线的吸收系数

x — 材料厚度

吸收系数与材料和 γ 射线的能量有关，是三种效应的叠加

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa$$

τ — 光电吸收系数；

σ — 康普顿吸收系数；

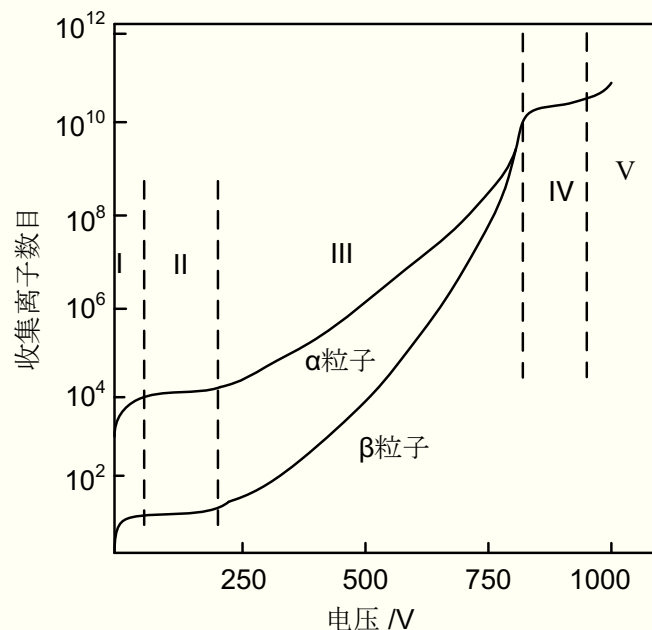
κ — 电子对生成吸收系数。

3、核辐射探测器

- 核辐射探测器又称核辐射接收器，是以射线和物质的相互作用为基础设计的
- 将核辐射信号转换成电信号，以检测射线强度的变化，进而实现被测参数的检测
- 气体探测器、闪烁探测器、半导体探测器
 - 电流电离室
 - 盖革计数器（G-M计数器）
 - 正比室

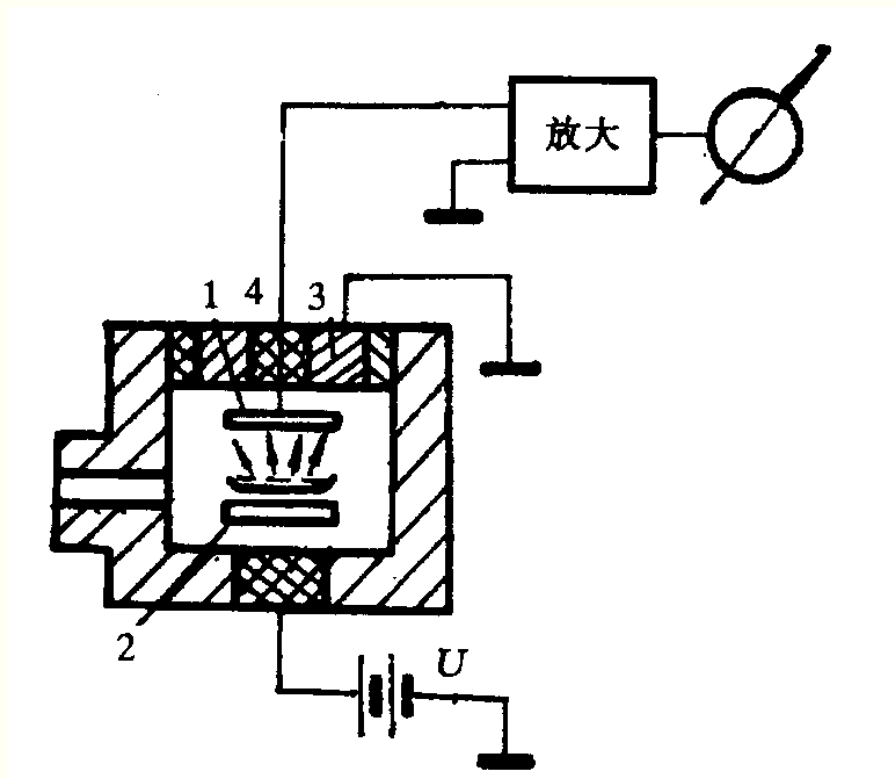
(1) 气体探测器

- I 段是复合区，电流与电压成正比；
- II 段是电流饱和区，离子对完全收集，与射线的强度有关(电离室)；
- III 段是正比区，电子能量很大使气体产生次级电离 $N=M*N_0$ ， M 随电压增大；
- IV 段是雪崩区(盖革计数器)
- V 段是放电区—气体击穿



