

量能器

胡涛

高能物理研究所

第一届粒子探测技术基础与前沿讲习班

南宁 2017,11,13

粒子探测的基本原理

- 粒子探测主要是指记录粒子数目，测定其强度，确定粒子的性质（能量、动量、飞行方向等）。
- 根据粒子的带电性质分类
 1. 带电粒子： α 、 e^{\pm} 、 μ^{\pm} 、 π^{\pm} 、 κ^{\pm} 、 p 等
 2. 电磁辐射： x 射线、 γ 射线
 3. 中性粒子： n 、 ν 等

带电粒子与物质的相互作用

带电粒子与介质的相互作用主要是电磁相互作用。

- **电离**：当入射带电粒子与介质原子较远时，使介质的原子产生电离或激发。
- **击出**：当入射带电粒子与介质原子距离 \approx 原子大小 (10^{-8}cm) 时，粒子与原子的电子相互碰撞，使电子从原子中发射出来。
- **库仑散射**：当入射带电粒子与介质原子距离 $<$ 原子半径，粒子在核的库仑场中受到核的库仑散射，并伴随弱的电磁辐射。
- **韧致辐射**：当入射为快速带电粒子时，将受核的阻尼而发射出光子。
- **契伦柯夫辐射**：当入射带电粒子速度超过光在介质中的相速度时，粒子会辐射出可见光。
- **穿越辐射**：当高速带电粒子穿过两种折射系数不同的界面时，辐射出X光。
- **同步辐射**：当电子在磁场中偏转时，相当于受到加速而产生辐射。

一、电离能损

1. 电离和激发

- 入射带电粒子与物质原子的轨道电子发生库仑相互作用而损失能量，轨道电子获得能量。当电子获得能量足以克服原子核的束缚，则电子就脱离原子成为自由电子。这就是**电离**。**电离的结果形成一对正离子和自由电子**。若内壳层电子被电离后，该壳层留下空穴，外层电子跃迁来填补，同时放出特征x射线或俄歇电子。
- 当电子获得能量较少，不足以克服原子核的束缚成为自由电子，将跃迁到较高的能级。这就是原子的**激发**。处于激发态的原子不稳定，作短暂停留后，将从激发态跃迁回到基态，这就是退激。**退激时，释放的能量以荧光的形式发射出来。**

2. 带电粒子能量的电离损失

- 电离损失带电粒子与核外电子的非弹性碰撞，导致原子电离或激发，是粒子损失动能的主要方式。
- 电离损失通常把某种物质中粒子通过单位长度所损失的能量称为该粒子在这种物质中的能量损失或称为该物质对这种粒子的阻止本领，用 $-\left(\frac{dE}{dx}\right)$ 表示。

$-\left(\frac{dE}{dx}\right)$ 大，表明这种粒子在该物质中的电离本领大，即该粒子通过单位长度物质损失的能量较多，即该物质对这种粒子的阻止本领大。

二、快速带电粒子的轫致辐射 (bremsstrahlung)

- 快速电子受介质原子核的电场作用而减速，轨迹发生偏转，伴随电磁辐射，能量以光子发射的形式损失掉，称为轫致辐射。

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{Brem} = 4\alpha N_0 \frac{Z^2}{A} r_e^2 E \ln \frac{183}{Z^{1/3}} = \frac{E}{X_0}$$

- 初始能量为E的电子，在穿过物质厚度X后的平均能量：

$$\langle E \rangle = E_0 e^{-X/X_0}$$

- 可见， X_0 是电子平均能量因为轫致辐射而减少为e分之一的物质厚度。称为**辐射长度**

$$X_0 = \frac{716.4 \cdot A(\text{g/mol})}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})} (\text{g/cm}^2)$$

- 当介质为化合物或混合物时，有：

$$\frac{1}{X_0} = \sum \frac{P_i}{X_i}$$

X_i 第i种成分的辐射长度，
 P_i 第i种成分的权重因子，重量百分比。

- 韧致辐射发射角是前向的，均方根发射角为：

$$(\langle\theta^2\rangle)^{1/2}=m_e c^2/E$$

- 带电重粒子：质量比电子大得多，受原子核的偏转较小，仅有较小的辐射损失。若粒子重**M**，则它的韧致辐射能损是同速度的电子的**(m_e/M)²** 倍。
- 韧致辐射的能量损失与介质的原子系数**Z²**成正比
实际工作中为了减少电子的韧致辐射本底，选用**Z**小的物质，如塑料、铝等材料做放射源的托片核支架。

- **临界能量**

辐射损失与电离损失相等时的粒子能量称为该介质的临界能量

对电子

$$E_c = \frac{800(MeV)}{Z + 1.2}$$

E > E_c，韧致辐射损失为主

E < E_c，电离损失为主

几种常用介质的辐射长度和临界能量

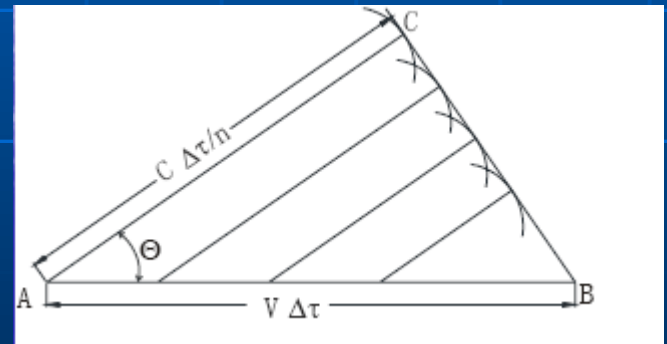
介质	$X_0(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$	$E_c(\text{MeV})$
H_2	63	140
Al	24	47
Ar	20	35
Fe	13.8	24
Pb	6.3	6.9
铅玻璃 SF_3	9.6	~ 11.8
Plexiglass	40.5	80
H_2O	36	93
碘化钠 $\text{NaI}(\text{TI})$	9.5	12.5
锗酸铋 BGO	8.0	~ 7

三、切伦科夫辐射Cherenkov radiation

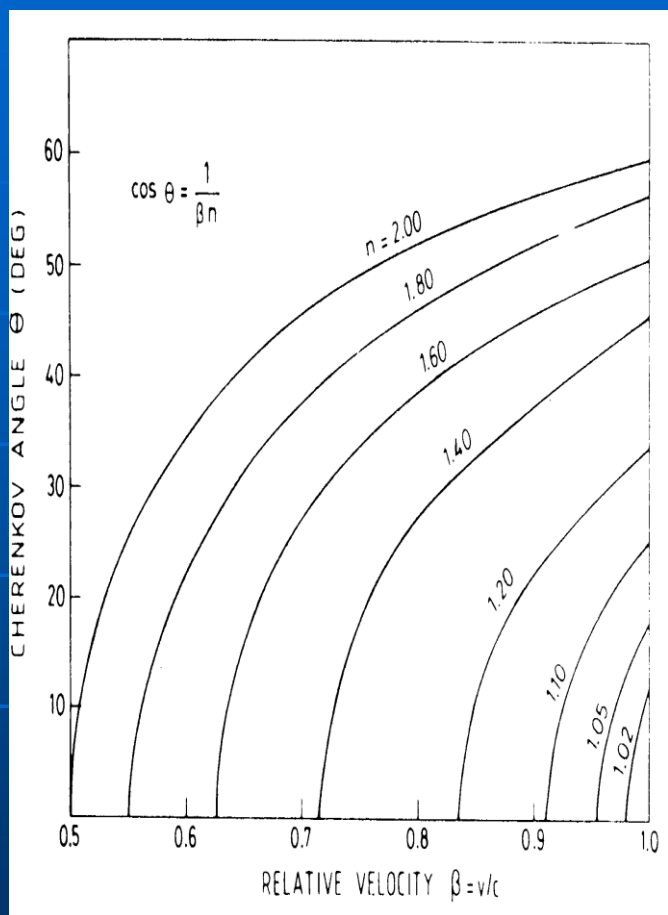
- 切伦科夫辐射快速带电粒子穿过均匀透明的介质，其速度大于光在该介质中的相速度 $v > c/n$ 时就会产生切伦科夫辐射。
当带电粒子通过介质时，由于电磁相互作用，会使介质的原子或分子发生瞬时极化，而随后退极化，产生电磁辐射。
- 切伦科夫辐射与带电粒子的速度有密切的关系。速度的大小不仅决定有无辐射的产生，也决定了辐射的强度及角度。

在时间间隔 t 内，波传播的距离为 ct/n ，粒子传播的距离为 $\beta c t$ ，在与粒子运动方向成 θ 角的方向上电磁辐射相干加强，才能观测到。由此得到切伦克夫辐射的传播方向：

$$\cos \theta = \frac{ct/n}{\beta ct} = \frac{1}{\beta n}$$



- 所以只有 $\beta > 1/n$ 才会有辐射，这是切伦克夫辐射的阈速度。



介 质	$n-1$	阈 β_s
金刚石	1.42	0.41
ZnS (Ag)	1.37	0.42
Lead Fluoride	0.80	0.56
玻璃	0.46-0.75	0.57-0.68
闪烁体 toluene	0.58	0.63
Plexiglas	0.48	0.68
水	0.33	0.75
气凝硅胶	0.025-0.075	0.93-0.976
Pentane (STP)	1.7×10^{-3}	0.9983
CO ₂ (STP)	4.3×10^{-4}	0.9996
He (STP)	3.3×10^{-5}	0.99997

- 通过单位长度介质在每单位光子能量间隔产生的光子数

$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha z^2}{\lambda} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)} \right)$$

- 若介质长L，发出在波长 λ_1 和 λ_2 之间的光子总数为

$$N = \int_0^L \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(\frac{d^2 N}{dx d\lambda} \right) dx d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi L \alpha z^2}{\lambda^2} \sin^2 \theta_c d\lambda$$

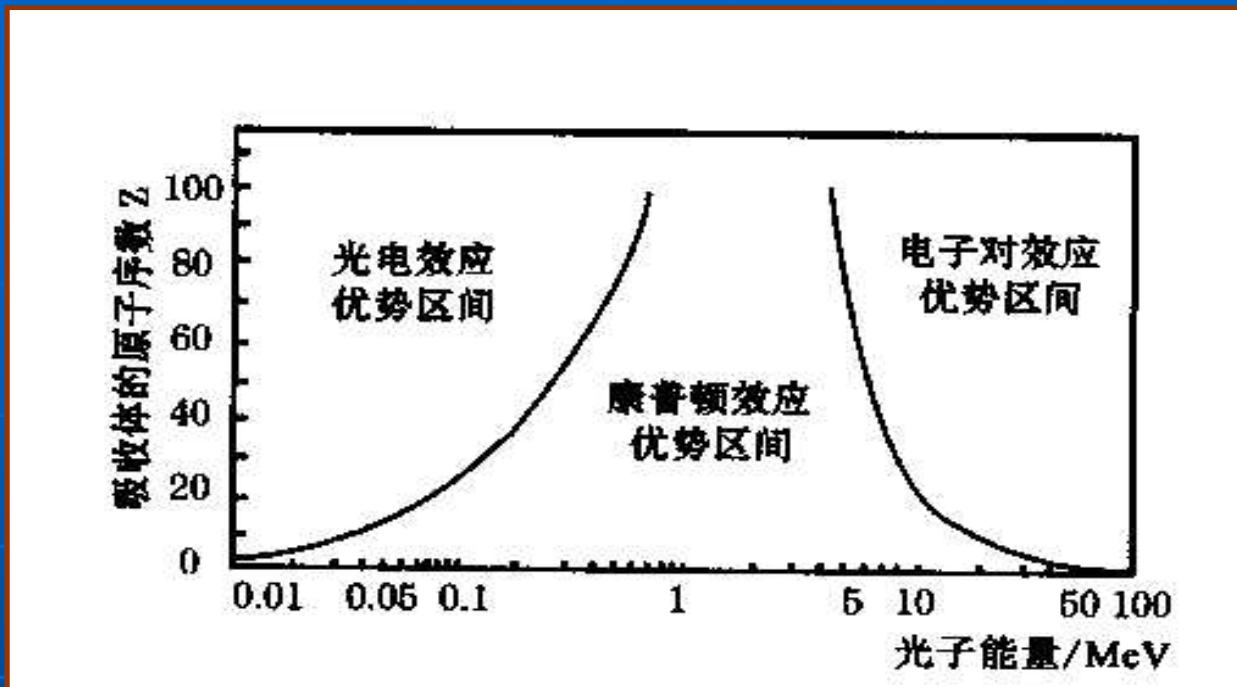
对于可见光灵敏的光电倍增管计数器而言，
 $\lambda_1 = 400\text{nm}$ ， $\lambda_2 = 700\text{nm}$ ，我们得到每cm的光子数为
 $N/L = 490 \sin^2 \theta_c$

