

## 考点一：射线与物质的相互作用

### (1) Bethe 公式

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi k^2 e^4 N_A}{m_e c^2} \frac{z^2}{\beta^2} \frac{\rho Z}{A} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \delta(\beta) - \frac{c}{Z} \right]$$

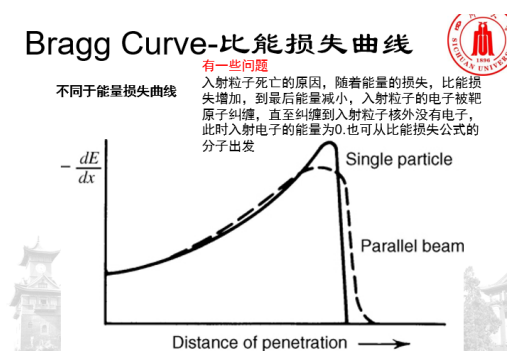
0.307 MeV cm<sup>2</sup>/g      Incident particle      absorber      Unit [dE/dx] = MeV /cm

•  $T_{max}$ : max kinematic energy transferred from particle ( $M$ ) onto electron

$$T_{max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e / M + (m_e / M)^2} \approx \begin{cases} 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 & \gamma m_e \ll M \\ \gamma M c^2 & \gamma \rightarrow \infty \end{cases}$$

### (2) Bragg curve

#### Bragg Curve-比能损失曲线



1. 带电粒子的电离能量损失率( $-dE/dx$ )与入射带电粒子的质量的关系为？与入射带电粒子的原子序数  $z$  的关系为？

Features of stopping power:

1. Independent of the mass of the particle.
2. Proportional to  $z^2$  of particle.
3. Depends on the speed  $v$  of particle.

$$dE/dx \propto 1/v^2 \text{ at low energy}$$

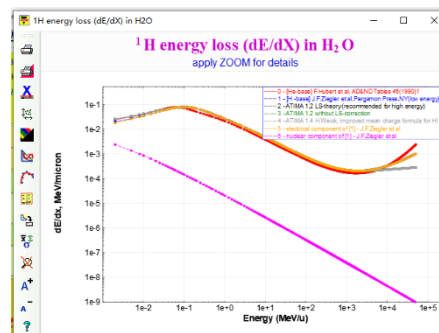
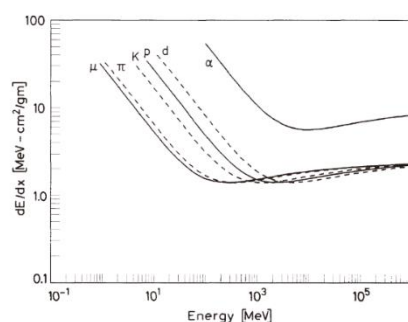
$$dE/dx \propto \ln(v^2) \text{ at high energy}$$

4. Proportional to  $\rho Z/A$ .

答：与入射粒子质量无关： $-\frac{dE}{dx} \propto z^2$

2. 在 1MeV-1000MeV 能量范围内， $\alpha$  粒子的( $dE/dx$ )随着能量增加而减少(填增加或减少)

The stopping power  $dE/dx$  as function of energy for different particles



- 重带电粒子的能量损失主要通过**电离**和**激发**，在 1MeV 以上**电离**为主；电子的能损主要通过**电离**和**韧致辐射**为主，**韧致辐射**随着能量增加的贡献所占的比例变大。
- 写出利用望远镜法、脉冲形状甄别法进行粒子鉴别的原理。

**望远镜法：**望远镜探测器由  $dE/dx$  探测器与测量能量厚的半导体探测器(能量分辨率高)

联合构成。对于非相对论粒子，比能损失公式可改写为： $\frac{dE}{dx} \propto \frac{mz^2}{E}$  ( $E$  是入射粒子动能， $m$  是入射粒子质量， $z$  是入射粒子电荷数。)入射粒子在  $dE/dx$  探测器中损失的能量可忽略，则后探测器的输出信号正比于  $E$ 。将两种探测器的输出信号相乘，则乘积正比于  $mz^2$ ，与能量无关。当有多种入射粒子时，只要  $mz^2$  不同，那么它们在乘积信号的脉冲幅度上就处于不同的位置，这样就达到了确定粒子性质的目的。