电离曲线

电离室



1—收集电极

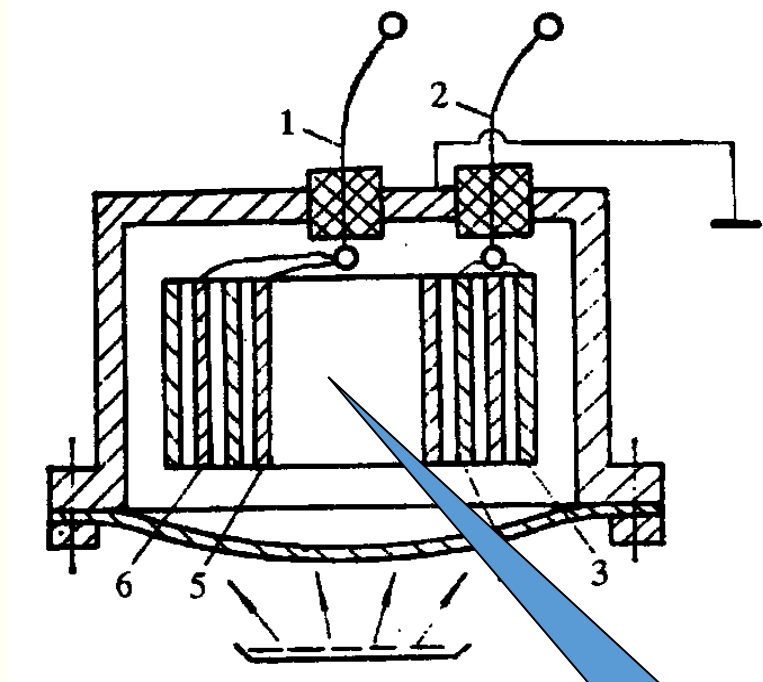
2—高压电极

3—保护电极

4—绝缘层

α 粒子电离室

β 射线的多电极电离室



1、2—端子；

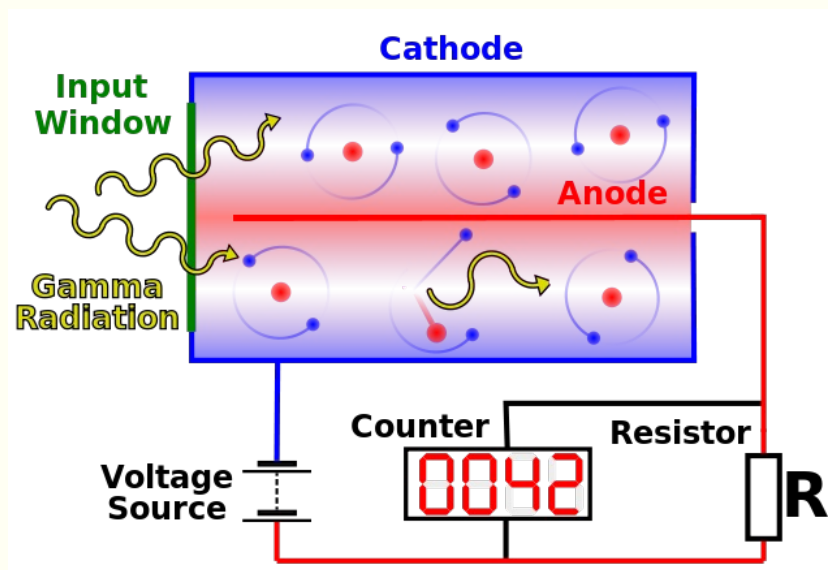
3、4—圆柱电极；

5、6—圆柱电极

惰性气体

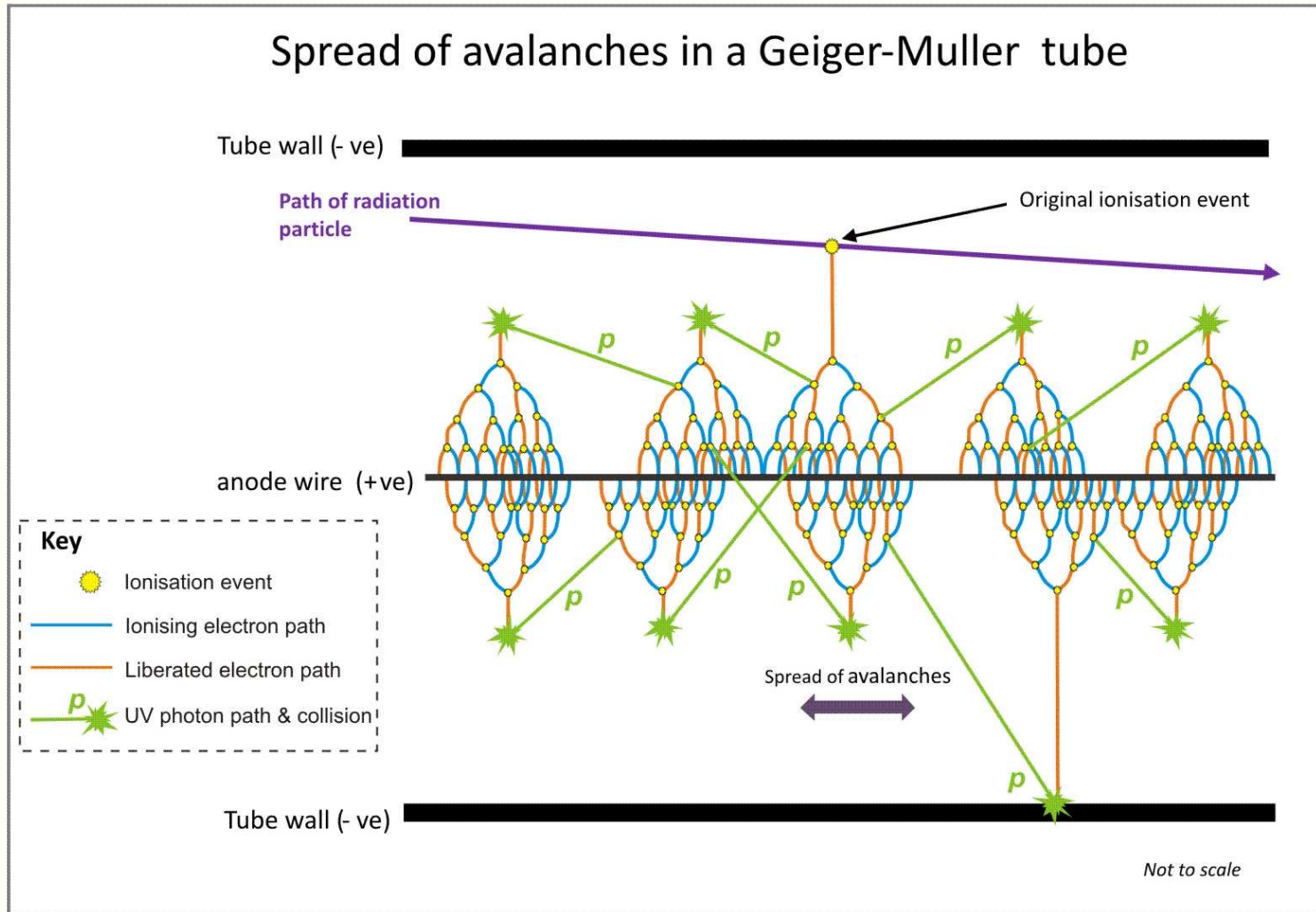
盖革计数器