γ射线的探测

- 光电效应、康普顿效应是γ光子与核外电子的作用结果，电子对效应是γ光子与原子核电磁场的作用结果。三种效应相互竞争，可能同时存在。
- 三种效应的相对重要性
 - 对低能γ射线（<几十KeV）和原子序数高的物质光电效应占优势；
 - 对中能γ射线（几十KeV~几百KeV）和原子序数低的物质康普顿效应占优势；
 - 对高能γ射线（>几MeV）和原子序数高的物质电子对效应占优势

The diagram illustrates three types of gamma-ray interactions with matter:

- Photoelectric Effect:** A wavy line representing a gamma photon strikes an atom, causing an electron (e⁻) to be ejected from a shell. The equation is $\sigma_k \sim \alpha^4 Z^5 E_\gamma^{-3.5}$ and $E_e = E_\gamma - \varepsilon_i$.
- Compton Effect:** A wavy line representing a gamma photon strikes an electron (e⁻), resulting in a scattered photon and a recoil electron. The equations are $T_e = E_\gamma \left(1 + \frac{m_e c^2}{E_\gamma (1 - \cos \theta)} \right)^{-1}$ and $E'_\gamma = E_\gamma \left(1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \theta) \right)^{-1}$. The cross-section is $\sigma_c \sim Z E_\gamma^{-1}$.
- Pair Production:** A wavy line representing a gamma photon strikes an atom, resulting in the creation of an electron-positron pair (e⁻ and e⁺). The equation is $\sigma_{pair} = 4Z^2 \alpha_e^2 \left[\frac{7}{9} \ln \left(\frac{183}{Z^{1/3}} \right) - \frac{1}{54} \right]$ for $E_\gamma > 2m_e$.



- 在三种效应中，每个 γ 光子都是在一次作用中就损失其全部能量或相当大部分能量，并发射出电子。正是这些电子使得探测 γ 射线成为可能。
- 光电效应和电子对效应所发射的次级电子的能量单一，因此 γ 射线探测器的物质应选用 Z 尽可能大的材料。

量能器

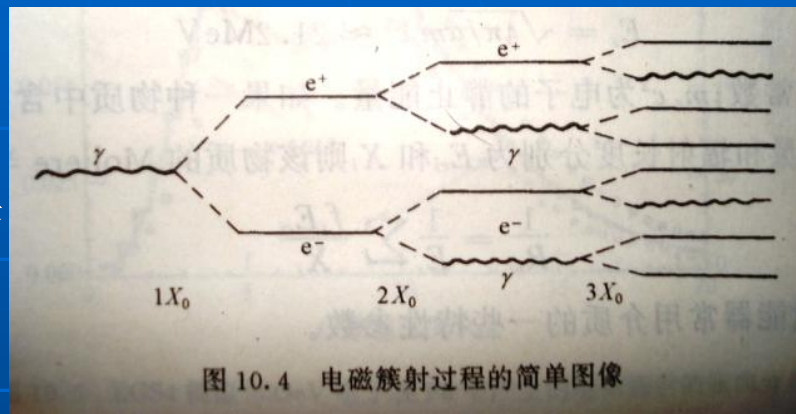
- 量能器就是用来测量粒子能量的探测器。同时也能给出粒子的位置、飞行方向。
- 入射粒子在量能器大块的介质中通过各种电磁相互作用或强相互作用把它们的能量沉积在探测器中，所沉积的能量通过介质中的灵敏部分转变为可测量的物理量，如电离电荷、闪烁光、契伦科夫光等。这些物理量的大小正比于入射粒子的能量。按灵敏层结构可分为
 - **全吸收型（全灵敏型）**：由一块均匀介质组成，它既是簇射介质，又是对簇射次级粒子灵敏的探测器介质。如**NaI(Tl), CsI(Tl)**晶体
 - **取样型**：由簇射介质和探测器灵敏层相间堆砌而成。介质通常是铁(强子的量能器)，铅(电磁量能器)，灵敏层通常有塑料闪烁体,气体探测器,液体电离室等。
- 按入射粒子和量能器物质的相互作用可分为
 - **电磁量能器**
 - **强子量能器**

- 随着粒子物理实验发展的需要，量能器已成为几乎所有粒子物理实验的关键探测器。具有下列重要特性：
 - 既能探测带电粒子又能探测中性粒子。
 - 对于电子、 μ 、强子具有不同的响应特征，可以提供粒子鉴别的信息。
 - 可以分割为小单元，从而精确给出入射粒子的位置和方向。
 - 能量测量精度随能量升高而改善，与其它探测器不同。
 - 量能器的几何尺寸随入射粒子能量的增加呈对数增长，而磁谱仪的几何尺寸随动量的方根增长。所以在高能条件下，量能器可以有较小的尺寸。
 - 量能器的时间响应可以很快，可以在高计数率环境下工作。
 - 可以利用能量沉积组成事例选择的触发信号，对感兴趣的事例进行选择。如中性触发。

§ 1 电磁量能器 (EMC)

一、电磁相互作用能损机制

■ 高能电子或光子通过介质，发生相互作用，高能电子韧致辐射产生 γ 光子，高能 γ 光子产生正负电子对……，这样不断发生电子— γ 光子—电子的级联过程，产生大量电子和 γ 光子的现象。随着穿入介质厚度的增加，次级粒子的数目急剧增加，而每个电子、 γ 光子的能量逐渐减小，减至光子能量不能再产生电子对时，电子能量小于临界能量 E_c ，簇射停止。这时电子通过电离损失能量， γ 光子主要通过康普顿散射损失能量，最后被介质吸收。



■ 一个初始能量为 E 光子，在厚为 X_0 的一层中有54%的几率产生正负电子对，这些带电粒子的能量为 $E/2$ 。如果 $E/2 > E_c$ ，这些电子和正电子以韧致辐射为主，在经过厚度仍为 X_0 的物质层后，带电粒子的能量减少到 $E/(2e)$ ，韧致辐射光子的平均能量在 $E/2e$ 和 $E/2$ 之间。在厚度为 $2X_0$ 之后的平均粒子数目为4。

■ 经过 nX_0 的物质层后，将近似产生 2^n 个平均能量为 $E/2^n$ 的粒子产生，形成一个簇射。

■ 当 $E/2^n = E_c$ 时，簇射终止。此时共有 $n_{\max} = \ln(E/E_c)/\ln 2$ 代次级粒子。在簇射最大处：介质深度为 $t_{\max} = \ln(E/E_c)/\ln 2 X_0$ ，粒子数目 $N_p = 2^{n_{\max}} = E/E_c$

■ 电子和正电子在簇射中的积分路径近似地等于正比于初始能量 E

$$S = \frac{2}{3} X_0 \sum_{\nu=1}^n 2^{\nu} + s_0 \frac{2}{3} N_p \approx \left(\frac{4}{3} X_0 + \frac{2}{3} s_0 \right) \frac{E_0}{E_c}$$

描写电磁簇射的一些物理量

- 辐射长度

$$X_0 \approx \frac{180A}{Z^2} (g \cdot cm^{-2})$$

Z为物质原子序数，**A**为原子量

- 临界能量

对电子

$$E_c = \frac{800(MeV)}{Z + 1.2}$$

- 电磁簇射的横向发展

电子在前进过程中会发生多次的库仑散射,偏离原来的飞行方向。

临界能量的电子经 **$1X_0$** 厚度后的横向偏离被定义为**Moliere**半径 **R_M** :

$$R_M = X_0 \left(\frac{E_s}{E_0} \right) \quad E_s = \sqrt{\frac{4\pi}{\alpha}} m_e c^2 = 21.2 MeV \quad \text{常数能量}$$

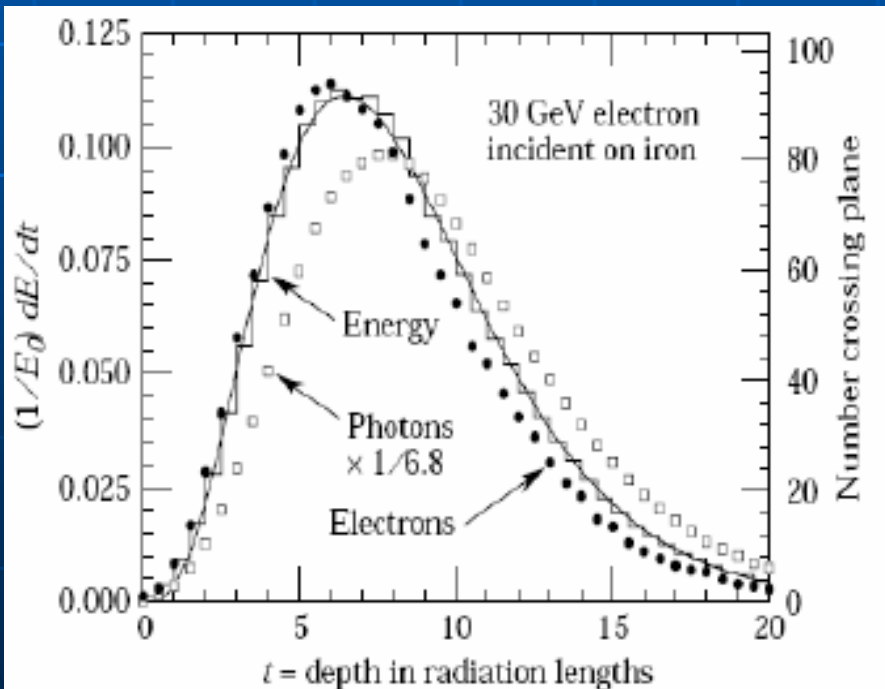
电磁簇射的主要特征

电磁簇射的纵向分布

簇射纵向发展极大值位置

$$t_{\max} = \frac{a-1}{b} = 1.0(\ln y + c_i) \quad i = e, \gamma \quad \begin{matrix} c_e = -0.5 \\ c_\gamma = +0.5 \end{matrix}$$