**脉冲形状甄别：**例如在有机液体闪烁体中，根据量子力学，入射粒子的  $dE/dx$  越高，闪烁光里慢成分越多。在实验中，入射粒子在液闪和光电倍增管后产生的信号尾部面积与脉冲总面积相比的值越高，说明粒子的  $dE/dx$  越高。例如中子和  $\gamma$ ，由于中子在有机液闪中发生弹性碰撞的截面高于  $\gamma$  与液闪发生反应的截面，因此在实验中可判断信号尾部面积与脉冲总面积相比的值高的波形为由中子产生的信号。

## 考点二：探测器的使用

- 【气体探测器】**简述带电粒子在电离室区和正比区发生的物理过程。写出在本课程中出现的几种气体探测器的名称，至少 5 种，并指明工作在某一区。

**电离室区：**

电离室的工作特点是：在电离室两电极间的灵敏体积内构建一电场，其强度足以避免离子对复合的发生，入射带电粒子在该灵敏体积内电离形成离子对，离子对在电场的作用下产生定向漂移，从而在回路中输出电流信号。下面将以平板形电离室为例分析，对圆柱形和球形电离室的分析方法是相似的。

**正比区：**

正比计数器的工作特点：在正比管中加入一定大小的电场。(接下面)相比于电离室，一个入射带电粒子在正比管中能引起更多的电子离子对，从而起到信号放大的作用

电场强度的函数。假如电场强度大到使电子的动能等于或大于**气体分子的电离能时**，就能发生**碰撞电离**，而碰撞电离产生的电子又会进一步引起碰撞电离，而呈现级联倍增的过程，这种**气体放大过程称为汤森雪崩**。把能导致雪崩发生所需要的最小电场强度定义为**阈场  $\mathcal{E}_T$** ，对典

**饱和区：**电离室 **正比区：**正比计数器 **MWPC (多丝正比计数器)** **drift chamber (漂移室)** **盖革区：**盖革计数器 **放电区：**(再确认一下)

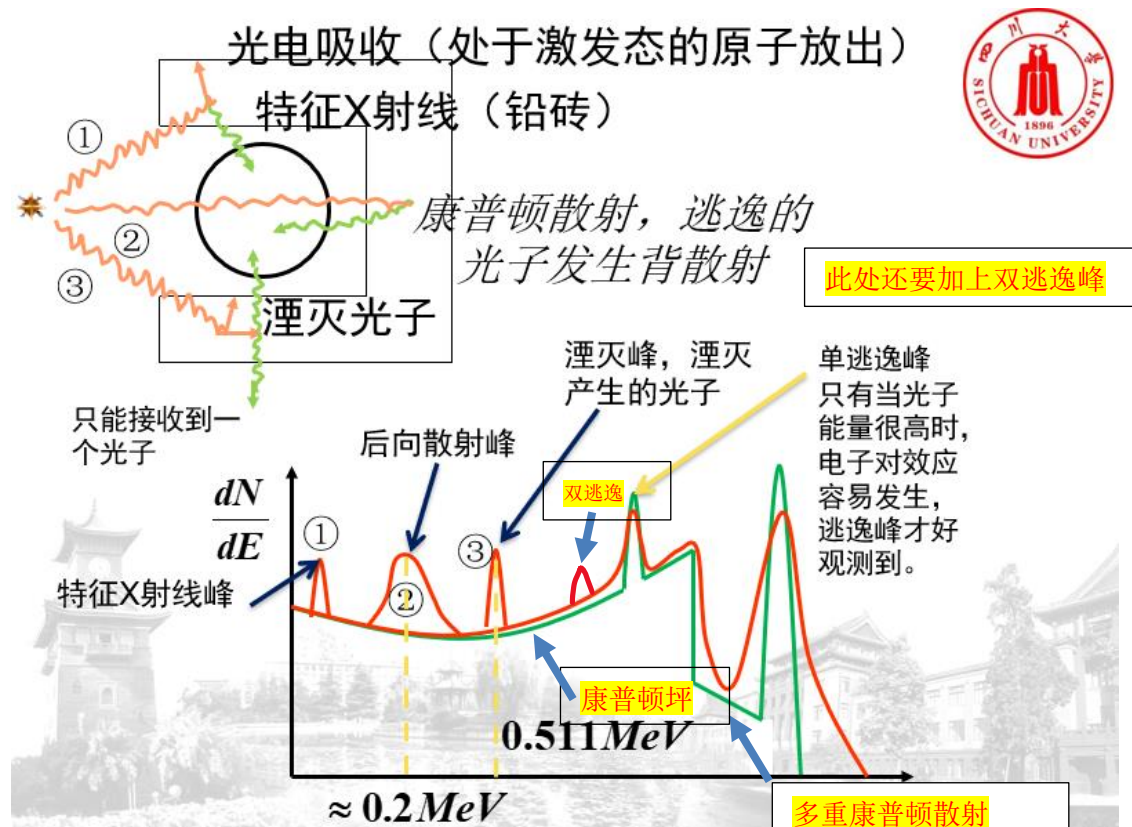
- 【闪烁体探测器】**按衰减时间(decay time)由小到大的顺序排序 NaI, BaF<sub>2</sub>, plastic? 衰减时间依次从小到大：**BaF<sub>2</sub> (快)** **plastic** **NaI** **BaF<sub>2</sub> (慢)**