工作在电离曲线的雪崩区，一般是充有惰性气体（Ar、Ne）的圆柱形管：圆筒式金属阴极和位于中心的细丝阳极

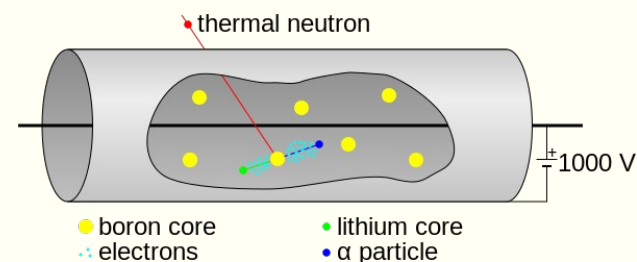
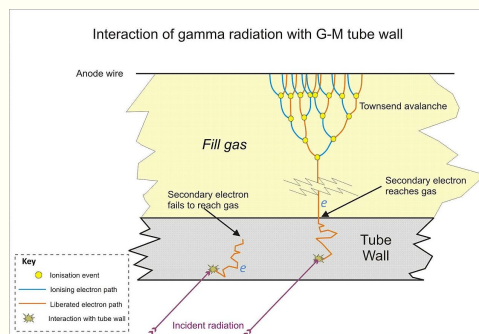
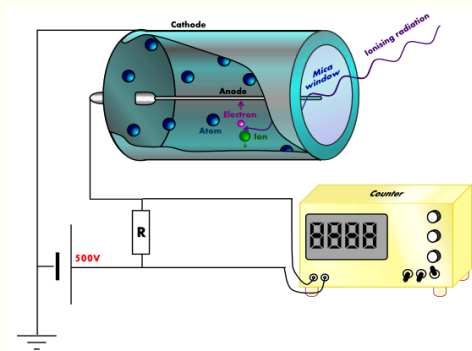
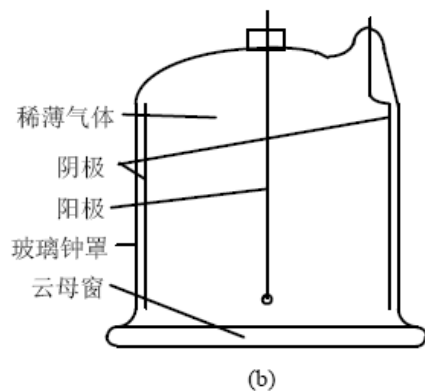
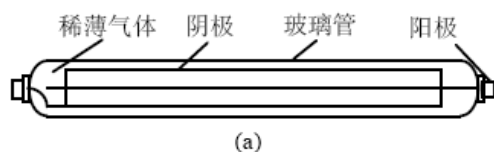


雪崩效应