电子数目的减少比沉积能量下降得快。

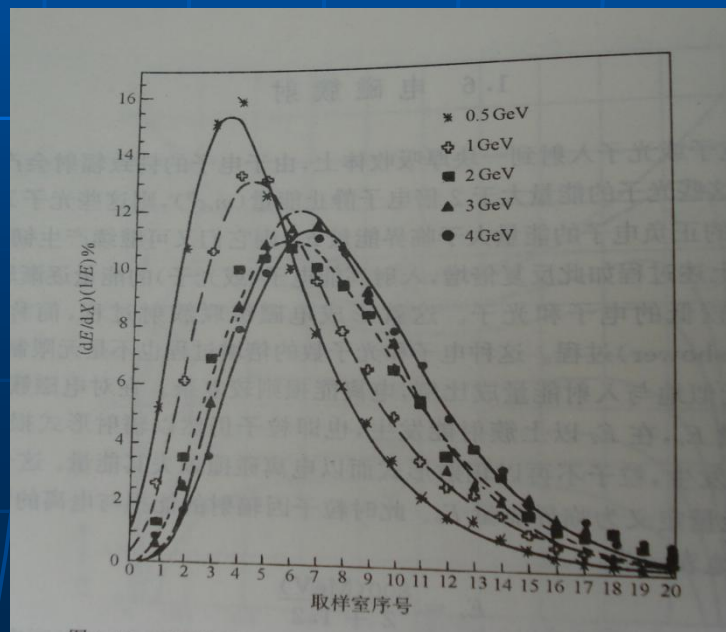


$$\frac{dE}{dt} = E_0 b \frac{(bt)^{a-1} e^{-bt}}{\Gamma(a)}$$

$$t = \frac{x}{x_0} \quad \text{介质深度以辐射长度为单位}$$

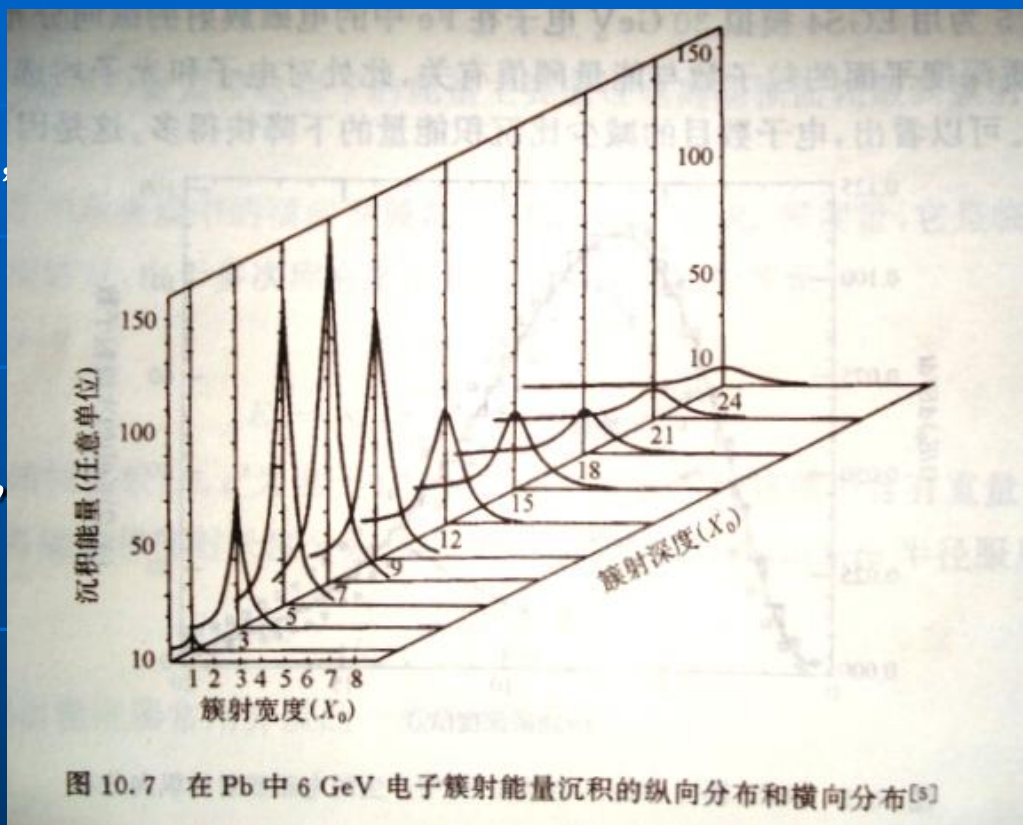
$$y = \frac{E}{E_c} \quad \text{能量以临界能量为单位}$$

a, b 为常数, 对铁 $b \approx 0.5$



■ 电磁簇射的横向分布

- ✓ 横向扩展的原因有二：
 - 多次库仑散射使电子偏离簇射轴
 - 韧致辐射的光子偏离簇射轴较远，特别是已偏离簇射轴的电子所发射的光子
- ✓ 在开始阶段，是由于韧致辐射角和多次库仑散射共同作用，随着簇射深度的增加，粒子能量降低，多次库仑散射的影响将增大。
- ✓ 电磁簇射是较窄的，特别是在最初几个辐射长度处。据此可以较精确地确定产生簇射的位置。



二、电磁量能器的特性参数

1. 能量分辨率

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{E} \oplus \frac{b}{\sqrt{E}} \oplus c$$

- ✓ **a**为“噪声”项系数：包括电子学噪声以及待测粒子之外的其它粒子沉积能量的涨落；
- ✓ **b**为“取样”项系数：包括簇射产生的次级粒子数和各种独立信号产生过程或进一步转换过程的涨落。
- ✓ **c**为“常数”项系数：包括能量泄露的涨落、在量能器之前和内部死区中沉积能量的涨落以及非均匀性和刻度误差等。

■ 本征能量分辨率

- 全灵敏量能器

若量能器有无限大的体积，则能量分辨率仅由簇射次级粒子的统计涨落决定。

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\frac{F}{N}} = \sqrt{\frac{FW}{E}} \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$$

- 取样量能器

取决于簇射在探测器灵敏层中沉积能量的涨落，包含簇射的本征涨落和取样涨落，它与取样结构和灵敏层介质特性有关。

- 灵敏层的取样涨落

设吸收层厚度为**X**，则穿越灵敏层的粒子数

其中 **t=X/X₀**

它的统计涨落对能量分辨率的贡献为

$$N = \frac{S'}{X} = F(\xi) \frac{E}{E_c} \frac{X_0}{X} = F(\xi) \frac{E}{E_c} \frac{1}{t}$$

$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)_{SAMP} \approx \frac{1}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{E_c \cdot t}{F(\xi)E}}$$

- 朗道涨落

最小电离粒子穿过薄物质层时的电离能损服从朗道分布，由此导致的能量分辨

气体 **X~10⁻³g/cm²**，闪烁体**X~1g/cm²**

可见气体取样灵敏层的涨落较大

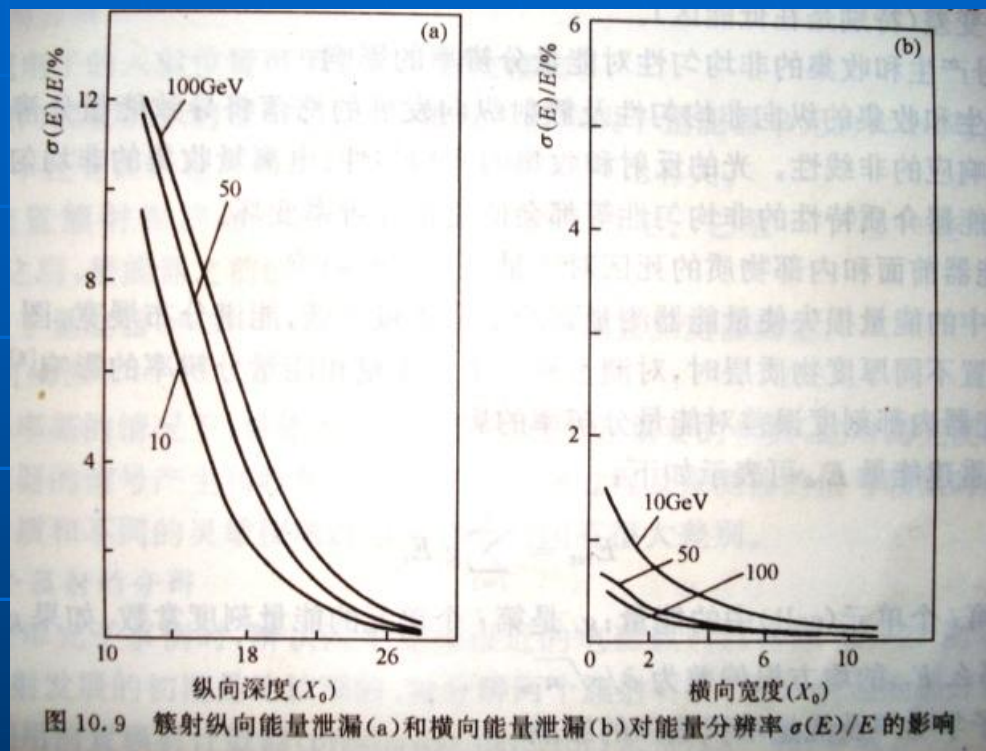
$$\left(\frac{\sigma}{E}\right)_{Lan} = \frac{2}{\ln(10^4 X)}$$

- 灵敏层中次级电子径迹长度的涨落

对气体取样量能器影响较大

■ 能量泄露对能量分辨率的影响

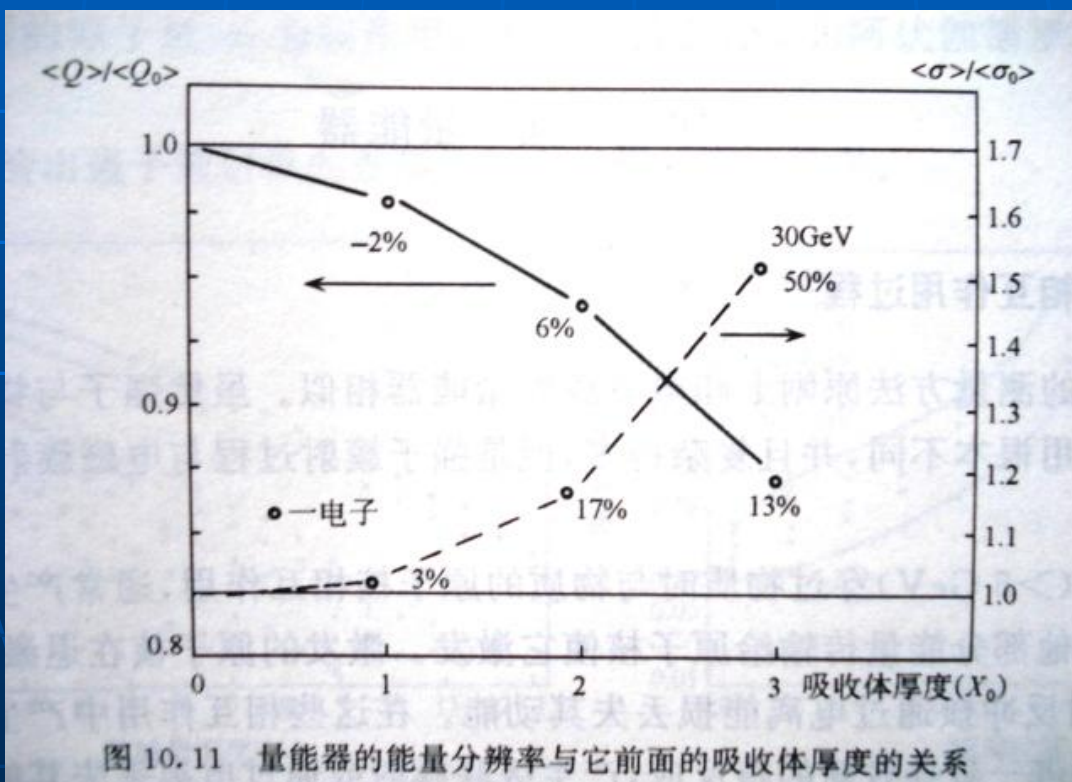
- 对体积一定的量能器，入射粒子簇射沉积能量的纵向或横向泄露将使能量分辨率变差。
- 能量的纵向泄露的影响比横向大。
- 在量能器前面的能量泄露也会使能量分辨率变差，特别是低能区。



■ 信号产生和收集的非均匀性对能量分辨率的影响

信号产生和收集纵向非均匀性及簇射纵向发展的涨落将导致能量分辨变差，且造成能量响应的非线性。光的反射和收集、电离量的收集、辐照损伤引起的介质特性的非均匀性

■ 量能器前面和内部死物质对能量分辨率的影响

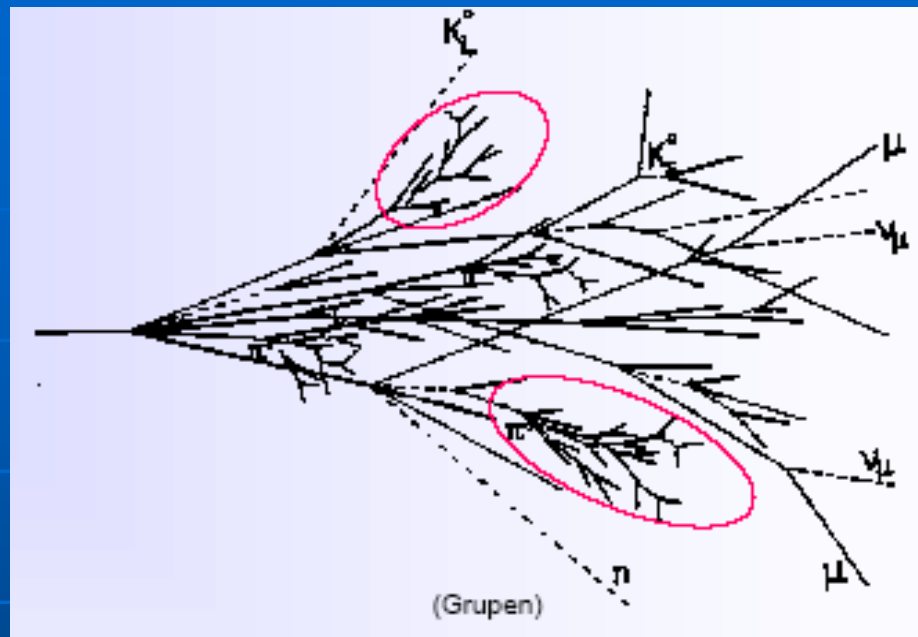


§ 2 强子量能器

一、强子相互作用过程

高能强子通过介质，与介质原子核发生强相互作用，产生多个次级强子，高能次级强子继续相互作用，产生更多的次级粒子：强子、电子、 γ 光子、中子、 μ 子、中微子、核碎片等，其中大多数是 π 介子和核子，约消耗原初粒子能量的一半。