材料	发射谱极大值的波长 $\lambda_m/\text{nm}$	发光衰减时间常数 $\mu\text{s}$	$\lambda_m$ 的折射率	密度 $\rho /(\text{g}/\text{cm}^3)$	光输出/(光子数/keV)	X/γ 相对光输出 (双碱光阴极)/%	是否潮解
碱金属卤化物							
NaI(Tl)	410	0.23	1.85	3.67	38	100	严重
BaF <sub>2</sub>	220,310	0.0006,0.63	1.56	4.89	1.8,10	3,16	否

表 9.3 某些有机闪烁体商品的性能

	闪烁体	密度	折射率	闪点温度/℃	光输出 (意为100) <sup>a</sup>	主要成分的衰 减常数 /ns	最大发 射谱的 波长 /nm	加载元 素及含 量(重量 百分比)	H/C (H原子 数/C原 子数)	主要应用 <sup>b</sup>
晶 体	蒽 芪	1.25	1.62	217	100	30	447		0.715	γ, α, β, 快中子
		1.16	1.626	125	50	1.4	410		0.858	快中子, PSD, γ 等
塑 料	BC-400	1.032	1.581	70	65	2.4	423		1.103	γ, α, β, 快中子
	BC-404	1.032	1.581	70	68	1.8	408		1.107	快计数
	BC-420	1.032	1.58	70	64	1.5	391		1.100	超快定时, 薄片
	BC-430	1.032	1.58	75	45	16.8	580	红发射	1.108	硅二极管, 红光阴极管
	BC-434	1.049	1.59	100	60	2.2	425		0.995	γ, α, β, 快中子
	BC-454	1.026	1.58	75	48	2.2	425	B 5%	1.169	中子谱仪, 热中子

7. 【闪烁γ谱仪】能量为2MeV的单能γ光子被NaI+PMT探测器所探测。(1)画出能谱( $dN/dE$ ),标注主要特征。简述谱中各特征的产生机制。如果探测器的灵敏体积由小到大发生变化,能谱将发生什么变化?描述课上讲过的γ能谱测量中降低compton散射对低能区影响的两种方法。



**全能峰:** 峰位 2MeV, γ 通过与物质发生光电效应、多重康普顿散射、电子对效应, 及次级粒子与闪烁体发生后续反应, 将全部能量全部沉积在闪烁体中, 形成全能峰。

**康普顿坪:** γ 与闪烁体发生康普顿散射后将一部分能量沉积在闪烁体中。

**多重康普顿散射:** γ 与闪烁体发生多重康普顿散射, 将几乎全部能量沉积在闪烁体中, 通过发生多重康普顿散射的 γ 沉积的能量上限为 2MeV。

**单逃逸峰:** 峰位  $2 - 0.511 = 1.489\text{MeV}$ ; 当入射 γ (能量为 2MeV) 与闪烁体发生电子对效

应时，将产生正负电子对。正负电子对在闪烁体中通过电离激发致辐射损失能量，当正电子动能为 0 时，会与原子核外电子发生湮灭，产生一对方向相反能量同为 511keV 的光子对。当这对光子中的一个逃逸后，沉积在闪烁体中的能量为 2MeV 减去 0.511keV。

