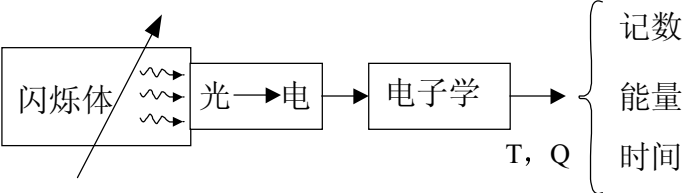


IV. 闪烁体探测器和 BES II 飞行时间探测器

吕军光

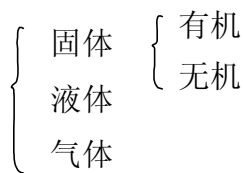
闪烁探测器

简单过程:



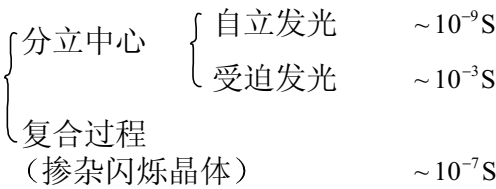
一、闪烁体

1. 分类



2. 发光机制

(1) 无机

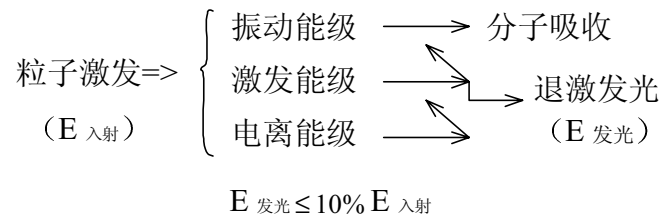


(2) 有机 (溶剂+溶质 (发光激活剂 5%))
 π 电子在聚合分子内部的行为

<1>能量传递

- a. π 电子在分子内部共振传递
- b. 辐射传递: 溶剂光 $\Rightarrow$ 溶质发光

<2>有机闪烁发光 $\sim 10^{-9}s$



- a. 溶剂发光强自淬灭
- b. 溶质发光与溶剂发光须光波匹配
- c. 高能激发与低能激发得到相同的发射光谱

二、闪烁体性能

1. 发射光谱

2. 发光光产额

$$\eta = \frac{\sum_i^N \varepsilon_i}{E}$$

(1) 相对 NaI(Tl) 光输出

标准: NaI(Tl): $\tau \sim 230 \text{ ns}$

(2) $N_{p,e}/\text{Mev}$

单光电子测量
 宽的频带响应

3. 发光率减时间

$$N = N_0 e^{-t/\tau}$$

(1) 发光上升时间: $10^{-11} \sim 10^{-9} s$

包括能量沉积, 能量传递, 退激发光达到最大时的时间。

(2) 发光率减过程: $1ns \sim 10^{-3}s$

$$N = \sum_i^M N_0 a_i e^{-t/\tau_i}$$

(3) 发光率减时间测量

a. 快光电倍增管, 快示波器相对测量。

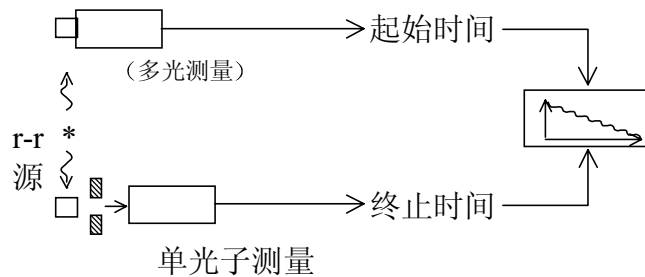
$$U = -V_0 \tau (e^{t/\tau_f} - e^{t/\tau}) / (\tau_f - \tau)$$

$$T_m = \tau_f \cdot [\tau / (\tau_f - \tau)] \cdot \ln(\tau_f / \tau)$$

测量过程: 用已知标准 τ_{f_0} 的样品, 测量出系统 τ , 然后再测量新样品得到 τ_f

b. 快激光脉冲、同步辐射延迟时间测发光强度

c. 单光子时间关联记数



4. 能量分辨率和线性

$$R = \Delta E / E \quad (\%) \quad \sigma_E = \frac{\Delta E}{2.35} / E$$

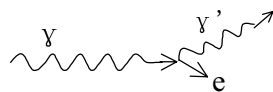
ΔE (能量谱半高宽) σ 标准偏差

(1) 低能能量分辨问题

a. γ 与晶体的作用。(综合)