包含各种过程，远比电磁簇射复杂。



A hadronic shower contains two components:

hadronic

+

electromagnetic



- charged hadrons p, π^\pm, K^\pm
- nuclear fragments
- breaking up of nuclei (binding energy)
- neutrons, neutrinos, soft γ 's, muons

neutral pions $\rightarrow 2\gamma$
 \rightarrow electromagnetic cascades

$$n(\pi^0) \approx \ln E(\text{GeV}) - 4.6$$

example $E = 100 \text{ GeV}$: $n(\pi^0) \approx 18$

invisible energy \rightarrow large energy fluctuations \rightarrow limited energy resolution

1. 强子簇射的纵向发展和横向发展

由核相互作用长度 λ_I 决定 $\lambda_I = A / (\sigma_I N_0 \rho) \sim A^{1/3}$

- 强子簇射的纵向发展，由 π^0 产生的电磁簇射及在其后缓慢发展的纯强子簇射组成。

- 簇射极大处的深度 $t_{\max}(\lambda_I) = 0.2 \ln E(\text{GeV}) + 0.7$

- 包含**95%**强子簇射能量的介质深度

$$\lambda_{95\%}(\lambda_I) = t_{\max} + 2.5 \lambda_{\text{att}}$$

λ_{att} 为簇射深度 t_{\max} 超过后，强子簇射的指数衰减部分的贡献

- 包含**95%**强子簇射能量的横向半径 $R_{95\%}(\lambda_I) \sim 1$

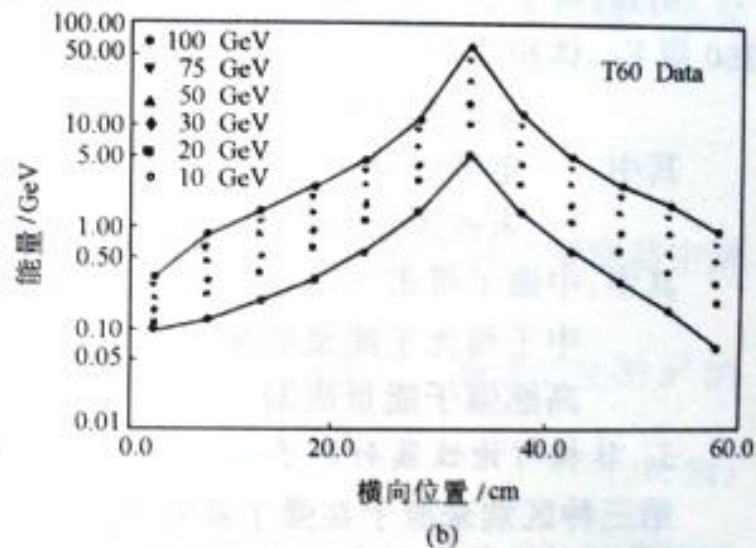
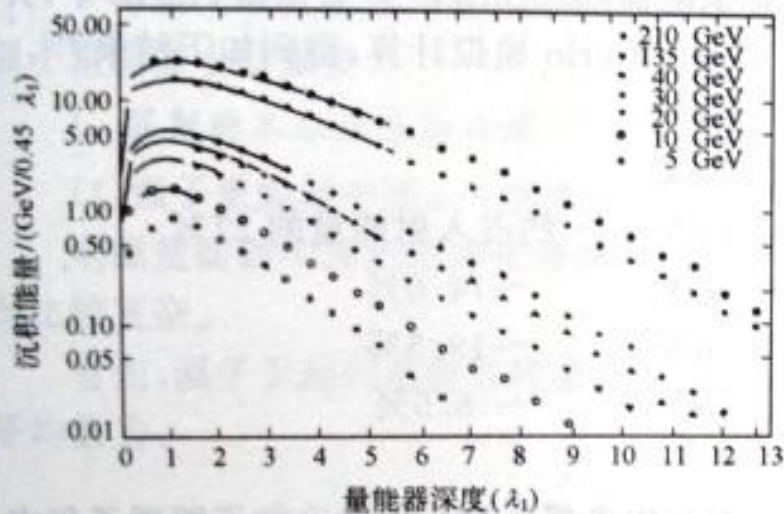
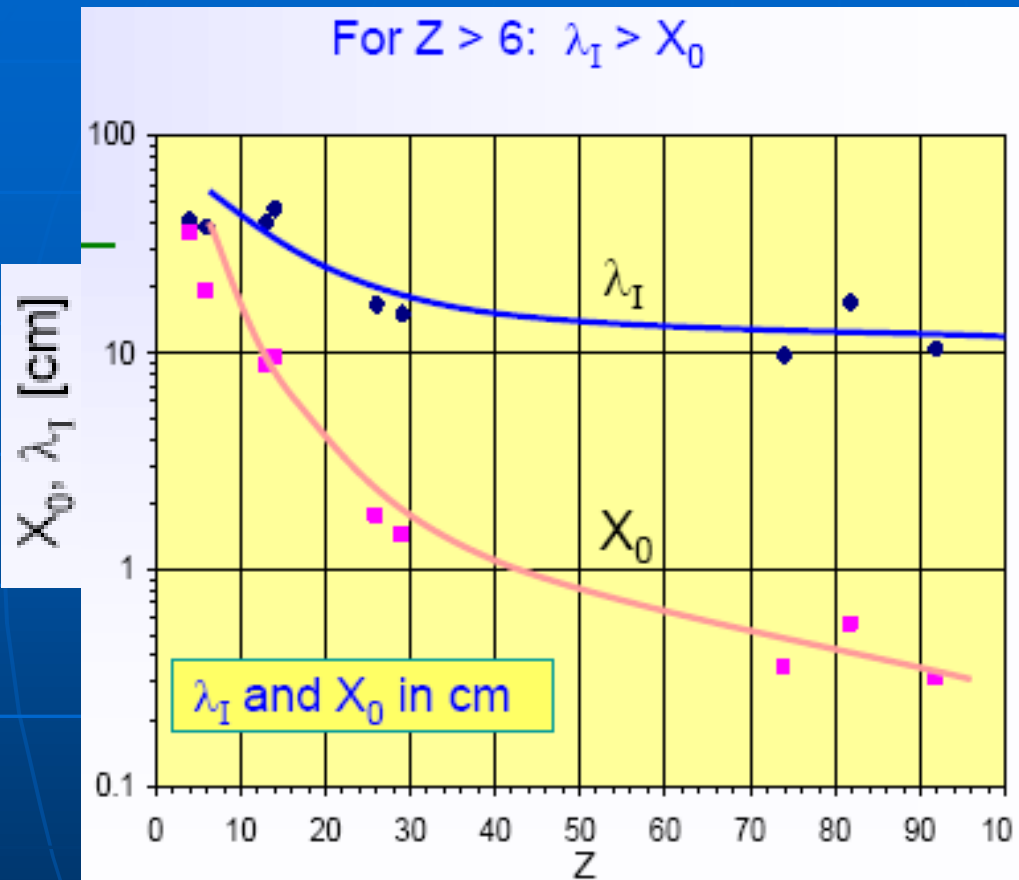


图 10.13 (a)WA78U-闪烁体量能器中强子簇射的纵向能量沉积^[11];

(b)T60U-闪烁体量能器中强子簇射的横向能量沉积^[12]



Material	Z	A	X_0 (cm)	λ_I (cm)
Lead	82	207	0.56	17.1
Copper	29	63.5	1.44	15.1
Iron	26	56	1.77	16.8
Silicon	14	28	9.4	45.5
Al	13	27	8.9	39.4
C	6	12	19	38.1
He(gas)	2	4	5.3E5	3.6E5

核相互作用长度 $\lambda_I \sim A^{1/3}$
 电磁辐射长度 $X_0 \sim A/Z^2$
 高Z物质两者差别很大，可用于粒子鉴别

同电磁簇射相比，强子簇射发展较缓慢

5MeV π 在铅中的强子簇射极大约在**10cm**，延伸到**40cm**

5GeV e 在铅中的电磁簇射极大约在**2cm**，延伸到**10cm**

2. 不可观测的能量

强子簇射中有一部分能量损失是不可测量的。

- 一些粒子从量能器中逃逸并带走了能量，如 μ 和 n 衰变中产生的中微子
- 从核场中释放核子所需的结合能。相当大，可占非电磁沉积能量的**40%**。

例如：对于 23 GeV 的质子入射到一个液氩量能器[0.3cm Fe + 0.3cm Ar(L)中,共 360 层 Fe, 体积为 $5.58\lambda_f \times 7.7\lambda_f$]的情况进行 Monte-Carlo 模拟计算, 得到如下结果^[14]：

总沉积能量	16.609 GeV	
其中：电磁成分	5.533 GeV	
未被测量到的能量	6.253 GeV	约占入射能量的 27%
其中：中微子带走+结合能	4.637 GeV	~74.0%
中子和光子能量泄漏	1.203 GeV	~19.5%
高能强子能量泄漏	0.414 GeV	~6.5%

3. 非相对论性簇射粒子

强子簇射沉积的能量中有相当部分被非相对论粒子即质子和中子携带。

- 非相对论慢的质子会释放出**10到100**倍于最小电离粒子的电离能，所探测到的能量的比例与最小电离粒子有很大区别。
- 比电离高的粒子通常有较强的非线性响应。闪烁体、液氩的饱和效应较明显，选用气体和硅作为灵敏介质时，这类效应很小。
- 中子在被完全吸收前将穿行很长的距离。导致强子信号脉冲的宽度比电磁信号脉冲大得多。可用来鉴别粒子，特别是 e/π 分辨。

二、强子量能器的特性参数

强子量能器普遍采用取样量能器

- 选用密度很高的介质作吸收体，量能器可以做得很紧凑，降低造价。
- 当能量增长时，能量分辨率将主要取决于系统效应，取样涨落的影响将不起重要作用。
- 可以对量能器进行“补偿”，以提高能量分辨。

