

# 引言 (略)

## 第零章：IDL与SSW介绍 (略)

## 第一章：粒子探测

### 1.术语和单位

**粒子能量**：主要是动能，基本单位 $ev$

**粒子通量**：单位时间，穿过单位面积的粒子数目  $((cm^2 \cdot s)^{-1})$

**粒子强度**：

定义	表述
全向强度	单位时间穿过单位球面的粒子数目 $(cm^2 \cdot s)^{-1}$
方向强度	单位时间单位立体角内，沿法向穿过单位面积的粒子数目 $(cm^2 \cdot s \cdot Sr)^{-1}$
微分强度	能量在 $E - E + \Delta E$ 范围内的粒子强度
积分强度	能量超过给定能量 $E_0$ 的粒子强度

*Note*: 又可以细分为微分方向强度  $((cm^2 \cdot Sr \cdot s \cdot ev)^{-1})$  和微分全向强度  $((cm^2 \cdot s \cdot ev)^{-1})$  ; 同样，有积分方向强度和积分方向强度。

### 2.带电粒子与物质的相互作用

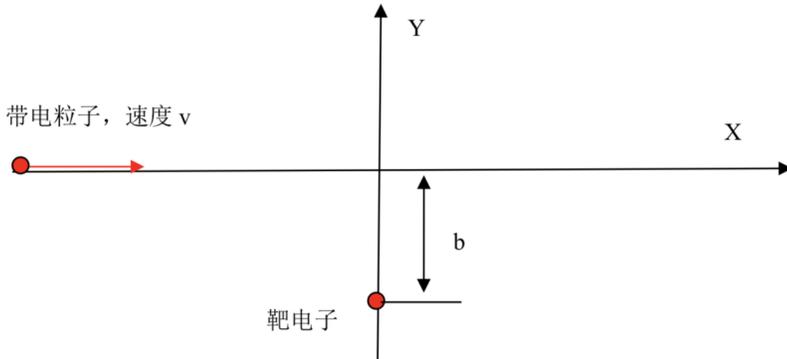
利用带电粒子与物质之间的相互作用是粒子探测的主要方法，本课主要简要介绍两种形式**电离**和**辐射**。

#### (1) 电离

带电粒子进入探测器工作物质中，是工作物质（介质）原子或者分子电离的现象。

**电离损失**  $(-\frac{dE}{dx})$ ：描述在工作物质的单位距离上带电粒子的能量损失。

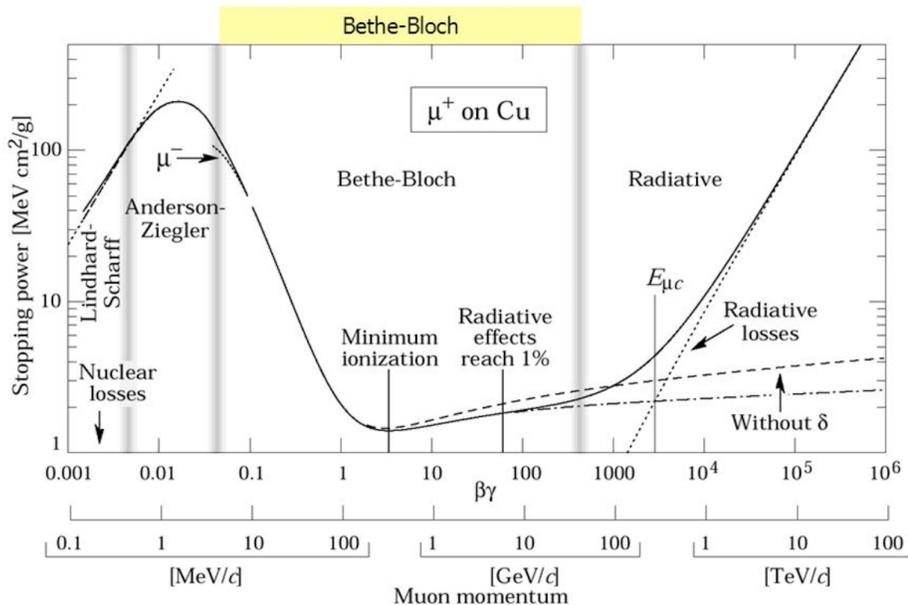
## 经典物理求解电离损失



- 入射到探测器工作物质中的带电粒子为正离子 (质量  $M$ , 电荷  $ze$ , 能量  $E$ , 速度  $v$ )。
- 探测器内的工作物质原子序数  $Z$  (**注意与入射粒子电荷  $z$  区分大小写**)，工作物质数密度  $N$ ，工作物质中的一个电子 (靶电子) 的质量  $m_e$  和电荷  $e$ 。
- 入射粒子的能量  $E \gg$  电子结合能,  $v \gg$  电子速度
- **推导过程: 详见授课板书**
- 电离损失:  $-\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi z^2 e^4 \cdot NZ}{(4\pi\epsilon_0)^2 m_e v^2} \ln\left[\frac{2m_e v^2}{I}\right]$

## 量子力学严格求解电离损失

- 对于重粒子:
 
$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 m_e v^2} \cdot NZ \cdot \left[ \ln \frac{2m_e v^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$
 其中  $\beta = v/c$ ,  $\delta$  是对密度的修正
- 在非相对论近似下 ( $\beta < 0.5$ )
  - 重粒子:  $-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 m_e v^2} \cdot NZ \cdot \left[ \ln \frac{2m_e v^2}{I} \right]$
  - 电子:  $-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 m_e v^2} \cdot NZ \cdot \left[ \ln \frac{1.16m_e v^2}{2I} \right]$