*光电效应: $K = E_\gamma - E_e$ $E_e \begin{matrix} \nearrow e \\ \searrow x \end{matrix}$

*康普顿效应:



$$E_{\gamma'} = E_{\gamma}(a(1 - \cos \theta)/(1 + a(1 - \cos \theta)))$$

$$E_e \sim 0 - E = 2aE_{\gamma}/(1 + 2a) \quad a = \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2}$$

*正负电子对产生 $E_{\gamma} > 1.022\text{MeV}$

b. 伴随源 α 、 β 和周围材料的反散射

NaI(Tl)小晶体 $\Delta E/E \geq 6\%$ ，对 $(0.662\text{MeV } ^{137}\text{Cs } \gamma)$

(2) 高能 γ 簇射

大晶体或多晶体的联合信息 2% (1GeV)

电子学噪声，能量泄漏，光收集均匀性

(3) 有机闪烁体

只有 dE/dX (2MeV/cm)

单层 1cm (30%~100%) 郎道分布

多层: (铅+闪烁光纤)

(铅+闪烁条) $\sigma_E: 6\% \sim 3\%$ (1GeV)

(4) 线性

无机晶体 $\left\{ \begin{array}{l} \sim 20\text{KeV } x \text{ 发光最强} \\ \text{低温发光增强} \end{array} \right.$

与粒子的种类有关，关系到粒子的射程和 dE/dX ，所以对于重粒子，低能量区出现非线性。

5. 光率减长度

$$N(x) = N_0 e^{-x/\lambda}$$

(1) 与闪烁体的自吸收有关

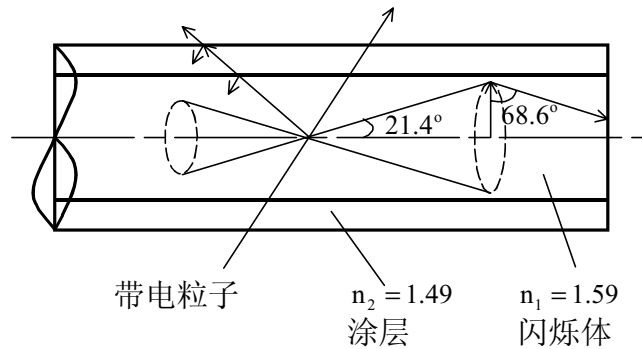
(2) 与闪烁体的几何尺寸有关



(3) 与反射层材料和反射方式有关

全反射、镜反射（伴有折射）、漫反射

闪烁光纤性能



- 特点：
- ① 只有~10%的闪烁发光可以传输读出；
 - ② 光传输较远，率减长度 3~10 米；
 - ③ 闪烁光脉冲较窄。

6. 探测效率

{	无机	{	高能测量	{	发光强度
			(γ, π^0)		电子学噪声
{	无机	{	低能测量	{	能量分辨
			x,r(峰谷比)		高原子序数

{	有机（对带电粒子）	{	大尺寸远端位置的信噪比
			厚度、高压、甄别阈

7. 时间分辨

无机闪烁体只有几种可以提供时间测量 BaF_2 、 CsF

有机闪烁体的最重要特性（ $\tau \sim 2\text{ns}-10\text{ns}$ ）

经验公式： $\Delta t = A \sqrt{\tau_{\text{PMT}} \cdot \tau_{\text{Scint}} / N_{\text{P.e}}}$

(1) 光学特点

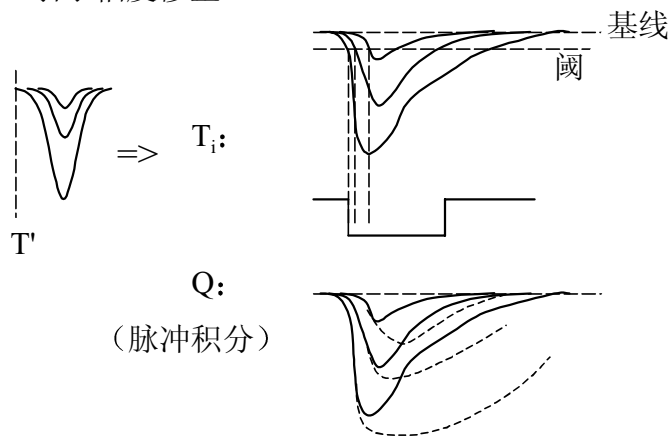
小闪烁体	$A \sim 1$	
大闪烁体	$A \gg 1$	τ_{Scint} : 包括发光, 光程差 $N_{\text{p.e}}$: 接收角, 自吸收