1. 强子量能器的补偿

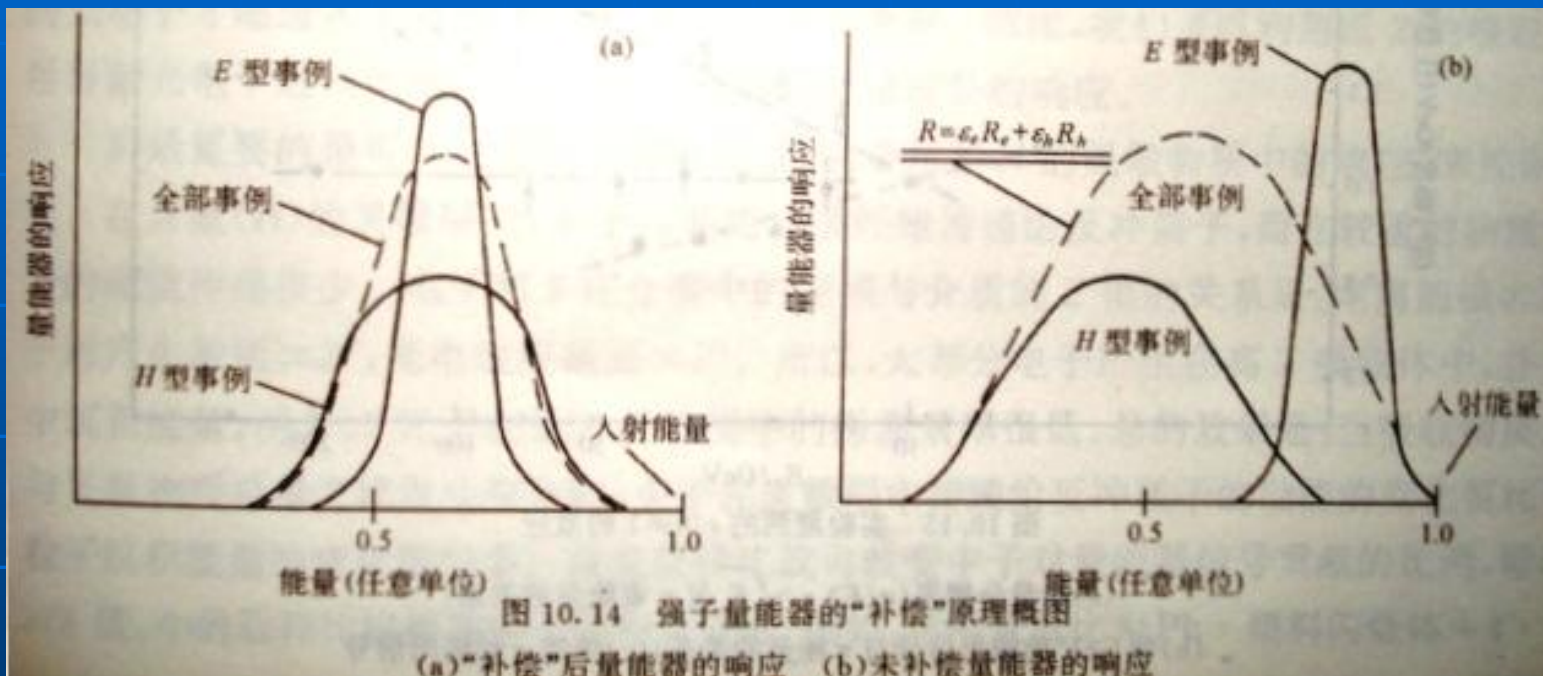
■ 强子量能器中的 e/h 比

- 电磁型能量沉积： $N_{\pi^0} = 5 \ln E \text{ (GeV)} - 4.6$
 N_{π^0} 很小（**18@100GeV**），涨落很大
- 强子能量沉积

量能器仅对次级电子和带电强子沿径迹产生的电离灵敏，因而只有一小部分沉积能量被取样，本征涨落较大，能量分辨差

■ 总的能量响应 $R_h = \varepsilon_h E_h + \varepsilon_e E_e$

由于“不可测”能量，具有高比电离的非相对论性粒子容易饱和，
一般 $\varepsilon_h < \varepsilon_e$



补偿: $e/h = 1 \pm 0.05$
对电子和相同能量强子所产生的簇射有相同的能量响应，则会改善能量分辨率。

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} + b \left| \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_h} - 1 \right|$$

非补偿量能器，不仅能量分辨差，而且

- 能谱分布具有非高斯性
- 能量分辨率也不按 $1/\sqrt{E}$ 随能量增加而改善
- 能量响应非线性

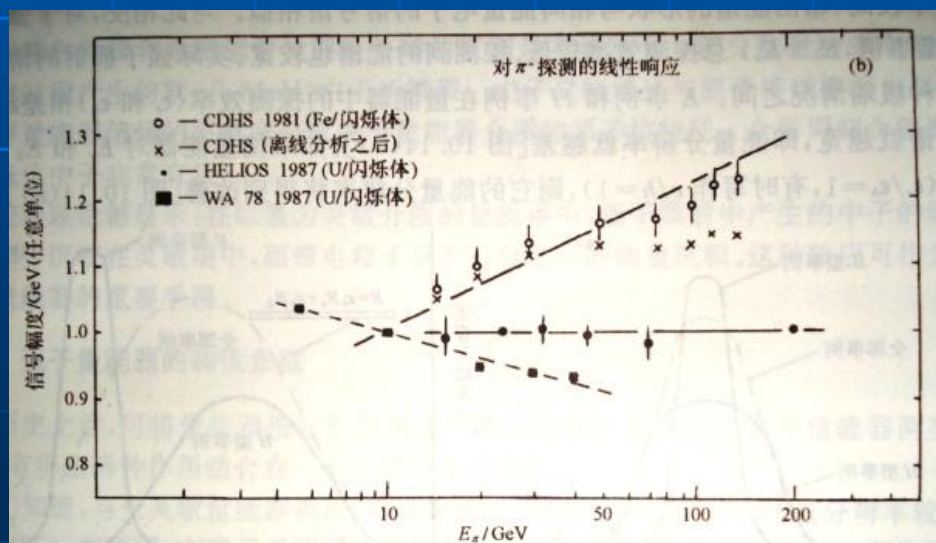
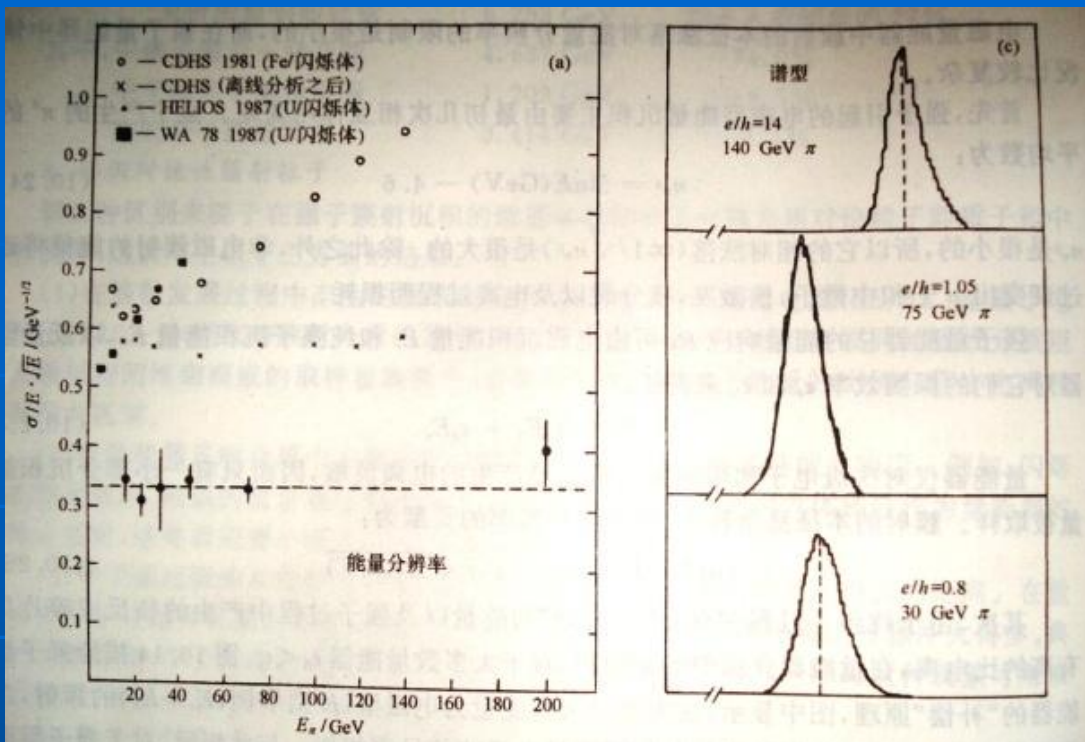


图 10.15 实验测到的 $e/h \neq 1$ 的效应

(a) 能量分辨率 $(\sigma/E) \cdot \sqrt{E}$ 与 π 束能量的关系;

(b) 每 GeV 的输出信号与 π 能量的关系; (c) 单能 π 的输出信号

■ 强子量能器中的补偿

- 提高 ε_h ，使探测器对核激发的产物如中子更灵敏
 - 用塑料闪烁体作为灵敏层，利用“核反冲法”提高对中子的探测效率。
 - 选用 ^{238}U 作吸收体，利用“核裂变”放出的额外能量“补偿”丢失的结合能。
- 降低 ε_e ，压低探测器对低能光子的响应
 - 低能光子主要是光电效应，截面正比于 Z^5 。主要在高 Z 的吸收层中，靠近灵敏层的边界产生的光电子才能进入灵敏层。
 - 可以用低 Z 的吸收物质层屏蔽光电子进入灵敏层。
- 探测器灵敏层中含有相当比例的氢，用很重（厚）的吸收材料实现补偿。
 - 中子的能量传递主要是在灵敏层中传递给反冲质子
 - 电子和光子的能量主要沉积在高 Z 的吸收层中
 - 当改变取样比，如增加吸收层厚度时，中子传递给反冲质子的动能的变化要比带电粒子沉积能量的变化慢得多。小的取样比将提高中子的相对贡献。

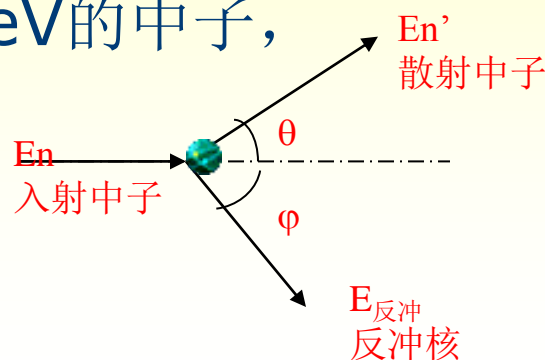
核反冲法

- 核反冲法是记录中子与原子核弹性散射后的反冲核。在弹性散射过程中，中子运动方向改变，能量减少。这减少的能量传递给原子核，使原子核以一定的速度运动，该核称作反冲核。反冲核具有电荷，可以作为带电粒子记录。记录了反冲核，就探测到中子。

该方法主要用于探测快中子（ $>0.3\text{MeV}$ ，否则不易探测反冲核）。

- 由能动能量守恒，对 $E_n < 30\text{MeV}$ 的中子，
- 反冲核获得的动能

$$E'_{\text{反冲}} = E_n \frac{4m_n M}{(m_n + M)^2} \cos^2 \varphi$$



- 若以质量数代替质量，则 $m_n=1$ ， $M=A$

$$\therefore E_{\text{反冲}} = \frac{4A}{(A+1)^2} E_n \cos^2 \varphi = \alpha E_n \cos^2 \varphi$$

由此可见，反冲核越小获得的能量越大。当 $\varphi=0$ ， $A=1$ 时， $E_{\text{反冲}}=E_n$ ，最大。

中子与质子发生碰撞时，一次作用就可能损失掉全部动能

- 反冲质子法 选用含氢物质做辐射体，此时反冲核就是质子。实际中常用石蜡、水等含氢物质作为中子慢化剂。
- 核反冲法探测中子时应选择轻核物质做靶材料。如氢、甲烷等气体，有机玻璃、有机晶体、塑料等固体。
- 核反冲还可以测量快中子能量。当 φ 一定时， $E_{\text{反冲}}$ 正比于 E_n 。实际中测量沿入射中子束方向张角为 ± 10 度的反冲质子，此时探测器接收到的质子数较多，反冲质子的能量粗略地等于入射中子能量。

核裂变法

- 核裂变法就是通过记录中子与重核作用产生的裂变碎片来探测中子的方法。
- 探测不同能量的中子选用不同的裂变材料
对热中子和慢中子选 ^{235}U ($\sigma=528\text{b}$), ^{239}Pu ($\sigma=743\text{b}$), ^{233}U ($\sigma=531\text{b}$)。裂变时放出能量很大, 大约是200 MeV, 两个裂变碎片共带走170 MeV的能量。入射中子能量远小于它, 故该法不能测量中子能量, 主要测量中子通量。
- 核裂变法特点是放出反应能很大, 所以 γ 本底对测量没有影响, 可以在强 γ 本底下测量中子。