此图来自互联网

## 带电粒子的射程

带电粒子在工作物质中损失能量全部动能最后停止在探测器中所走过的距离 $R$ ，即为带电粒子的射程。

$$\bullet R = \int_E^0 dx = \int_E^0 \frac{dE}{dE/dx}$$

## 电离过程的应用

带电粒子在物质中除了产生电离外，还可能导致工作物质**激发**，此时并不在介质中产生离子-电子，而是形成光子。这些过程是带电粒子与介质核外电子的非弹性碰撞过程，是粒子损失能量的主要形式。

- 收集电荷

带电粒子入射—介质产生电离—形成电子/离子对—探测器收集电子/离子（电离电流）—入射粒子的能量损失 ==> 气体/半导体探测器

- 收集荧光

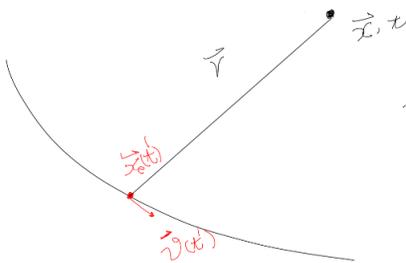
带电粒子入射—介质产生激发—退激发光子—探测器收集光子（光电流）—入射粒子的能量损失 ==> 闪烁体探测器

## (2) 辐射

当带电粒子能量很高的时，在工作物质中辐射过程逐渐起到重要的作用。本节主要介绍几种典型的辐射形式：**轫致辐射，同步辐射，切伦科夫辐射。**

### 粒子在真空的辐射过程

回顾：一个绕着均匀磁场圆周运动的带电粒子会一致保持其运动状态吗？



- 场点： $\mathbf{X}, t$

- 源点： $\mathbf{X}_e(t'), \mathbf{v}(t')$

在场点 $\mathbf{X}$ 处，在 $t$ 时刻观测的带电粒子的辐射，是粒子在源点 $\mathbf{X}_e(t')$ ， $t'$ 时刻所发出的，即推迟势。

图中：

$$\mathbf{r} = |\mathbf{X} - \mathbf{X}_e(\mathbf{t}')| = c(t - t')$$

由推迟势公式:

$$\mathbf{A}(\mathbf{X}, t) = \int \frac{\mu_0 \mathbf{J}(\mathbf{X}', t-r/c)}{4\pi r} dV'$$

$$\phi(\mathbf{X}, t) = \int \frac{\rho(\mathbf{X}', t-r/c)}{4\pi\epsilon_0 r} dV'$$

对于带电粒子  $\mathbf{J} = \rho\mathbf{v}$ , 其中  $\mathbf{v}$  为  $t' = t - r/c$  时粒子的速度, 可以进一步得到李纳-维谢尔势

$$\mathbf{A}(\mathbf{X}, t) = \frac{e\mathbf{v}}{4\pi\epsilon_0 c^2 (\mathbf{r} - \frac{\mathbf{v}\cdot\mathbf{r}}{c})}$$

$$\phi(\mathbf{X}, t) = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 (\mathbf{r} - \frac{\mathbf{v}\cdot\mathbf{r}}{c})}$$

进一步对  $\mathbf{A}$ ,  $\phi$  求时空导数, 可以获得电场和磁场  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B}$ , 能流  $\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B}$ , 进一步可以获得在  $4\pi$  立体角内的能流积分给出功率  $P = \int \mathbf{S} \cdot \mathbf{nr}^2 d\Omega$ , 功率即带电粒子单位时间通过辐射损失能量, 从而获得真空带电粒子辐射能量损失。 (详细步骤见板书推导)

$$\text{功率角分布为: } \frac{dP}{d\Omega} = \frac{e^2}{16\pi^2 \epsilon_0 c^3} \frac{|\mathbf{n} \times [(\mathbf{n} - \mathbf{v}/c) \times \dot{\mathbf{v}}]|^2}{(1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{n}/c)^5}$$

- $v \sim c$  时,  $1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}}{c} \sim 1 - \frac{v}{c} \cos \theta$ ,  $\theta$  为粒子运动与辐射方向的夹角。
- $\theta \sim 0$  时,  $1 - \frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}}{c} \sim 0$ , 可见粒子辐射能量前向集中。

## 轫致辐射

前面推导在真空中的一个特例1 (推导过程: 详见授课板书)。

$$\text{在真空条件下, 当 } \dot{\mathbf{v}} \parallel \mathbf{v} \text{ 时, } \dot{\mathbf{v}} \times \mathbf{v} = 0, \frac{dP}{d\Omega} = \frac{e^2 \dot{v}^2}{16\pi^2 \epsilon_0 c^3} \frac{\sin^2 \theta}{(1 - \frac{v}{c} \cos \theta)^5}.$$

这个过程又称为**轫致辐射**: 在带电粒子探测中, 高速运动的带电粒子收到原子核库伦作用而改变速度, 将产生的能量以辐射形式发射的过程。表示成能量损失的形式:

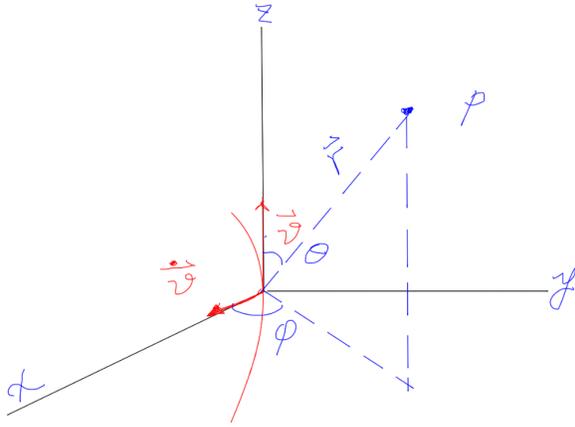
- $-\frac{dE}{dx} = \frac{4NZ(Z+1)}{137} \left(\frac{e^2}{Mc^2}\right)^2 \cdot E \cdot (\ln \frac{2E}{Mc^2} - 1/3)$ , as  $137Mc^2 Z^{-1/3} \gg E \gg Mc^2$
- $-\frac{dE}{dx} = \frac{4NZ(Z+1)}{137} \left(\frac{e^2}{Mc^2}\right)^2 \cdot E \cdot (\ln 183Z^{-1/3} + 1/18)$ , as  $E \gg 137Mc^2 Z^{-1/3}$

其中,  $M$  为入射粒子的质量,  $Z$  为介质的原子序数,  $\frac{1}{137} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c}$  精细结构常数

NOTE: 带电粒子进入介质, 产生电离和辐射, 两者实验临界为  $E_c = \frac{1600Mc^2}{Z}$ 。

## 同步辐射

前面推导在真空中的一个特例2 (推导过程: 详见授课板书)。



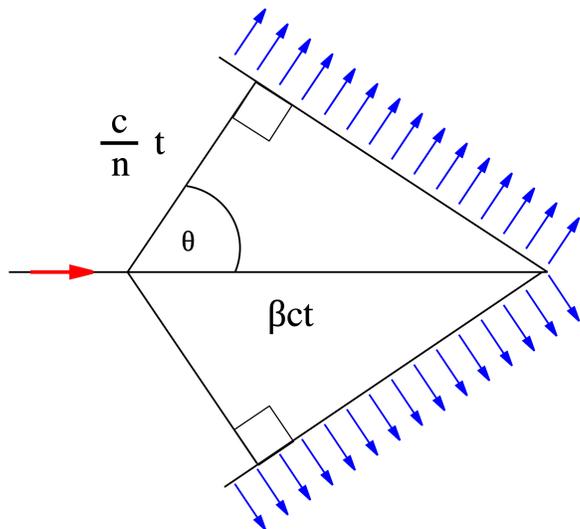
在真空条件下，当  $\dot{\mathbf{v}} \perp \mathbf{v}$  时， $\dot{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{v} = 0$ ， $\frac{dP}{d\Omega} = \frac{e^2 \dot{v}^2}{16\pi^2 \epsilon_0 c^3} \frac{(1 - \frac{v}{c} \cos \theta) - (1 - \frac{v^2}{c^2} \sin^2 \theta \cos^2 \phi)}{(1 - \frac{v}{c} \cos \theta)^5}$

这种辐射过程也称为**同步辐射**，即带电粒子（主要是电子）在场中发生偏转运动产生的辐射。能量相同的粒子，轻粒子的同步辐射比重粒子强得多，同时这种辐射具有连续能谱，辐射主要沿运动路径的切线方向，辐射角小，功率大。

**思考：**对于卢瑟福 $\alpha$ 粒子散射实验与我们介绍的内容之间有区别与联系？

### 切伦科夫辐射

在真空中粒子运动速度 $v$ 不能超过 $c$ ，在介质中的光速为 $\frac{c}{n}$ 。当介质中粒子运动 $v > \frac{c}{n}$ 的时候，产生一种特殊形式的辐射，即切伦科夫辐射。



在这种情况下可以计算：

$$\cos \theta = \frac{\frac{c}{n} t}{\beta c t} = \frac{c}{n v} , \text{ 即辐射距离与粒子运动距离之比。}$$

### 3. 射线与物质的相互作用

$X$ ,  $\gamma$ 射线不能像带电粒子直接电离介质, 无法被探测器直接探测。但它们通过工作物质时候, 与原子核外电子或者原子核发生电磁相互作用, 损失能量, 引起**光电效应**, **康普顿效应**, **电子对效应**。这三种效应都可以产生能量电子, 引起电离或者激发, 从而间接探测射线。

#### (1) 光电效应

射线能量大于原子核外电子结合能, 射线能量全部传递给原子, 使得壳层电子从原子逃逸出来。光电效应中, 射线与原子发生光电效应的几率称为光电效应截面。

- $\sigma_{pe} = 2^{5/2} \left(\frac{1}{137}\right)^4 \phi_0 Z^5 \left(\frac{m_e c^2}{E_\gamma}\right)^{7/2}$  as  $E_\gamma > E_i$
- $\sigma_{pe} = 3/2 \times \left(\frac{1}{137}\right)^4 \phi_0 Z^5 \left(\frac{m_e c^2}{E_\gamma}\right)$  as  $E_\gamma \gg 0.5 Mev$   
其中,  $\phi_0 = \frac{8}{3} \pi r_e^2$  是汤姆逊散射截面,  $r_e = e^2 / 4\pi\epsilon_0 m_e c^2$  是电子经典半径
- $\sigma_{pe} \propto Z^5$  重元素比轻元素的光电效应强;  $\sigma_{pe} \propto E_\gamma^{-7/2}$ ,  $E_\gamma^{-1}$  低能射线比高能射线光电效应强

#### (2) 康普顿效应

光子被自由电子散射过程, 在这个过程中, 射线损失能量转换成电子的动能, 同时光子飞行方向发生偏转能量降低 (**推导过程: 详见授课板书**)。

同样可以计算康普顿效应的截面, 对于单电子而言:

$$\sigma_e = 2\pi r_e^2 \left[ \frac{1 + \alpha}{\alpha^2} \left[ \frac{2(1 + \alpha)}{1 + 2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \ln(1 + 2\alpha) \right] + \frac{1}{2\alpha} \ln(1 + 2\alpha) - \frac{1 + 3\alpha}{(1 + 2\alpha)^2} \right]$$