**双逃逸峰：**峰位  $2 - 0.511 \times 2 = 0.978\text{MeV}$  (数量少于单逃逸) 当这对光子对都逃逸后，沉积在闪烁体中的能量为 2MeV 减去 1.022MeV。两个光子都出逃的概率小于单光子出逃的概率，因此双逃逸峰低于单逃逸峰。

(以上过程均为 2MeV  $\gamma$  直接与闪烁体发生反应得到)

(以下过程为 2MeV  $\gamma$  直接与周围屏蔽物质发生反应后，出逃的  $\gamma$  或 X 射线与闪烁体反应得到，屏蔽物质以 Pb 为例，考试的时候字数太多就不写)

**湮灭峰：**峰位 0.511MeV。2MeV 的  $\gamma$  与 Pb 发生电子对效应，后发生正电子湮灭，产生的一对方向相反的 511keV 光子对之一进入了闪烁体中。

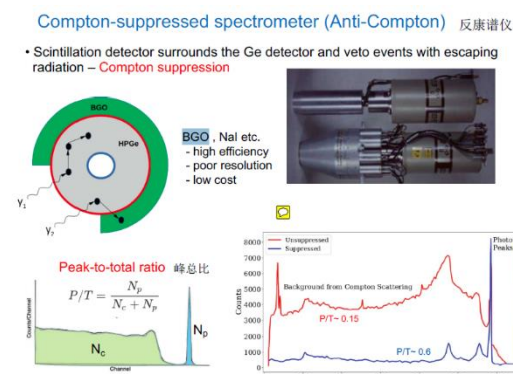
**后向散射峰：**大约 0.2MeV。2MeV 的  $\gamma$  与 Pb 发生康普顿散射后，散射角为  $180^\circ$  的  $\gamma$  逃逸出来被探测到，能量大约为 0.2MeV。

**特征 X 射线峰：**若周围屏蔽材料是 Pb，Pb 的特征 X 射线能量大约 70keV 左右。2MeV 的  $\gamma$  与 Pb 发生光电效应后，Pb 原子核外电子跃迁至内层发出 X 射线，X 射线按角度分布进入到闪烁体中被探测到。

当探测器的灵敏体积由小到大发生变化，能谱将发生什么变化? (不考虑 Pb，因为字数太多)

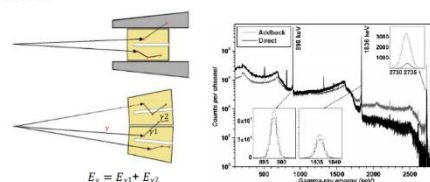
灵敏体积变大，探测效率增加，被探测到的  $\gamma$  射线沉积的能量也增多。全能峰面积和多重康普顿散射增加，其他峰位包括康普顿坪减小。等探测器的灵敏体积“无限大”时，只剩下全能峰。

$\gamma$  能谱测量中降低 Compton 散射对低能区影响的两种方法：



#### Composite Ge detectors

- Composite detectors
  - consisting of several closely packed crystals in the same cryostat
- The energy of gamma-rays scattered from one crystal to other is obtained by **add back**
- Addback: If energy deposited in two crystals, treat as a single incident gamma ray – **add energies**
- 4x40% crystals in addback mode become effectively a 220% photopeak efficiency detector



**方法 1：**利用 BGO 和半导体探测器组成的反康谱仪。如果半导体探测器和包裹在半导体探测器外侧的 BGO 探测器同时有信号输出，则可以利用反符合的方式，拒绝在半导体中产生的信号，这样最后半导体探测器输出的信号就只有全能峰的信号。(BGO 探测效率大)

**方法 2：**复合锗探测器。设置多块锗探测器，若某一  $\gamma$  先后在多个小探测器中沉积能量产生信号，则可通过符合的方式把多个探测器的输出信号幅度相加，以此增加最后能谱的峰康比。

8. 【半导体探测器】用金硅面垒探测器测  $^{210}\text{Po}$  的  $\alpha$  粒子能谱。

(1) 逐步增高反偏电压时观察到的脉冲幅度和分辨率有何变化，原因是什么?