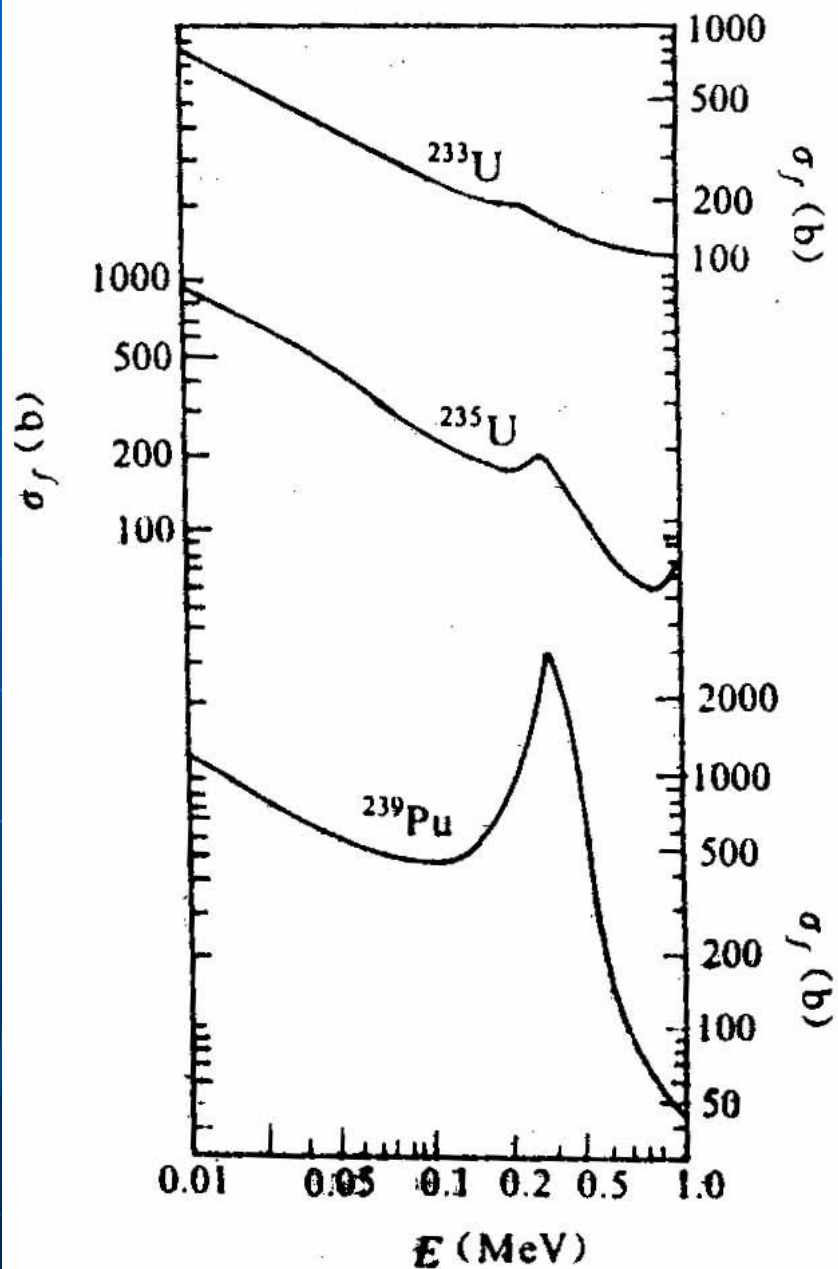
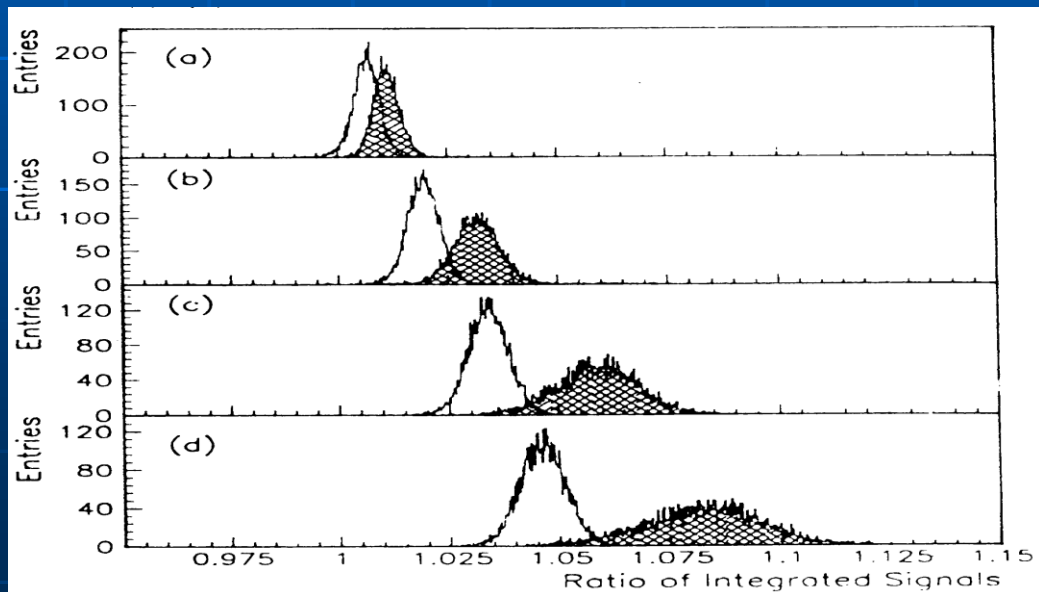


表 10.8 各种结构的闪烁体取样量能器的 e/h 值和能量分辨率

结构	能量范围 /GeV	$AE^{-1/2} \oplus B$ 电子		$AE^{-1/2} \oplus B$ 强子		补偿后的 e/h 值($\pm .05$)
		A	B	A	B	
3.2(3.0)mm ²³⁸ U 3mm 闪烁体	10~100	0.172	0.008	0.360	0.010	1.01
3.2mm ²³⁸ U+0.2mm 不锈钢 3mm 闪烁体	10~100	0.176	0.004	0.345	0.010	0.96
3.2mm ²³⁸ U 5mm 闪烁体	3~8.75	0.156	0.010	0.398	0.041	1.12
5 mmPb 5mm 闪烁体	3~18.75	0.127	0.012	E=5GeV 时, A=0.53		1.34
10mm Pb 2.5mm 闪烁体	3~75	0.235	—	0.442	—	1.05

在U强子量能器中，电磁簇射和强子簇射信号的时间结构是不同的。在电磁簇射中，所有的电子和正电子在几ns中就通过了探测器。在强子簇射中，信号的部分来源于中子，而中子需要慢化，然后相互作用产生可观察到的质子，所以信号被延迟了。长积分时间可以抓到比电子多的强子信号。这个事实可以用来均衡e和p信号。



不同积分时间下50GeV/c 电子和100GeV/cn的信号比较

2. 能量响应和分辨率

■ 本征涨落

- 强子簇射中可测量能量的涨落
- π^0 的比例的涨落（在补偿量能器中可消除）

■ 取样涨落

- 强子簇射中核反应产生的带电粒子或核裂变碎片通常射程较短，所以吸收体的厚度直接影响可测量能量的多少；且随核反应在吸收层中的位置而涨落
- 带电粒子在灵敏层中的电离能损对不同粒子（电子、重带电粒子、核碎片等）也不同。

- 能量泄露将影响能量分辨率，尤其是尾部的纵向泄露比横向泄露更严重。可在后面加一分辨较差的尾部捕捉量能器。

✓ 非补偿型量能器分辨率一般都 **$>50\%/\sqrt{E}$** ，且很快偏离 **$1/\sqrt{E}$**

✓ 补偿型量能器分辨率好得多 **$\sim 35\%/\sqrt{E}$** ，且保持 **$1/\sqrt{E}$** 到**100GeV**

□ 影响能量线性的因素

- 电磁成分随能量作对数增长；
- 不可测能量是能量的函数且存在比电离大的重粒子的饱和效应
- 低能区（ **$<3\text{GeV}$** ）带电粒子不通过核作用，仅通过电离能损丢失能量的几率迅速增加，此时几乎没有不可测能量

$$\frac{\sigma_h}{E} = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{int}}^2 + \sigma_{\text{samp}}^2}{E}} + C$$

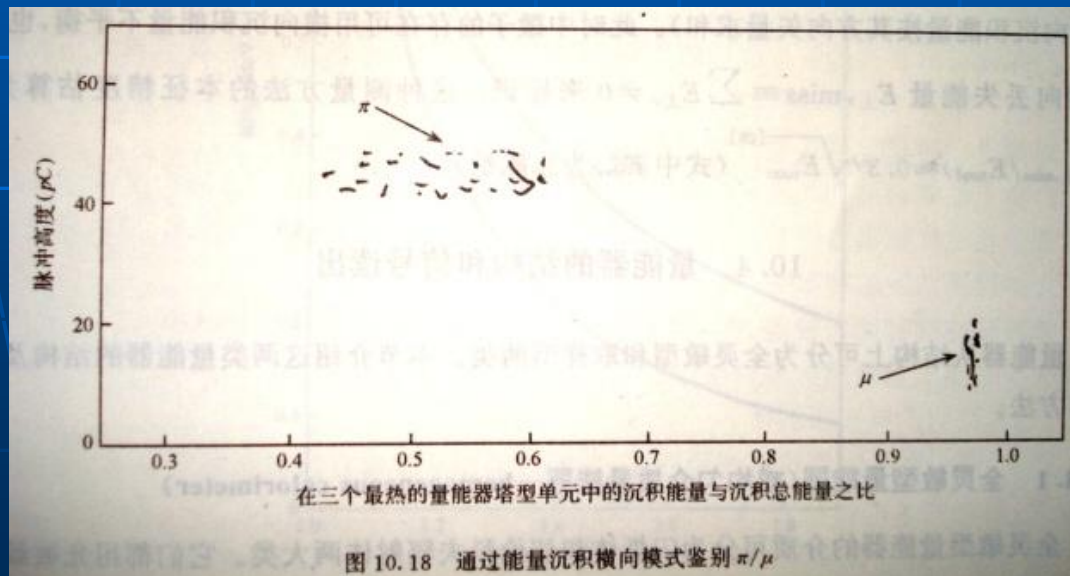
§ 3 量能器中的粒子鉴别

1. 电子和强子的鉴别

- 利用电磁簇射和强子簇射的纵向发展和横向发展的区别
- 最好在高 Z 介质中， $\lambda_I \sim A^{1/3}$ ， $X_0 \sim A/Z^2$
- 通常用纵向发展的区别：分为电磁和强子量能器两部分
- 也可仅利用横向发展的差异来辨认电子。
如 横向粒度精细的**SPACAL**，电子效率**95%@40-150GeV**
- 利用薄的前置簇射计数器（ $1-2X_0$ 的高 Z 介质）改善对电子的鉴别。
- 受电荷交换反应 $\pi^-p \rightarrow \pi^0n$ （或 $\pi^+n \rightarrow \pi^0p$ ）限制。
由于 π^0 簇射的起点取决于 λ_I ，可用薄的前置簇射计数器减少这种限制。
- 利用电子和强子信号的时间特性的差异

2. μ 子和强子的鉴别

- 利用能量的横向沉积图像来鉴别。鉴别质量由探测器的横向粒度决定。
- 量能器可以吸收强子，故可用 μ 计数器鉴别 μ 子。但
 - π 的punch through
 - $\pi \rightarrow \mu \nu_{\mu}$



§ 4 量能器的结构

一. 全灵敏型量能器

- 介质分为闪烁体和切伦科夫辐射体两大类
- 用光敏器件（PMT，PD、APD）读出。

1. 切伦科夫全吸收量能器

- 探测电磁簇射中的正负电子。
- 探测器有一定的阈能。
- 通常由液体、或固体辐射体组成

表 10.3 常用切伦科夫辐射体的特性

材料	密度 (g/cm ³)	辐射长度 X ₀ /cm	折射率 n	光产额 (p. e. /GeV) (相对 p. e.) ¹⁾	能透过的 最短波长 λ _{cut} /nm	价格 (\$/cc)	辐照损伤 /Gy	备注
SF-5 Pb 玻璃	4.08	2.54	1.67	600 p. e. (1.5×10 ⁻⁴)	350	0.51	10 ²	可以浇铸 或压制
SF-6 Pb 玻璃	5.20	1.69	1.81	900 p. e. (2.3×10 ⁻⁴)	350	0.51	10 ²	
PbF ₂	7.66	0.95	1.82	2000 p. e. (5×10 ⁻⁴)	260	4.1	10 ⁴	易碎,不能 大量使用
水	1.0	36.4	1.33	(10 ⁻³)	~300	~0		可以净化 循环使用