}

直射
 全反射
 漫反射

(2) 电子学

时间-幅度修正

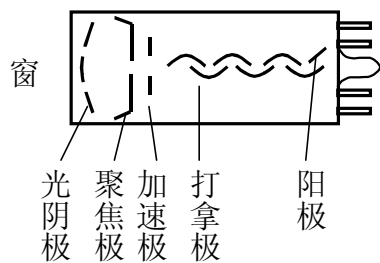


$$T' = T_i - a_0 \sqrt{Q_i} - \sum_j^3 a_j Q_i^j$$

三、光探测器

1. 光电倍增管（PMT）

(1) 结构



<1> 窗口材料

<2> 光阴极:

灵敏区 (不同材料)

量子效率: ~10%-25% (峰区)

<3> 打拿极结构:

环形, 盒式

直线形

丝网 (抗磁)

微通道板 (抗磁)

混合型, 半导体 (二极、三极) 探测器

(2) PMT 参数:

①光照灵敏度; ②电流放大; ③量子效率; ④光谱响应; ⑤阴极暗电流;

⑥磁场效应; ⑦线性; ⑧高压;

⑨时间特性

渡越时间 TTS

XP2020~30ns

R2490-05~8ns

脉冲上升时间 t_r

XP2020~1.6ns

R2490-05~2.5ns

渡越时间涨落 (单光电子) σ_{TTS}

XP2020 $\sigma \sim 250$ ps

R2490-05 $\sigma \sim 140$ ps

高压变化 ~ 10 ps/V

2. 微通道 PMT ($\phi \sim 1\text{cm}$)

TTS: 0.6ns t_r : 150ps σ_{TTS} : 25ps G: 10^5

3. 光二极管

4. 光成像器 CCD

5. 多丝室

新飞行时间探测器介绍

一、飞行时间探测器的结构和原理

1. 闪烁体 (BC_408):

Scin: 284cm (L) * 15.6cm (W) * 5cm (T)

Light guide: 16cm

*发光率减时间 (2.1ns)

*发射波长 (420nm)

*有效光传播速度 (16cm/ns)

*技术光率减长度 (4 m)

本征时间分辨 (~130ps)