随着反偏电压增加，耗尽层增大，半导体探测器的灵敏区体积增加，射线沉积的能量增多 (灵敏区的体积还不足以沉积射线全部能量时)，脉冲幅度将会



增加，体现在脉冲幅度谱上峰的位置将会右移。又由于半导体探测器的能量分辨率满足 $\eta \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$ ，因此随着粒子在耗尽层中沉积能量增加，该峰的能量分辨率还会变小（体现出来峰更窄）。等到反偏电压继续增加至灵敏区的体积足以沉积射线全部能量时，脉冲幅度不变，能量分辨率也几乎不变。

(2) 描述利用 alpha 放射源确定探测器工作偏压的方法。

持续加反向电压，加到粒子能量不变了，脉冲幅度不再变化，体现在脉冲幅度谱上是峰位不变了，那么这个电压就是足够的耗尽层电压。）

9. 【半导体探测器】硅探测器和塑料闪烁体探测器都是  $\beta$  射线探测中常见的探测器。对于能量测量和活度测量应优先使用哪种探测器？为什么？(5)

硅探测器用于能量测量，塑料闪烁体探测器用于时间测量。硅探测器能量分辨率优于塑料闪烁体探测器，因此用于能量测量；塑料闪烁体探测器输出的信号持续时间小于硅探测器输出的信号持续时间，小的信号持续时间有利于减少信号堆积，适用于活度测量。

### 考点三：核电子学

10. 【阻抗匹配】从电路负载和阻抗匹配对信号的影响的角度，描述能量路和时间路电子学的前后两级的  $Z_{out1}$  和  $Z_{in2}$  之间分别满足什么条件，为什么？(5)

对于能量路：在能量测量中需要测量慢信号，最好使  $Z_{out1} \ll Z_{in2}$ ，这样当一个负载被连接时，信号电平就不会改变。

对于时间路：对于时间测量需要使用快信号，需要有  $Z_{out1} = Z_{in2}$ ，防止信号反射

11. 简述前置放大器和主放大器的功能(5)

前置放大器：在远距离传输之前先对信号进行初步放大和处理（1）提高系统的信噪比（2）减小外界干扰的相对影响；（3）与探测器紧密相连，合理布局，便于调节和使用（4）前置放大器是在探测器和主放大器之间作为一个阻抗转换器，实现阻抗转换和匹配。

主放大器：

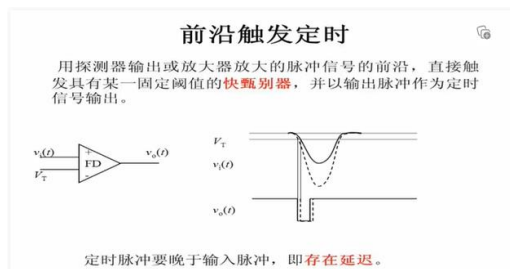
## 谱仪放大器的功能

主要功能是放大和成形。

- 放大：将前置放大器的输出信号进一步放大，以便于后面的电路对其进行处理和分析。
- 成形：将前置放大器的输出信号成形为一定形状，既满足后续分析测量设备的要求，有利于高计数率下工作，并可以进一步提高信噪比。