其中  $\alpha = h\nu / m_e c^2$ , 在  $\alpha \ll 1$  的时候,  $\sigma_e = 8\pi / 3 r_e^2$  即汤姆逊散射。

在一般情况下:

- $\sigma_{comp} = \frac{8\pi e^4}{3m_e^2 c^4} Z \left[ 1 - \frac{2E_\gamma}{m_e c^2} + 5.2 \left(\frac{E_\gamma}{m_e c^2}\right)^2 \right]$  as  $E_\gamma \in (0.06, 0.5) Mev$
- $\sigma_{comp} = \frac{\pi e^4}{m_e^2 c^4} \frac{Z}{E_\gamma} \left[ \ln \frac{2E_\gamma}{m_e c^2} + 1/2 \right]$  as  $E_\gamma \gg 0.5 Mev$

康普顿效应截面对  $Z$  和  $E_\gamma$  的依赖不如光电效应。

#### (3) 电子对效应

$\gamma$ 射线与原子核发生的强烈电磁相互作用, 射线与工作物质原子核发生强作用, 生成正负电子。

- $E_\gamma > 1.02 Mev$  才能产生电子对效应

计算其截面:

- $\sigma_{e-e} = \frac{e^4 Z(Z+1)}{137m_e^2 c^4} \left( \frac{28}{9} \ln \frac{E_\gamma}{m_e c^2} - \frac{218}{27} \right)$  as  $137m_e c^2 Z^{-1/3} > E_\gamma > 2m_e c^2$
- $\sigma_{e-e} = \frac{e^4 Z(Z+1)}{137m_e^2 c^4} \left( \frac{28}{9} \ln 183 Z^{-1/3} - \frac{2}{27} \right)$  as  $E_\gamma \gg 137m_e c^2 Z^{-1/3}$

当 $E_\gamma$ 很大时，截面与射线能量无关；截面正比 $Z^2$

#### (4) 小结

	射线	工作物质
光电效应	低能	高Z
康普顿效应	中能（不明显依赖）	低Z（一般）
电子对	高能	高Z

光电效应和康普顿效应：射线与核外电子或者自由电子相互作用

电子对效应：射线与核的电磁作用

## 4. 气体探测器

### (1) 基本工作原理

气体探测器基于电离损失方程  $-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 m_e v^2} \cdot NZ \cdot \left[ \ln \frac{2m_e v^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$ 。带电粒子入射到以气体为工作介质的探测器中，损失能量使气体电离。探测器将电离得到的正离子和电子收集，形成电流并记录。

并非所有带电粒子都可以电离气体，只有具有一定的初始能量的粒子才能有效电离气体，这个能量为最小电离能  $E_{min} = \frac{m_e + M}{4m_e M} I_0$ ，其中  $m_e$  为电子质量， $M$  为入射粒子质量， $I_0$  为气体平均电离电位（见下表）。

- **结论：**轻粒子只要很低能量即可电离气体

气体	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	平均电离电位 $I_0$ (ev)	平均电离能(ev)
H <sub>2</sub>	8.99 x 10 <sup>-5</sup>	15.4	37
He	1.78 x 10 <sup>-4</sup>	24.6	41
N <sub>2</sub>	1.25 x 10 <sup>-3</sup>	15.5	35
O <sub>2</sub>	1.43 x 10 <sup>-3</sup>	12.2	31

气体	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	平均电离电位I <sub>0</sub> (ev)	平均电离能(ev)
Ne	9.00 x 10 <sup>-4</sup>	21.6	36
CO <sub>2</sub>	1.98 x 10 <sup>-3</sup>	13.7	33

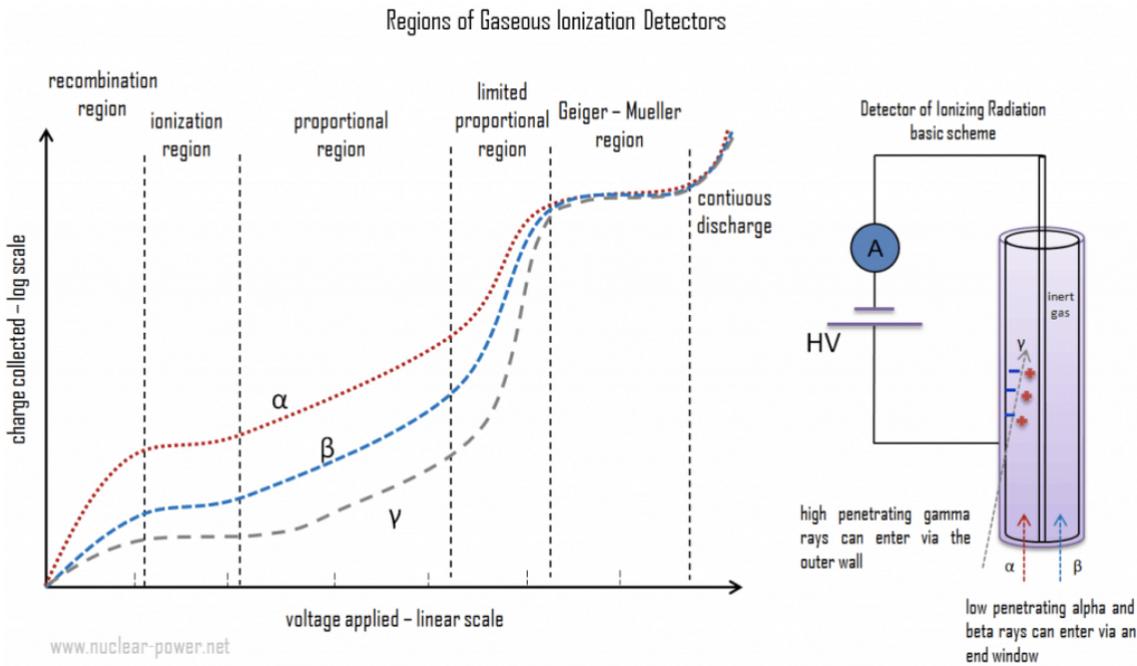
表注：可见气体的平均电离能超过了气体电离电位，由于电离过程可能涉及气体原子内壳层，同时入射粒子一部能量消耗于激发过程而不产生离子-电子对。平均电离能对于特定工作物质基本可以视为常数 (数据来源于 Grupen & Shwartz Particle Detectors)