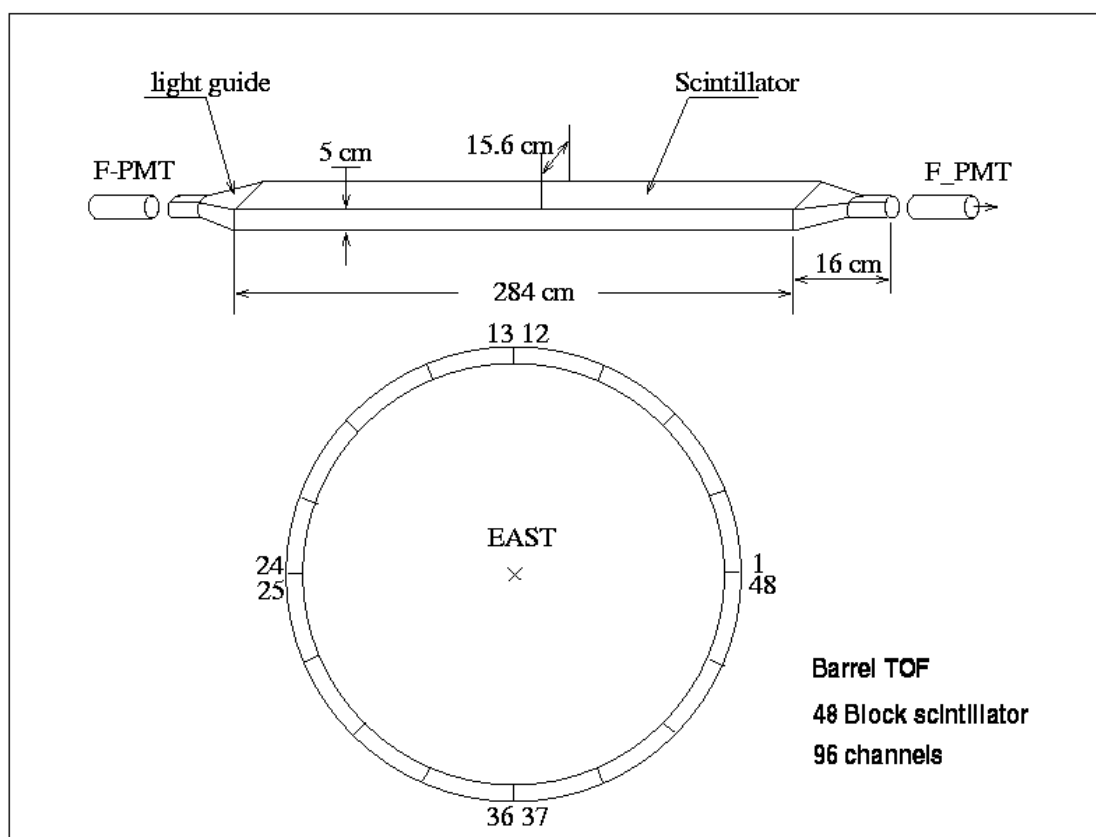


图 1 飞行时间探测器单元尺寸和分布示意图

表 1 新旧飞行时间探测器的比较

		New TOF	BES TOF
Scintillator	Size	15.6cm*5cm*284cm	15.6cm*5cm*284cm
	Type	BC-408	NE110
	Decay time	2.1 ns	3.3 ns
	Attenuation	4.4 m	2.5 m
Light guide	Size	16 cm(L)	112 cm(L)
	Material	UVT plexiglass	air 2# plexiglass
	Wrapping	Aluminum foil + black plastic tape	Black paper + black plastic tape
PMTs	Type	R2490-05(FM)	XP2020
	Photocathode sensitivity	Ø 36	Ø 44
	Gain	5×10^6 (at 2500V)	3×10^7 (at 2200V)
	Transit time	8.5 ns	28 ns
	Transit time variation (σ)	150 ps	250 ps
Laser monitor	Type	Dye liquid	N ₂
	Photo pulse	100 ps	300 ps
	Fibers location	Two end	Middle

二、飞行时间探测器的作用

1. 提供第一级触发

2. 排除宇宙射线 (Trig Gate: 40ns)

$$\delta T = \text{TOF (1)} - \text{TOF (2)}$$

$$* e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^- : \delta T = 0$$

$$* \text{宇宙射线: } \delta T > 4 \text{ ns}$$

3. 鉴别粒子: $\pi / K / P$

$$* \beta = p / \sqrt{(p^2 + m^2)}, \quad T = L / (c * \beta)$$

$$* W_i = e^{-(T_i - T)^2 / 2 \sigma^2} \quad i: \pi, k, p$$

$$* N_\sigma = (T_k - T_\pi) / \sqrt{(\sigma_k^2 + \sigma_\pi^2)} \sim (T_k - T_\pi) / (\sqrt{2} \sigma_t)$$