经过谱仪放大器输出的信号顶端还要平，这利于后面幅度分析

12. 简述**前沿甄别**和**恒比定时甄别**的定时原理及适用范围

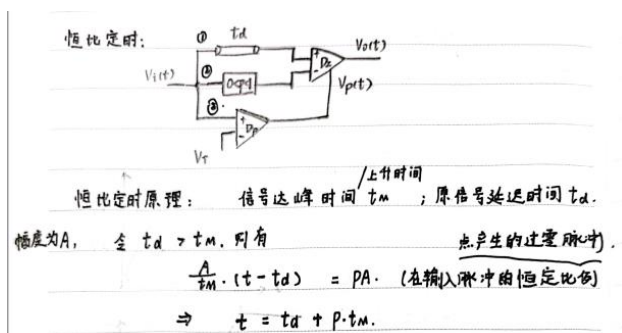


前沿甄别：（定时原理）

（要确保该阈值大

于噪声电平）适用于信号上升时间及幅度变化小的情况

恒比定时甄别：

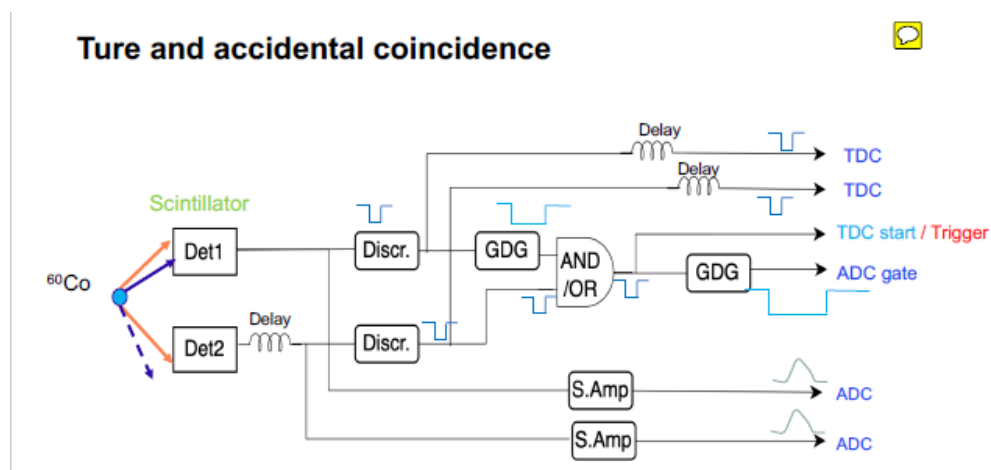


适用于快响应探测器系统（如有机闪烁体、面垒型半导体探测器）

13. 用两个 HPGe 探测器来测量活度为  $n_0$  的  $^{60}\text{Co}$  放射源的一对  $\gamma$  光子，探测器探测效率分别为  $e_1$  和  $e_2$ ，两个探测器时间信号的宽度均为  $\tau$ 。

a)画出符合法测量  $^{60}\text{Co}$  的两个 gamma 是否有级联关系的电路框图(5)

（包含前置放大器，分路器，时间甄别，Delay，符合单元，触发(Trigger)，ADC，TDC,ADC gate, TDC start）



b)给出用符合法测得的真符合和偶然符合的计数率(5)

设探测器 1 对源所张的立体角为  $\Omega_1$ ，探测器 2 对源所张的立体角为  $\Omega_2$ ，设  $\Omega_1 < \Omega_2$

探测器 1 计数率：  $2 n_0 \Omega_1 e_1$  （因为  $^{60}\text{Co}$  一次衰变发出两个  $\gamma$ ）

探测器 2 计数率：  $2 n_0 \Omega_2 e_2$  （因为  $^{60}\text{Co}$  一次衰变发出两个  $\gamma$ ）

真符合：  $2 n_0 \Omega_1 e_1 e_2$  （能进入  $\Omega_1$  就一定能进入  $\Omega_2$ ）

偶然符合：  $8 n_0 \Omega_1 e_1 \tau n_0 \Omega_2 e_2$  （或者  $8 n_0^2 \Omega_1 e_1 \Omega_2 e_2 \tau$ ）

#### 考点四：概率统计

14. 试用误差传递公式求出飞行时间法(TOF)测量中子能量  $E_n$  的相对误差 (不考虑 start 探测器时间分辨), 并讨论减少测量误差的方法。(10)

符号: 飞行距离  $L$ , 飞行时间  $t$ , stop 探测器厚度  $\Delta L$ , Stop 探测器时间分辨  $\Delta t$

Experiment observables:  $x: \bar{x} \pm \sigma_x$   
 $y: \bar{y} \pm \sigma_y$   $\longrightarrow$  Derived quantity  $f(x, y): f(\bar{x}, \bar{y}) \pm \sigma_f(?)$

$$f - \bar{f} \approx \frac{\partial f}{\partial x}(x - \bar{x}) + \frac{\partial f}{\partial y}(y - \bar{y}) \quad \bar{f} = f(\bar{x}, \bar{y})$$

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (f_i - \bar{f})^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x}(x_i - \bar{x}) + \frac{\partial f}{\partial y}(y_i - \bar{y}) \right]^2$$

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{N-1} \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right]$$

$$\sigma_{x,y} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad \text{covariance} \quad \text{协方差}$$

$$\sigma_f^2 = \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 \sigma_x^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \sigma_y^2 + 2 \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} \sigma_{x,y}$$