### 粒子入射气体探测器的几个概念

- 原初电离：入射粒子引起的电离
- 次级粒子：入射粒子在探测器内产生电子或者离子
- 次级电离：次级粒子在探测器加速，当能量大于最小电离能时产生的新电离
- 总电离 = 原初电离 + 次级电离

如果探测器收集的总电离产生的电子-离子对数目为  $N_0$ ，那么其与粒子在探测器损失的总能量  $E$  之间，满足： $N_0 = E/W_0$ ，其中  $W_0$  为平均电离能（见上表）。因此，在  $W_0$  已知的情况下，只要能够记录  $N_0$ ，就可以获得  $E$ 。

### 气体电离曲线



图片来自网络 (<https://www.nuclear-power.net/>)

粒子电离探测器气体后，离子-电子可能的运动：

- 复合

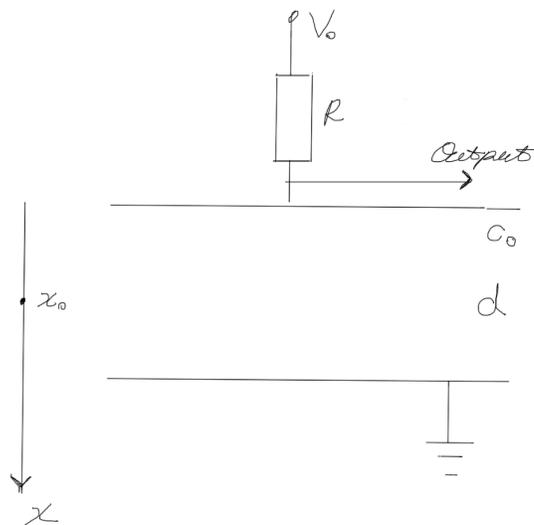
- 吸附
- 中和

可以通过外加电场分离离子与电子，这样在探测器收集的电子-离子对数目与所加电压之间的关系形成上图曲线（详见课堂讲解）。

- 复合区  $N < N_0$
- 饱和区  $N = N_0$
- 正比区  $N \propto N_0$
- 有限正比区：与原初电离有关
- GM区：与入射粒子无关
- 放电区

## (2) 气体电离室

### 脉冲电离室



如上图，简易的平板中间充入工作气体，形成气体电离室。粒子入射后，在两个极板之间位置 $x_0$ 处产生电离，设平板电容 $C_0$ ，板间距 $d$ ，电子和离子漂移速度 $v_D^+$ ， $v_D^-$ 。那么最后在阳极得到的输出脉冲变化（详见课堂讲解）：

- $U(t) = -\frac{N_0 e}{C_0} \left( \frac{v_D^+ + v_D^-}{d} \right) t$  as  $t < \frac{x_0}{v_D^-} = T^-$
- $U(t) = -\frac{N_0 e}{C_0} \left( \frac{v_D^+ t + x_0}{d} \right)$  as  $T^- < t < \frac{d - x_0}{v_D^+} = T^+$
- $U(t) = -\frac{N_0 e}{C_0}$  as  $t \geq T^+$

### 基本参数

- 坪特性
- 能量分辨率

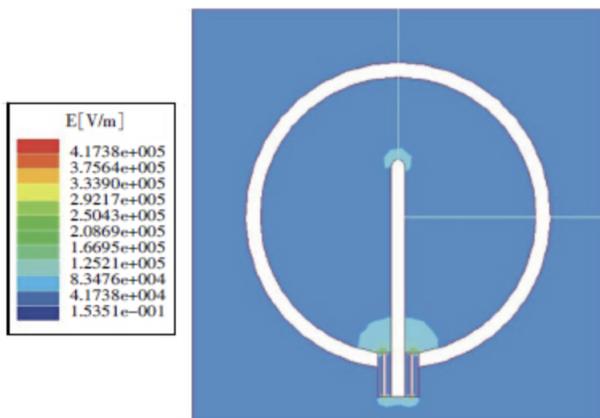
- 时间分辨率

## 总结

- 电离室的脉冲输出由离子、电子在阴极、阳极感生的电荷产生，并不是离子-电子运动到极板产生。
- 电离室中电子、离子对输出脉冲都有贡献，当  $v_D^- \gg v_D^+$  的时候，主要由电子贡献。
- 电子质量小、离子质量大，因此离子运动时间制约了探测器的整体响应时间，与产生电离的位置  $x_0$  有关。
- 当电子、离子全部被收集后，电压脉冲  $U = -\frac{N_0 e}{C_0}$ ，可以测量  $N_0$ 。如果知道工作气体  $W_0$ ，则可以探测带电粒子在探测器损失的能量。这一关系是探测器的**线性响应**。