1)用双碱(bialkali)光阴极 PMT 测得的光产额相对于 NaI(Tl) 光产额的近似比值。

■ 铅玻璃量能器

加 PbO 的玻璃是最常用的一种电磁量能器材料。它价格便宜、易于加工，在固定靶和对撞机实验中都有应用。

- **光的输出**：大多数光导的折射率都比铅玻璃小，全反射会减小光输出。
 - 铅玻璃本身作光导；
 - 折射率逐步递减的多层光导；
 - 直接与**PMT**粘接（需抗磁）。
- **保证光在介质中的传播**：
 - 铅玻璃表面高度抛光
 - 与光密封层之间有一层空气间隙，以使 $<53^\circ$ 的切伦科夫光发生全反射。
- **加蓝色滤光片**以保证各处产生的光搜集均匀
 - 铅玻璃对蓝光透过率低

铅玻璃抗辐照性能差，不是高亮度对撞机量能器的候选者

■ PbF_2

- 有较强的抗辐照性能；较小的辐射长度；
- 较高的光产额，对紫外光的透过率好，可获得**5**倍于铅玻璃的光

2. 闪烁体量能器

晶体需有如下特性：

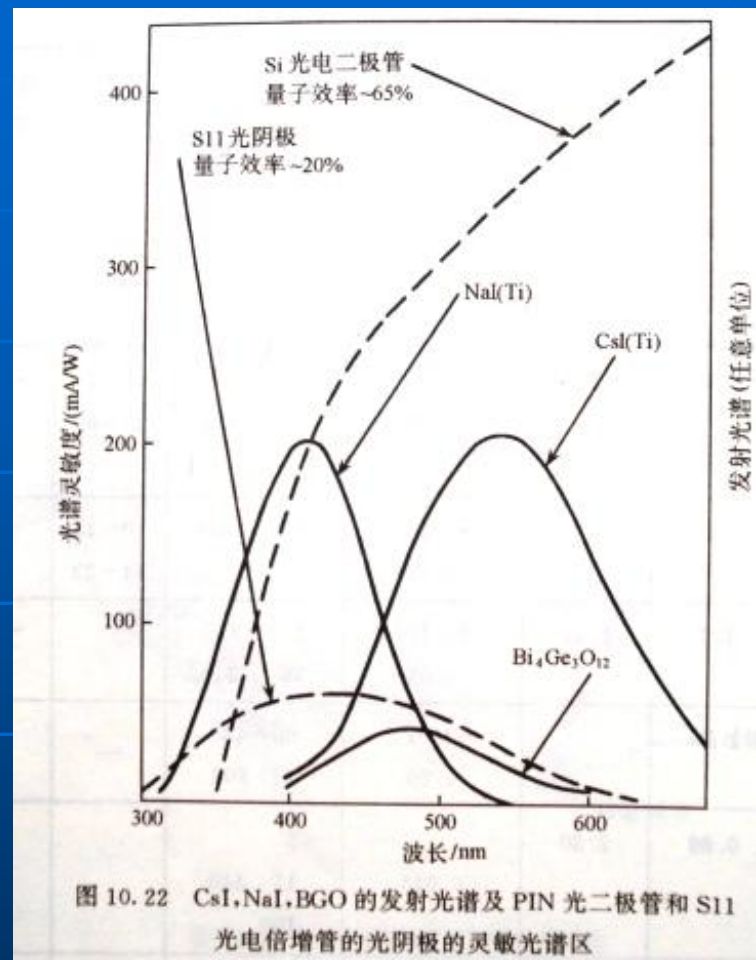
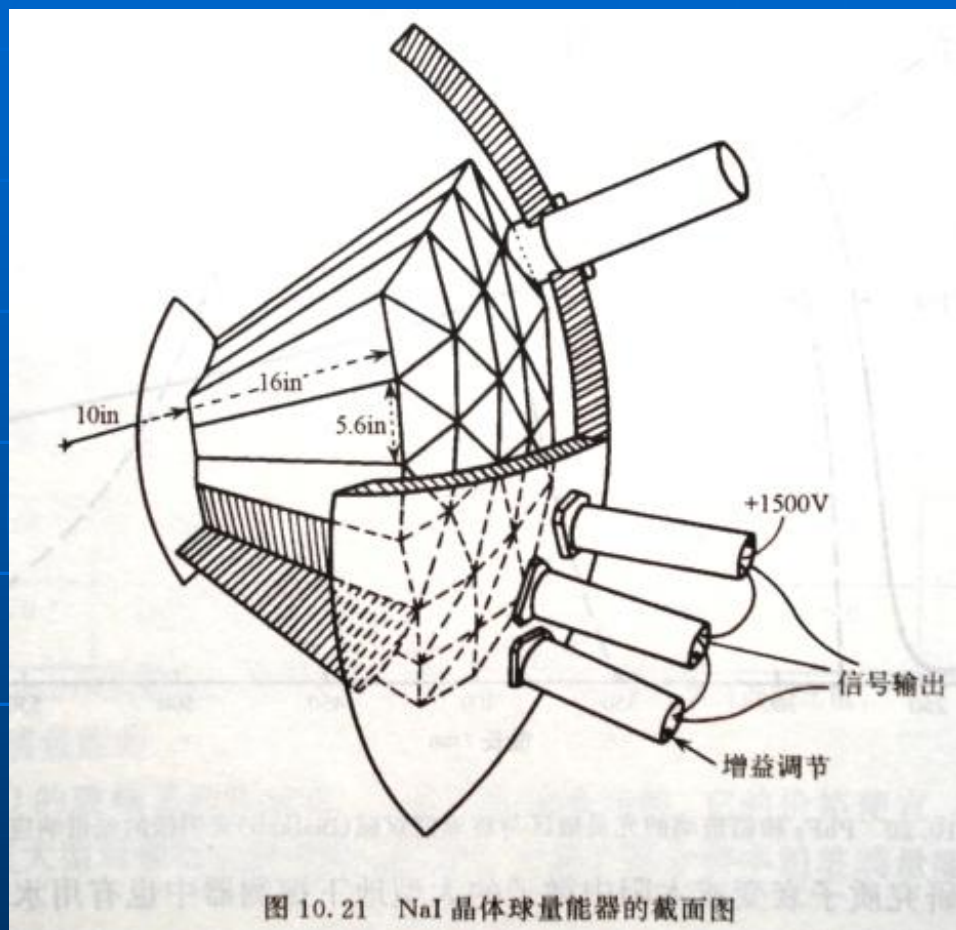
- 密度要高，短的 X_0 ，小的Moliere半径。
- 光产额高，光的传输和搜集性好，能与光探测器件的光谱响应相匹配，以提高能量分辨
- 抗辐照性能好
- 光的衰减时间短
- 光产额随温度的变化小
- 机械性能好，有利于晶体的切割、抛光
- 价格合适

Summary of Crystals for HEP

Crystal	NaI(Tl)	CsI(Tl)	CsI	BaF ₂	BGO	PbWO ₄	LSO(Ce)	GSO(Ce)
Density (g/cm ³)	3.67	4.51	4.51	4.89	7.13	8.3	7.40	6.71
Melting Point (°C)	651	621	621	1280	1050	1123	2050	1950
Radiation Length (cm)	2.59	1.85	1.85	2.06	1.12	0.9	1.14	1.37
Molière Radius (cm)	4.8	3.5	3.5	3.4	2.3	2.0	2.3	2.37
Interaction Length (cm)	41.4	37.0	37.0	29.9	21.8	18	21	22
Refractive Index ^a	1.85	1.79	1.95	1.50	2.15	2.2	1.82	1.85
Hygroscopicity	Yes	Slight	Slight	No	No	No	No	No
Luminescence ^b (nm)(at peak)	410	560	420 310	300 220	480	560 420	420	440
Decay Time ^b (ns)	230	1300	35 6	630 0.9	300	50 10	40	60
Light Yield ^{b,c} (%)	100	45	5.6 2.3	21 2.7	13	0.1 0.6	75	30
d(LY)/dT ^b (%/°C)	~0	0.3	-0.6	-2 ~0	-1.6	-1.9	-0.3	-0.1
Experiment	Crystal Ball	CLEO BaBar BELLE BES III	KTeV	TAPS (L*) (GEM)	L3 BELLE PANDA?	CMS ALICE PANDA? BTev...	-	-

a. at peak of emission; b. up/low row: slow/fast component; c. measured by PMT of bi-alkali cathode.

- **NaI (TI)** 的光产额最高，能与双碱标准光阴极**PMT**的光谱很好匹配；价格便宜，被广泛应用。



- **CsI (TI)** 与**PD**的光谱匹配，抗磁性能好；
- 易于加工，不易碎裂；
- 与**NaI(TI)**相比，不易潮解， X_0 小；

■ BGO、PbWO₄、LSO

在高能区，电子学噪声和光电子涨落不是影响能量分辨的主要因素，纵向能量泄露和刻度的不稳定性才是主要因素

表 10.6 能量分辨率(%)

能量/GeV	5	10	100	500
光电子	0.2	0.1	0.04	0.02
噪声	0.8	0.40	0.04	0.008
刻度	0.40	0.40	0.40	0.40
GEANT ¹⁾	0.64	0.60	0.42	0.36
总和	1.1	0.83	0.58	0.54

1)GEANT 包括能量的纵向泄露(几何因素)。

■ BaF₂及其紫外光读出

- ✓ 慢成分导致信号堆积而难以在高计数率下工作。
- ✓ 掺La可以压低慢成分而不牺牲快成分
- ✓ 可用紫外光敏气体TMAE的丝室探测，有很好的位置分辨、对磁场不敏感
- ✓ 价格昂贵

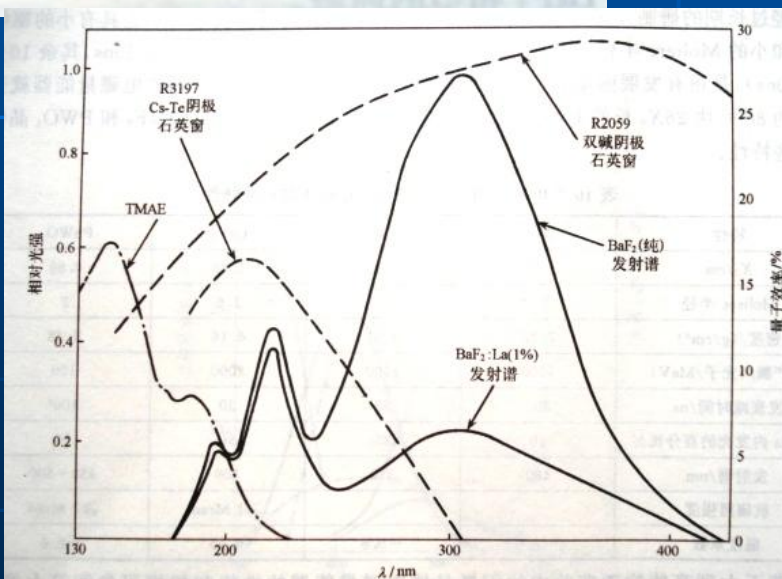


图 10.23 纯的和掺杂的 BaF₂ 的发射光谱和各种光阴极效率的比较

二、取样量能器

强子量能器普遍采用，中等分辨的电磁量能器也可采用

- 体积紧凑、价格低廉
- 取样灵活，方便地进行纵向和横向分割以提高位置分辨
- 利用感应片、感应条读出，提高位置和能量分辨
- 实现强子量能器的补偿

取样量能器采用高 Z 的材料作吸收介质

- 电磁量能器采用**Pb**，以压缩体积
- 强子量能器常用**Fe**或**Cu**（集吸收体、结构支架和提供磁场回路的功能于一身）；添加低 Z 含氢或**U**材料为“补偿”