$$\sigma_t = 200 \text{ ps} \quad L = 120 \text{ cm}$$

$$(2 \sigma): k / \pi < 850 \text{ MeV}/c, \quad p/k < 1.4 \text{ GeV}/c$$

三、飞行时间的测量过程

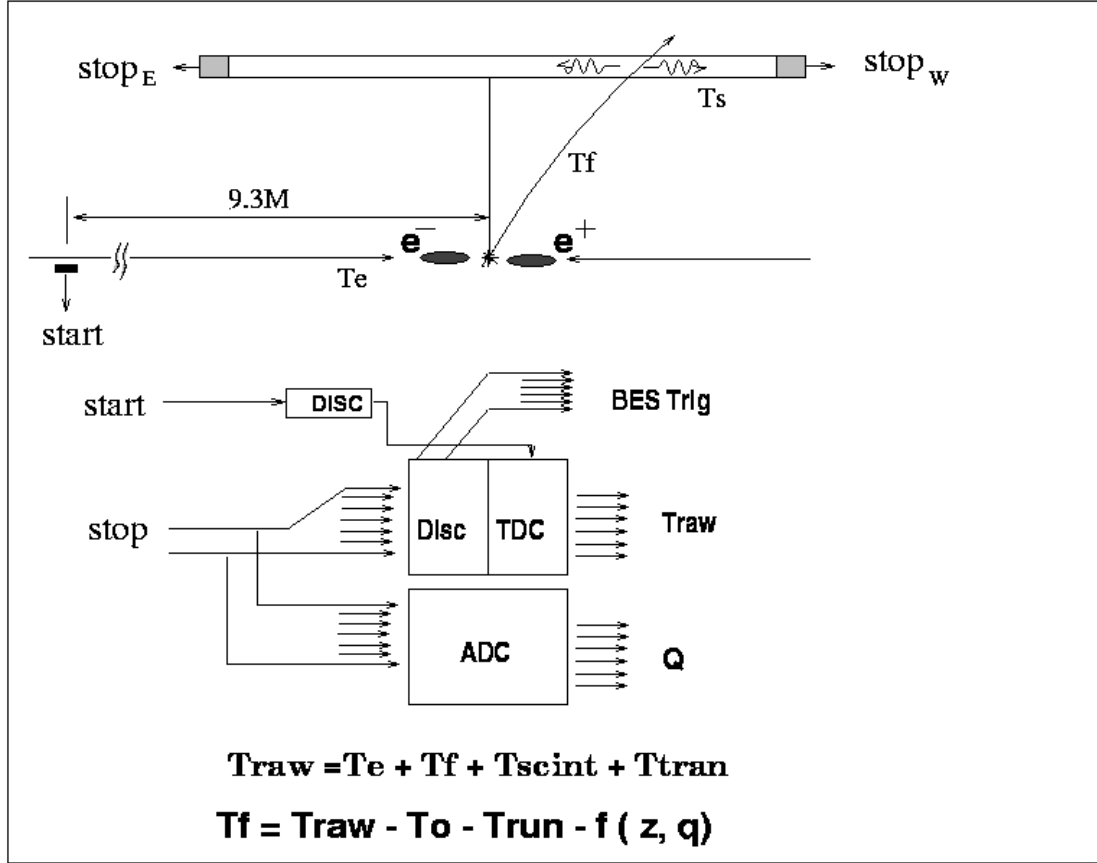


图 2 飞行时间测量原理图

$$1. \quad T_{raw} = T_{e^-} + T_f + T_{scint} + T_{tran}$$

$$T_f = T_{raw} - f(C_0, Z, Q)$$

2. 离线刻度

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$$

$$T^{E,W}_{raw} = T^{E,w}_{raw} - T_{exp} - T_{run} - C_0 - (C_1 + C_2 * Z / \sqrt{Q} - C_3 * Q - C_4 * Q^2 - C_5 * Q^3$$

$$- \frac{C_6}{1.157^2} / Z^2 - C_7 * Z - C_8 * Z^2 - C_9 * Z^3$$

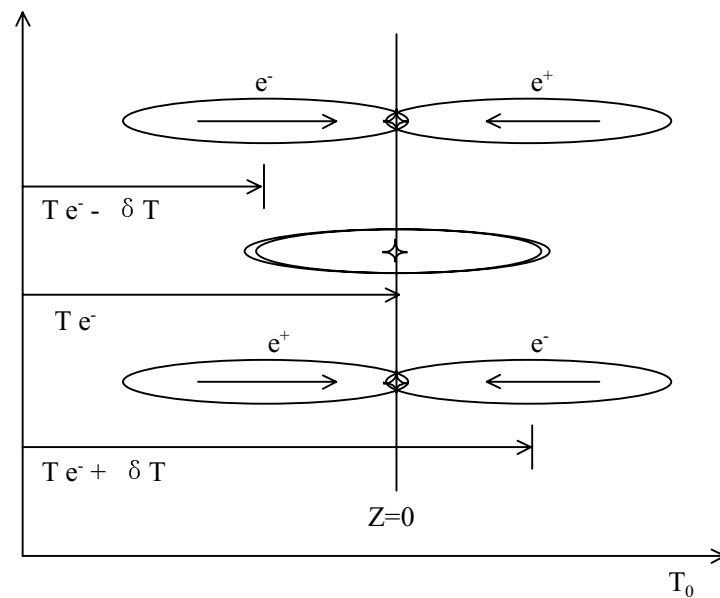
3. 事例重建

$$T = (T_E * W_E + T_W * W_W) / (W_E + W_W)$$

$$W_{E,W} = C_1' + C_2' * Z + C_3' * Z^2$$

四、构成系统时间分辨率的因素

1. 本征时间分辨率: $\sigma \sim 130 \text{ ps}$
2. 动量、径迹长度、击中位置的测量误差
3. 时间刻度参数的误差
4. 起始时间的涨落和随流强的变化: $5 \text{ ps} / \text{mA}$
5. 束团长度引起的时间不确定: $\sigma_t = \sigma_{\text{beam}} / \sqrt{2}$



6. 多粒子击中: $\sim 30\%$, 时间分辨 $\gg \sigma_t$

- * 末态粒子的二次击中: $< 10\%$
- * 外围物质(量能器)的次级粒子发射: $> 10\%$
- * 闪烁体内的 δ 电子发射: $\sim 15\%$

五、飞行时间探测器的运行

1. 电子学机箱分布(图3)
2. 高压运行(注入时禁加高压)
3. 数据直方图