**思考：**如何改进探测器，使得  $x_0 \sim d$ 。请大家课后调研，可以开展课堂讨论

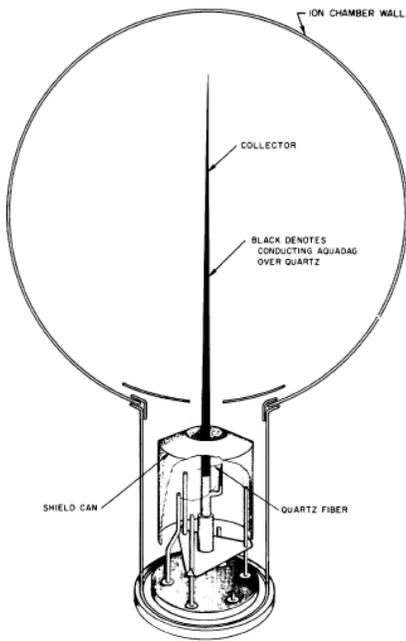
## 积分电离室



图片来自网络

- 要求  $RC_0$  很大，累积时间大于粒子入射的时间间隔
- 产生的电离电流  $I = N_0 e = n E e / W_0$
- 设计需要在材料、壁厚、内充气体压强三者之间平衡  $F = Rp/2h$ ， $F$  为材料应力， $R$  为半径， $h$  为探测壁厚， $p$  为工作气体压力。

## Neher改进积分电离室

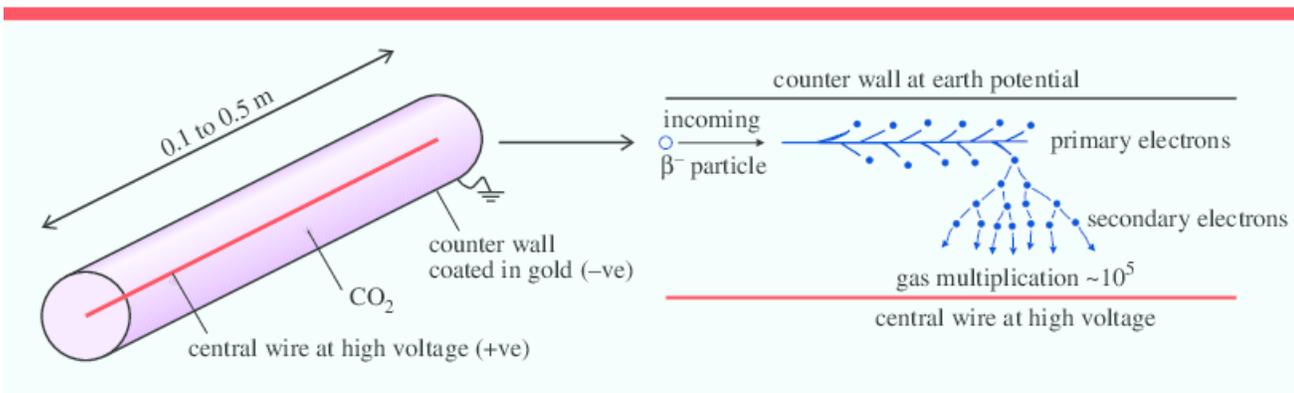


图片来自网络 ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mariner\\_2\\_ionization\\_chamber.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mariner_2_ionization_chamber.png))

### (3) 正比计数器

工作在正比区的气体探测器。优势在于同样能量的入射粒子，正比计数器输出的脉冲幅度是电离室的M倍，且在工作电压一定的情况下，放大倍数M只与工作气体有关，可以很好的保持电压脉冲与能量损失的线性关系。

- 要求：高电场加速次级电子，产生次级电离
- 设计：（1）圆柱形结构，在中央阳极产生强电场；（2）避免光子的光电效应



图片来自An illustrated guide to measuring radiocarbon from archaeological samples

#### 基本参数

- 坪特性
- 探测效率
- 能量分辨率
- 寿命

- 用途：低能电子、X射线、中子等

## (4) GM探测器

在GM区，电场强，放大倍数高，输出脉冲幅度最大，探测效率100%。

**基本原理：**圆柱形设计，中心阳极获得高电场。探测器光电子效应明显， $M \sim \infty$ ，离子增值扩展整个探测器内，并由于空间电荷屏蔽效应使得增值停止，脉冲幅度达到饱和。

### 基本过程

- 离子增值和停止（空间电荷效应）
- 连续放电猝灭

### 基本参数

- 坪特性：与入射粒子种类无关，但电压敏感
- 探测效率：100%
- 寿命
- 应用：监测带电粒子的有无，无法鉴别粒子种类

## 5. 半导体探测器

### (1) 基本工作原理

**特点：**能量分辨率好，线性响应好，脉冲上升快。

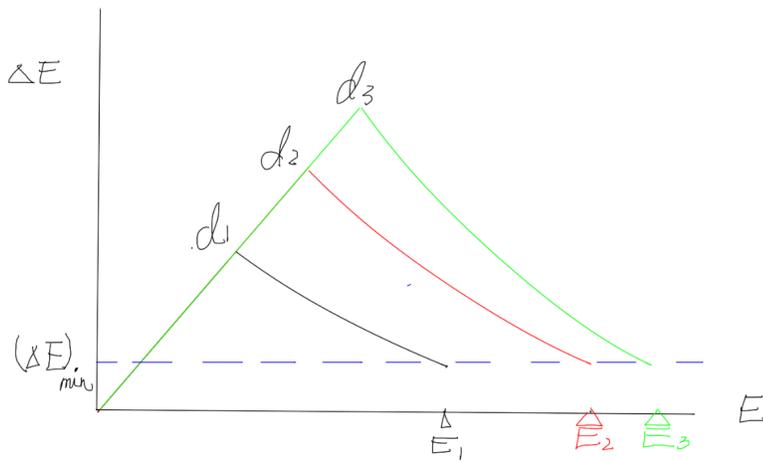
**原理：**与气体相似，但工作物质为半导体，也称为**固体电离室**。即利用加反偏电压的P-N结作为探测器的电离区，当带电粒子进入PN结灵敏区，产生电子-空穴对，在电场作用下向阳极、阴极运动。