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

$$v = \frac{L}{t}$$

$$E_n = \frac{mL^2}{2t^2}$$

$$(\Delta E_n)^2 = \left( \frac{\partial E_n}{\partial L} \Delta L \right)^2 + \left( \frac{\partial E_n}{\partial t} \Delta t \right)^2$$

$$= \left( \frac{mL}{t^2} \Delta L \right)^2 + \left( -\frac{mL^2}{t^3} \Delta t \right)^2$$

$$\left( \frac{\Delta E_n}{E_n} \right)^2 = \left( \frac{2\Delta L}{L} \right)^2 + \left( \frac{2\Delta t}{t} \right)^2$$

$$\frac{\Delta E_n}{E_n} = \sqrt{\left( \frac{2\Delta L}{L} \right)^2 + \left( \frac{2\Delta t}{t} \right)^2}$$


#### 减少测量误差的方法:

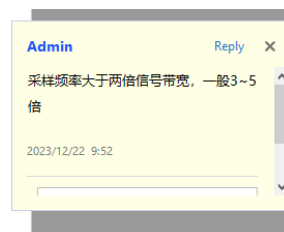
- (1) 增大飞行距离  $L$ /时间  $t$ ;
- (2) 选用密度大的阻止探测器以减小  $\Delta L$ ;
- (3) 选用时间分辨小的 stop 探测器以减小  $\Delta t$ ;

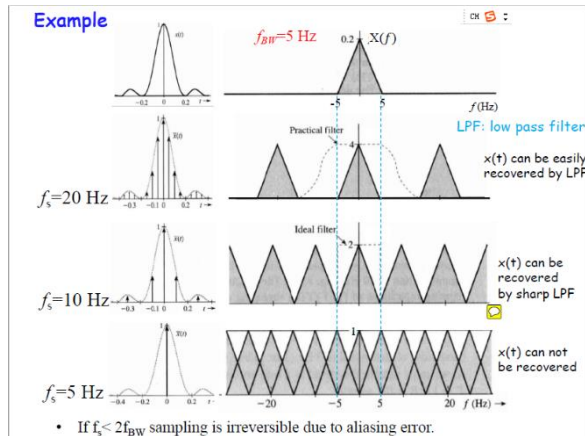
15. Gaussian 分布的 FWHM 与  $\sigma$  的关系为 **FWHM = 2.355 $\sigma$** ; 测量值  $x \pm \sigma$  意味着真值落在  $x - \sigma$  和  $x + \sigma$  之间的几率约为 **68.3%** (2)

#### 考点五：数字化

##### 【采样处理】【数字 ADC】

-  尼奎斯特频率
- $f_s = 2f_{BW}$  is generally known as the Nyquist Frequency, the minimum sampling rate that must be exceeded is known as the Nyquist Rate
  - A small sampling period is equivalent to a high sampling frequency, yielding spectra replicated far apart from each other. when the sampling period approaches zero ( $T_s \rightarrow 0, f_s \rightarrow \infty$ ), only a single spectrum appears — a result consistent with the continuous case.





The bandwidth of any real life analog signal is infinite.  
 $f_{BW} \rightarrow \infty$

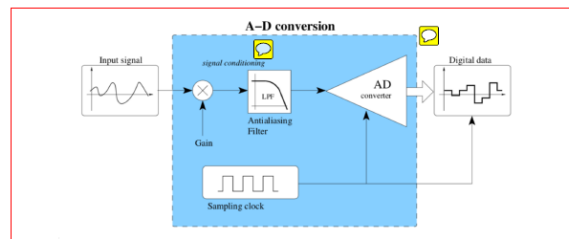
After sampling with  $f_s$ :

After reconstruction:

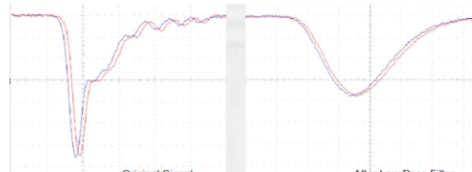
In practice, it is common to use an anti-aliasing filter to minimize aliasing when the analog signal is not band-limited.

- Use low-pass filter to restrict bandwidth of input signal  $f_{BW}$  to satisfy  $f_{BW} < 1/2 f_s$  for a given  $f_s$  before sampling. Then reconstruction can be done without distortion or corruption to lower frequencies

- Typical ADC configuration: The input signal is first amplified or attenuated in order to have an optimal match with the input range of the AD converter. A proper antialiasing filter is then applied before the sampling.



Effects of low pass filter



【梯形滤波】