Spread of avalanches in a Geiger-Muller tube

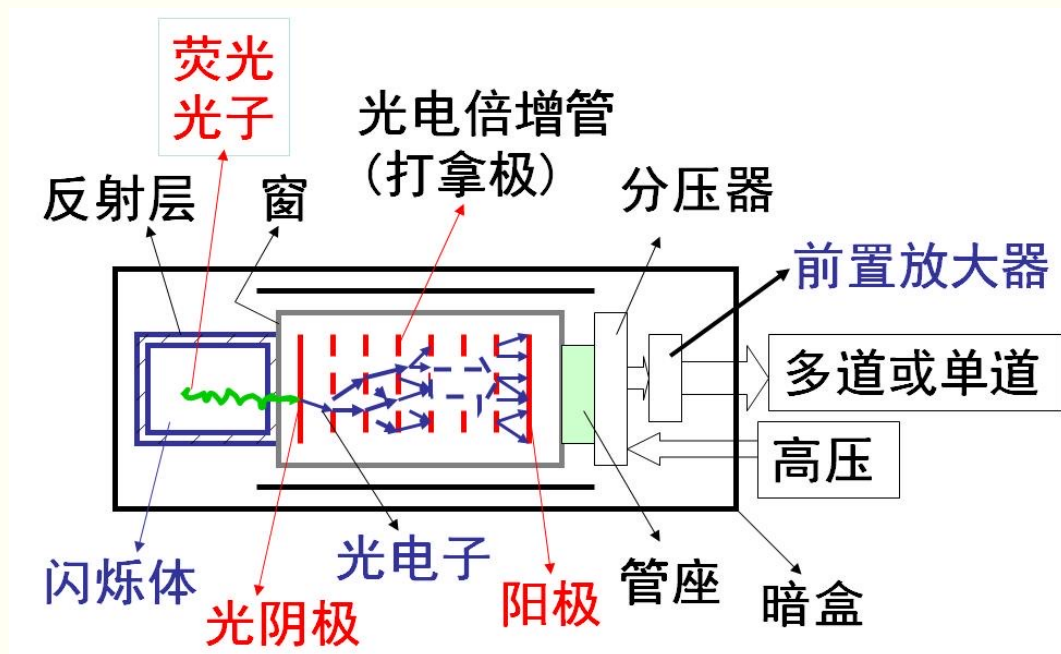


盖革计数器类型



(2) 闪烁探测器

- 闪烁计数器，先将辐射能转变为光能，再对光信号进行测量
- 闪烁体、光电倍增管和输出电路



闪烁体

- **受激发光物质**，射线照射到闪烁体时，闪烁体的原子被电离和激发，受激原子退激时会发光。
- 能在大约一微秒或更短的时间内把所吸收的一部分能量以光的形式再发射出来
- 主要类型：
 - 无机闪烁体
 - 有机闪烁体