### 主要参数

- 窗厚：死层，非灵敏区
- 灵敏区厚度
- 正向与反向电流特性（伏安特性）
- 能量分辨率
- 线性响应
- 脉冲上升时间

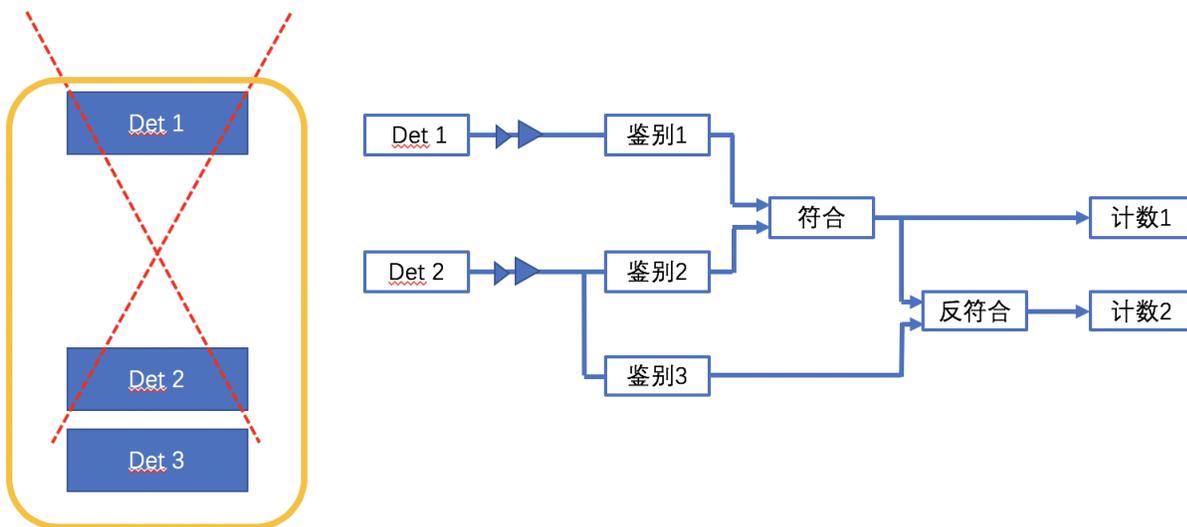
### 应用

1. 探测器电离能量损失 $\Delta E$ 与粒子能量 $E$ 的关系



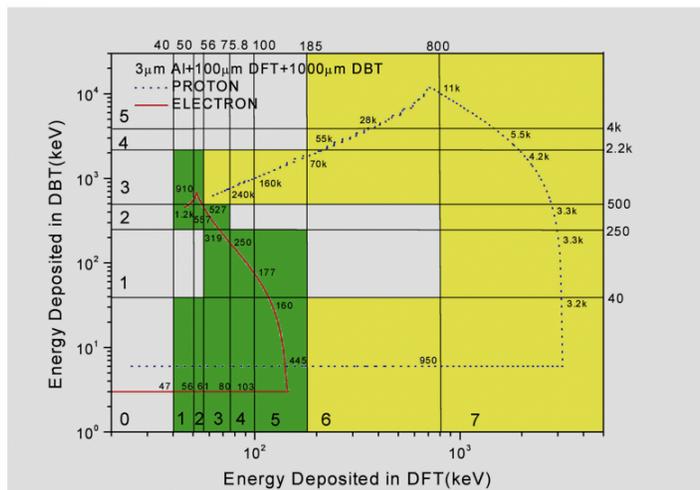
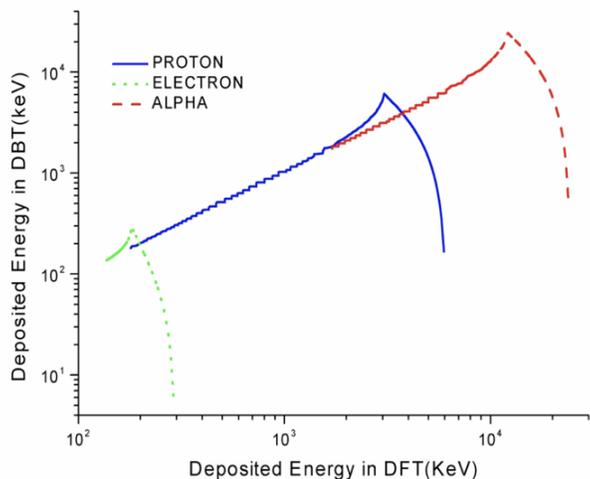
## 2. 方向探测：望远镜结构

例子：探测特定方向  $E > 10\text{Mev}$  ,  $E > 30\text{Mev}$  的质子强度。



## (2) 粒子种类测量方法

$\Delta E - E$  双曲方法



图片来源网络

- 基本结构:  $\Delta E$  探测器 ( $D_1$ ) ,  $E$  探测器 ( $D_2$ ) , 反符合探测器 ( $D_3$ )
- 工作方式:  $D_1 \cdot D_2 \cdot \overline{D_3}$
- 工作原理: 详见课堂讲解

## 能量—射程法

能量在10-100Mev的带电粒子的能量 $E$ 和在探测器的射程 $R$ 之间满足经验关系  $R = aE^b$ , 其中  $b$ 为常数 ( $=1.73$ ) ,  $a$  随入射粒子的不同而不同 (详见课堂讲解) 。

粒子种类	a的数值
He <sup>++</sup>	0.295
H <sup>+</sup>	3.22

**思考:** 利用厚度为 $T$ 的半导体, 设计基于能量-射程原理的方向探测器

## 飞行时间法

探测带电粒子 ( $E = 1/2Mv^2$ ) 在探测器飞行一定距离 ( $d$ ) 所需要的时间和带电粒子的能量 $E$ , 从而确定粒子质量。

$$t = \frac{d}{v} \Rightarrow t^2 = \frac{d^2}{v^2} = \frac{\frac{1}{2}Md^2}{\frac{1}{2}Mv^2} = \frac{Md^2}{2E}$$

$$\text{那么 } Et^2 = \frac{d^2}{2}M$$

# 6. 闪烁体探测器

## (1) 基本工作原理

**工作原理:** 带电粒子入射到闪烁体损失能量, 激发闪烁体产生光子, 将光子收集并转换为光电子进行探测的过程。

**基本组成:** 闪烁体, 光导, 光电倍增管  $\Rightarrow$  闪烁体探头

**工作过程:** 详见课堂讲解

## (2) 探测器的组成

### 闪烁体

- 特点: 发光效率高, 快发光衰减, 好的能量响应

- 分类：有机/无机，固体/液体/气体

## 光电倍增管

- 构成：光阴级，倍增极，阳极
- 原理：光电效应与电子雪崩放大
- 参数：灵敏度，倍增系数，暗电流与热噪声，时间响应

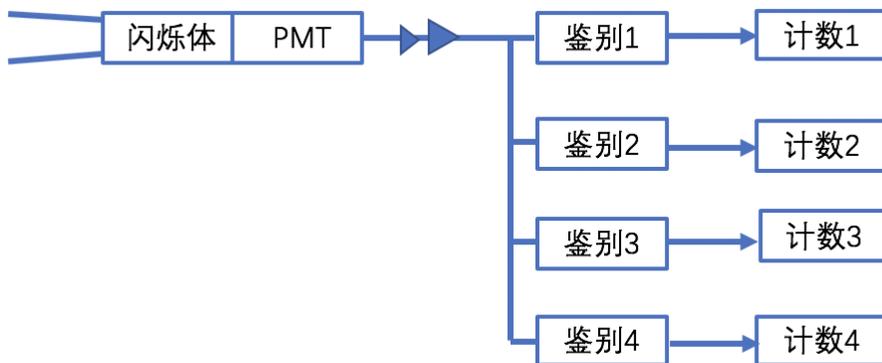
## 光导

- 结构：反射层、耦合层、光导

## (3) 简单应用

**例子：**利用方向探测，测量地球辐射带电子、质子强度。给出电子和质子如下表所示的能段分布（详见课堂讲解）。

粒子种类	能量范围
电子	>0.25Mev
电子	>0.45Mev
电子	>0.65Mev
质子	>5Mev



## 7. 高能粒子探测

对于相对论粒子，前面各种探测中直接能量损失都很小，需要借助其他机制—**切伦科夫辐射**。

- 切伦科夫辐射方向角： $\cos \theta = \frac{c}{nv} \Rightarrow \theta = \cos^{-1} \frac{1}{\beta n}$
- 在一定介质 $n$ 中，辐射角度变化范围  $0 \leq \theta \leq \cos^{-1} \frac{1}{n}$

## 切伦科夫辐射特征

- $\theta = 0 = \theta_{min}$  , 是产生切伦科夫辐射的最小速度  $v_{min} = c/n, \beta_{min} = v/c = 1/n$  , 那么, 可求  $E_{min}^T = (\frac{n}{\sqrt{n^2-1}})Mc^2$
- $\theta = \theta_{max} = \cos^{-1} \frac{1}{n}$  , 可以得到工作介质中带电粒子辐射最大的辐射角度

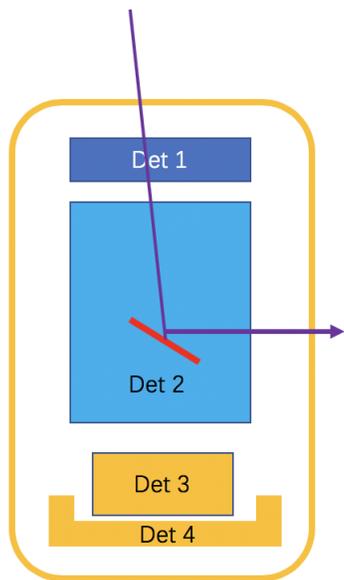
工作物质	折射率n	电子 $E_{min}$	质子 $E_{min}$	$\theta_{max}$
He	1.000035	61Mev	112kMev	~1.3deg
空气	1.000293	21Mev	38kMev	~1.3deg
CO2	1.00045	16Mev	30kMev	~1.3deg
H2O (液)	1.333	0.2Mev	0.488kMev	~41deg

## 切伦科夫辐射探测器

- 组成: 切伦科夫辐射体
- 要求: 可以固/液/气, 对可见光和紫外透明, 折射率适当, 密度小, 无闪烁

## 高能电子望远镜

- 要求探测15Mev以上高能电子 (详见课堂讲解)



## 8. 低能粒子探测

前面各种探测器都有探测能量下限, 空间中存在大量低能带电粒子

- 太阳风粒子