闪烁体

- **无机晶体**：主要是含杂质或不含杂质的碱金属碘化物；
 - 对入射粒子的阻止本领大、发光效率高、有很高的探测效率
- **有机晶体**：都是未取代的或取代的芳香碳氢化合物；
 - 发光时间短，必须与分辨性能较高的光电倍增管配合使用
- **液体闪烁体**：液态的有机溶液
 - α 粒子：硫化锌
 - γ 射线：碘化钠，无机闪烁晶体
 - β 射线：有机闪烁体

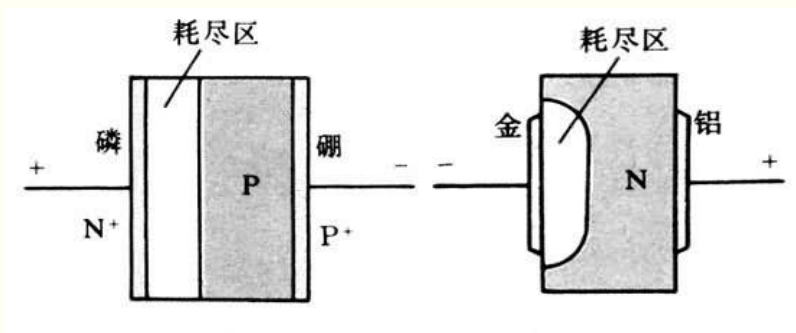
闪烁探测器的特点

□ 效率高、分辨时间短

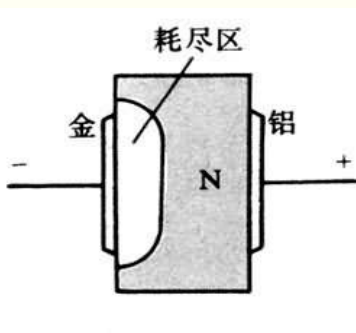
□ 不仅能探测 γ 射线，而且能探测各种带电和不带电的粒子，在核辐射检测中有着广泛的应用。

(3) 半导体探测器

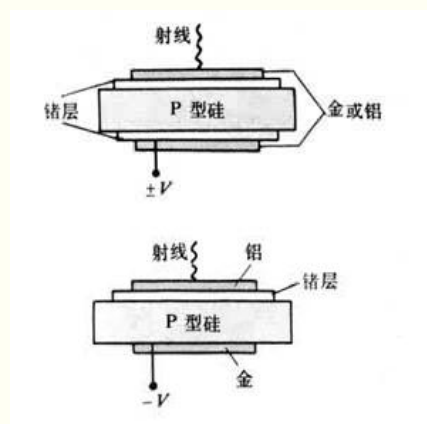
- 以半导体材料为探测介质：锗、硅
- 辐射与半导体晶体相互作用时产生电子-空穴对，电子-空穴对在外电场的作用下漂移而输出信号
- 能量分辨率高；体积小、重量轻、结构简单、使用方便
- 探测器不能做大做厚，难以测量高能辐射，输出信号小，电子线路复杂



(a) 结型探测器



(b) 面垒型探测器



(c) 高纯锗探测器

4、核辐射式检测元件的误差

1. 辐射源强度误差

在时间 t 内，强度衰减为 $\Delta I = I_0 - I$ ，所以由辐射源本身核衰变引起的相对误差为

$$r = \frac{\Delta I}{I} = 1 - e^{-\lambda t}$$

- 放射源半衰期长
- 射线要达到一定强度

2. 核衰变的统计特性引起的误差

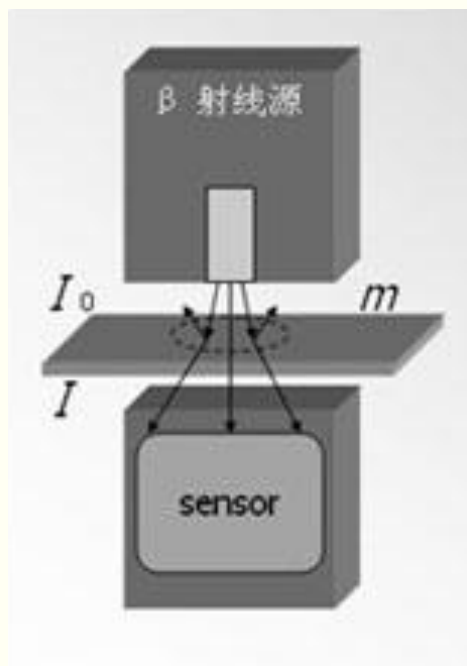
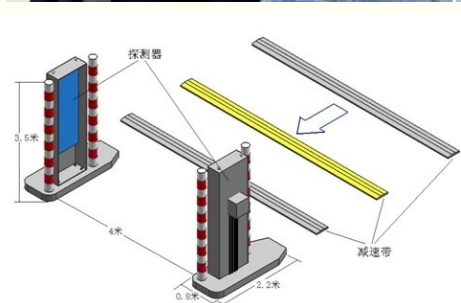
由于核衰变产生的粒子数是随机的，它服从于统计规律，检测器测量到的粒子数的相对误差可按下式计算

$$\delta_r = \sqrt{\frac{1}{t_m f_n \eta}}$$

- t_m — 测量时间
- f_n — 为射入检测元件的粒子的平均频率
- η — 检测元件的效率

5、辐射式检测元件的应用

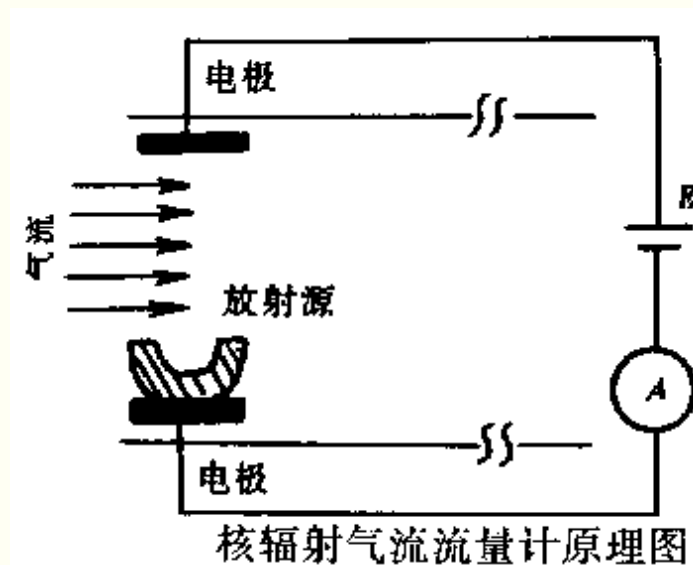
- 核物理、原子分子物理、固体物理、材料化学、化学、生物学、地质、考古、天体物理
- 成分分析、辐射探伤、测厚、流量、医学诊断



(1) 核辐射式流量计

核辐射流量计可以检测气体和液体在管道中的流量。在气流管壁上装两个活动电极，其一的内侧面涂覆有放射性物质构成的**电离室**。

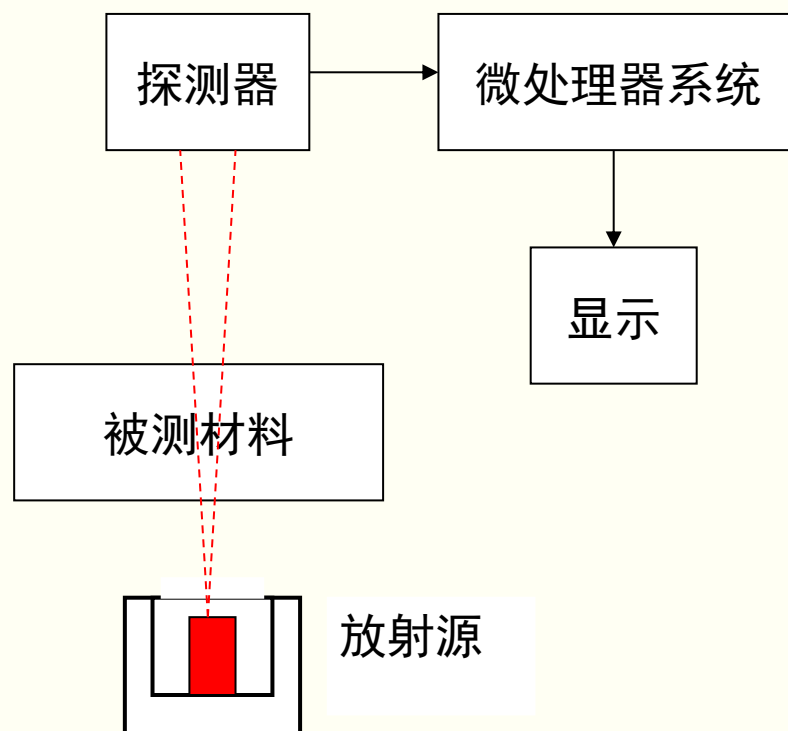
- 当气体流经两电极间时，由于核辐射使被测气体电离，产生电离电流；
- 带电离离子一部分被流动的气体带出电离室，电离电流减小；
- 随着气流速度的增加，带出电离室的离子数增加，电离电流也随之减小；
- 当外加电场一定，辐射强度恒定时，离子迁移率基本是固定的，因此，可以比较准确地测出气体流量。



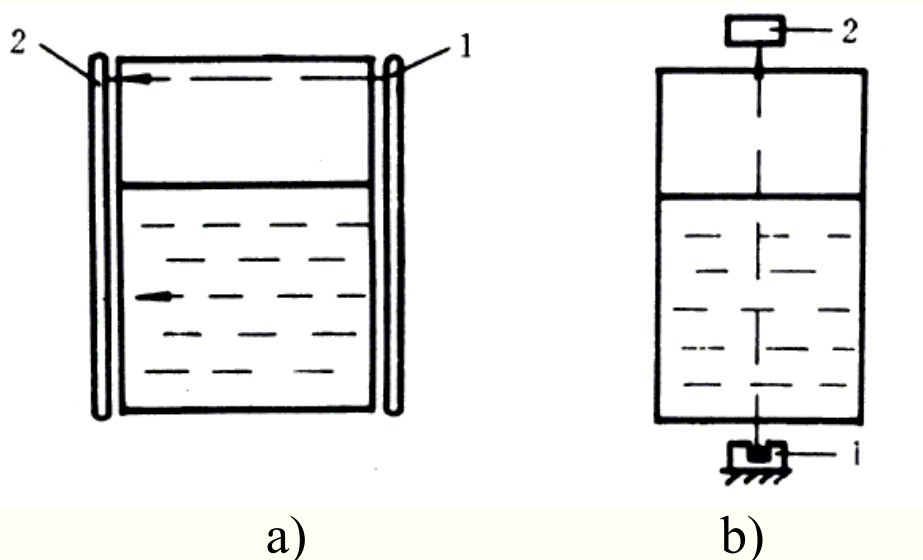
(2) 射线式测厚仪

- 利用被测件对射线的吸收大小与其厚度有关这一原理来测量厚度
- 测厚仪的测量范围用**质量厚度**表示，即物质的密度与厚度的乘积
- β 射线厚度计：0.5~6.0kg/m²
- γ 射线厚度计：30~800 kg/m²，适用于冷、热轧钢板

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



(3) 核幅射式液位计



a) 1-放射源; 2-接收器
b)

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

$$H = \frac{1}{\mu} (\ln I_0 - \ln I)$$

- (a) 为长辐射源和长接收器形式，输出线性度好；
(b) 为点辐射源和点接收器形式，输出线性度较差

特点

- 辐射式液位计既可进行连续测量，也可进行定点发送信号和进行控制；
- 射线不受温度、压力、湿度、电磁场的影响，而且可以穿透各种介质，包括固体，因此能实现完全非接触测量。
- 辐射式液位计适合于特殊场合或恶劣环境下不常有人之处的液位测量，如高温、高压、强腐蚀、剧毒、有爆炸性、易结晶、沸腾状态介质、高温熔融体等的液位测量。
- 使用时仍要注意控制剂量，作好防护，以防射线泄漏对人体造成伤害。

思考题

- 如何用核辐射式检测元件实现材料厚度、液体浓度、成份等的测量？



THE END