取样灵敏介质都是低 Z 物质，可以是固体、液体或气体探测器

取样量能器的信号读出方法分为

- 数字型
- 正比型

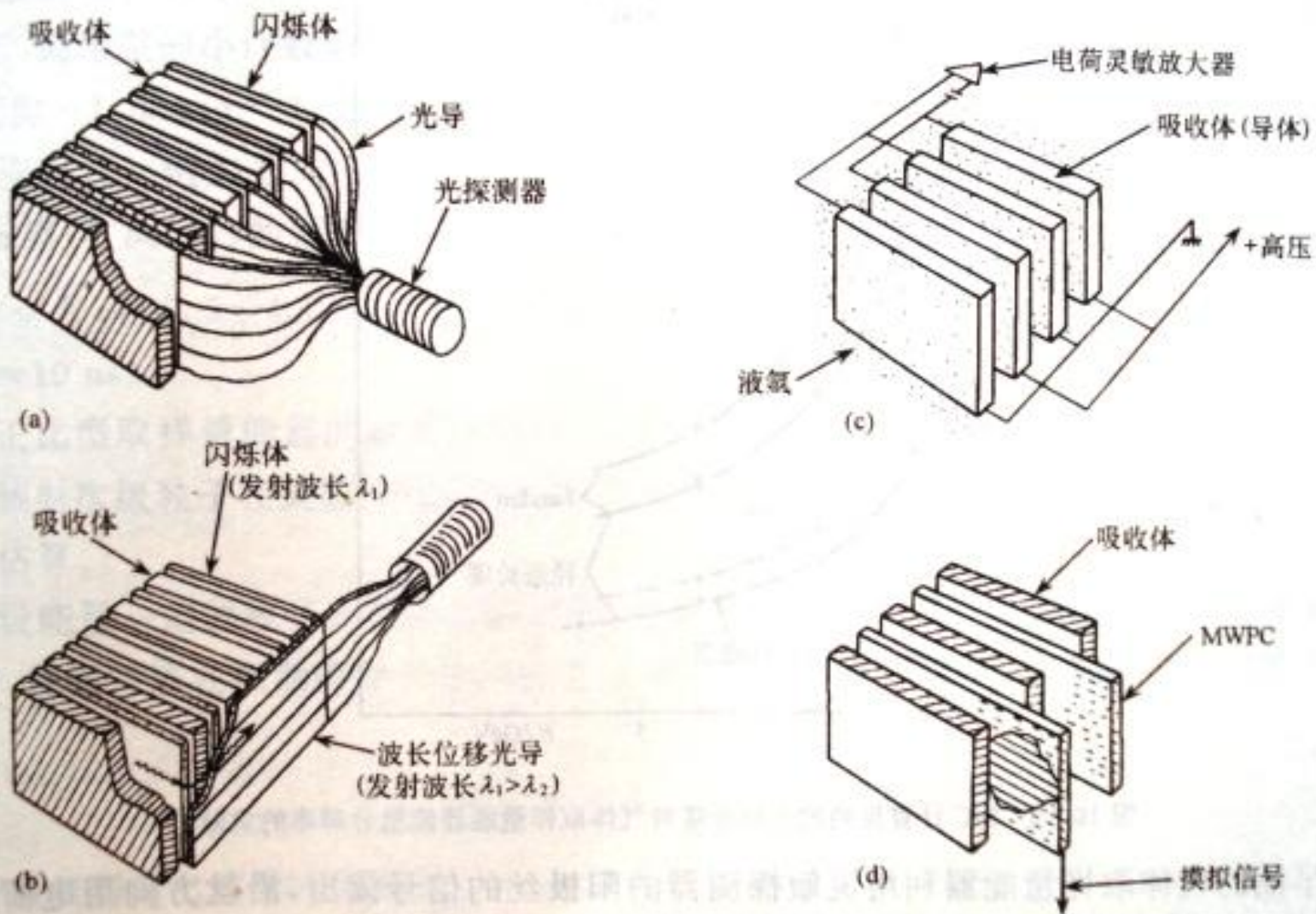


图 10.24 常用取样量能器的结构示意图

(a) 板状闪烁体与光电倍增管耦合；(b) 闪烁体通过波长位移板读出；(c) 电荷在液态或高压氩中生成由电极收集；(d) 电荷产生在正比型气体探测器中，经过适当的气体放大后读出

1. 气体取样量能器

- 具有内部气体放大
- 位置分辨好
- 对磁场不敏感
- 抗辐照能力强
- 价格便宜

能量分辨率差
取样层较厚，不能作得太紧凑

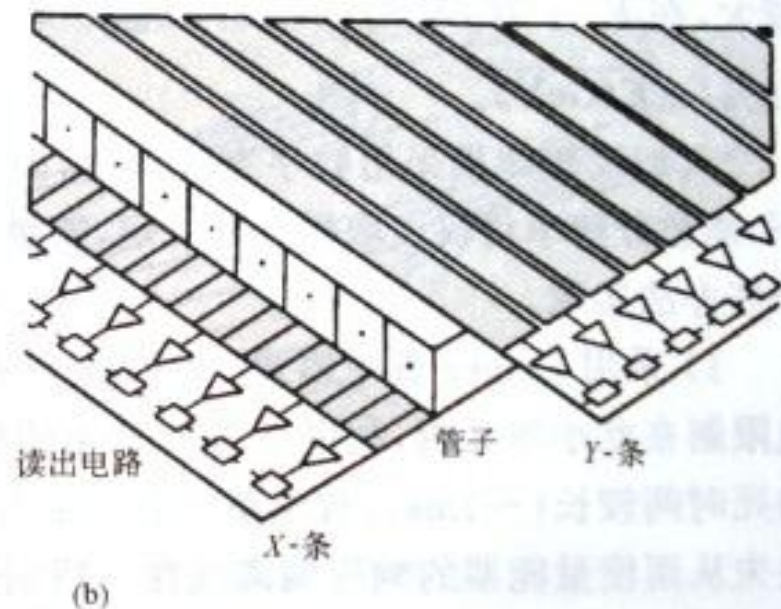
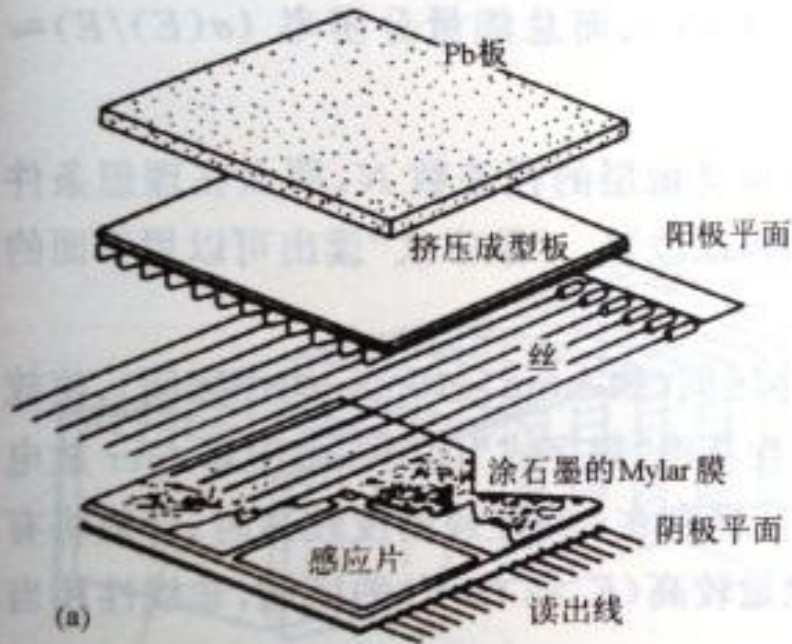
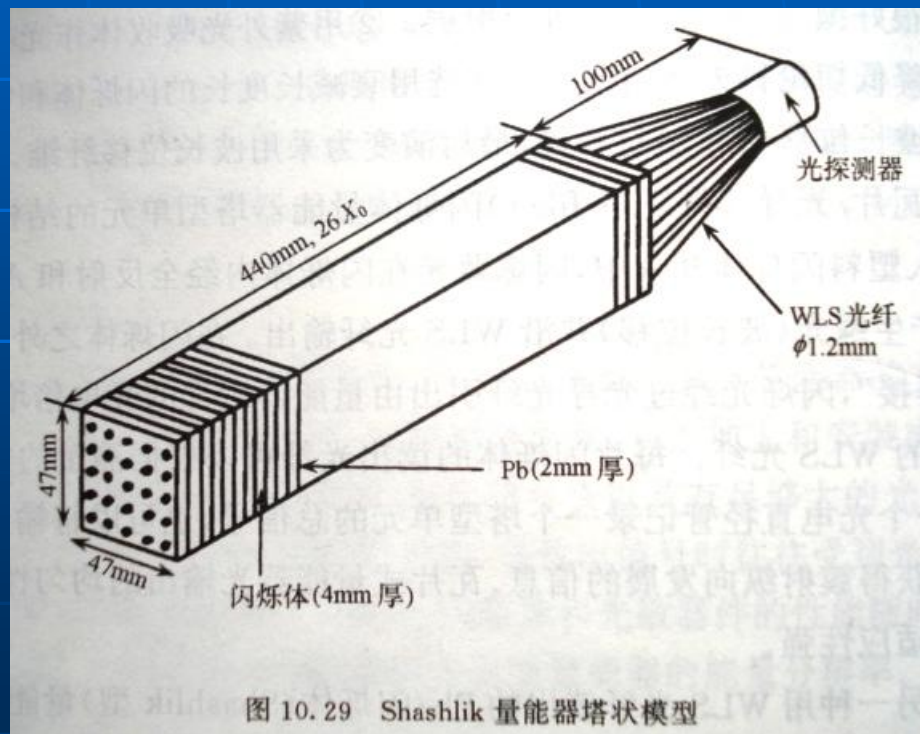
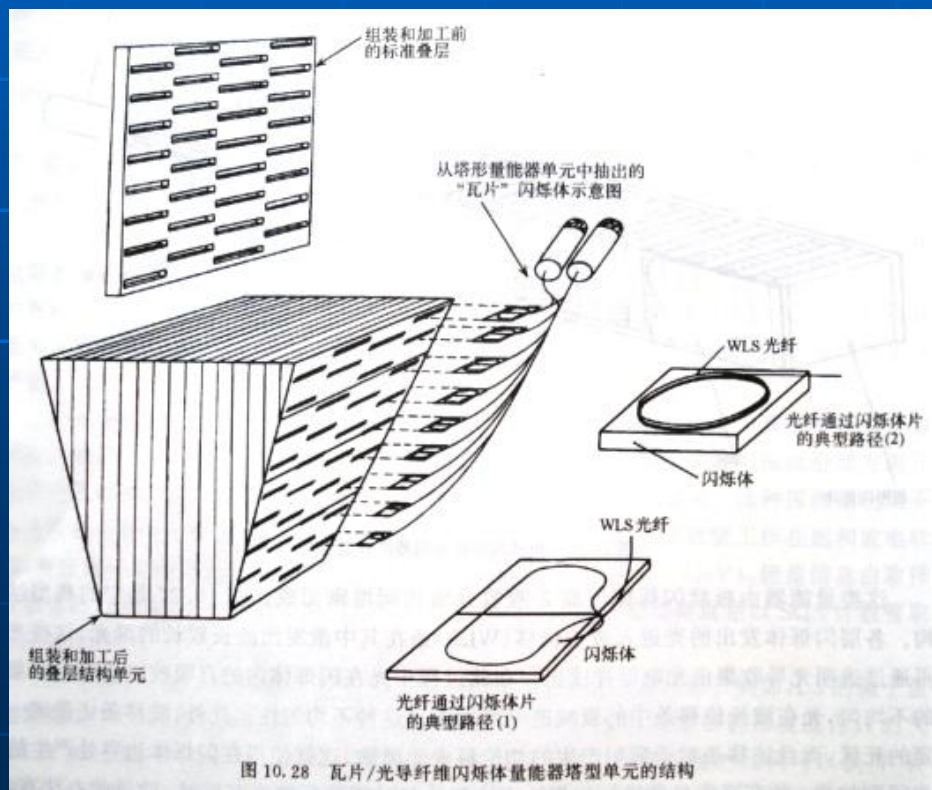


图 10.26 阴极感应读出的气体量能器的例子。(a) ALEPH 的电磁量能器结构；(b) Mont Blanc 的 PST 结构

2. 闪烁体取样量能器

- 易于加工和安装成各种形状
- 输出信号快
- 光产额大，光电子的涨落对能量分辨的影响小

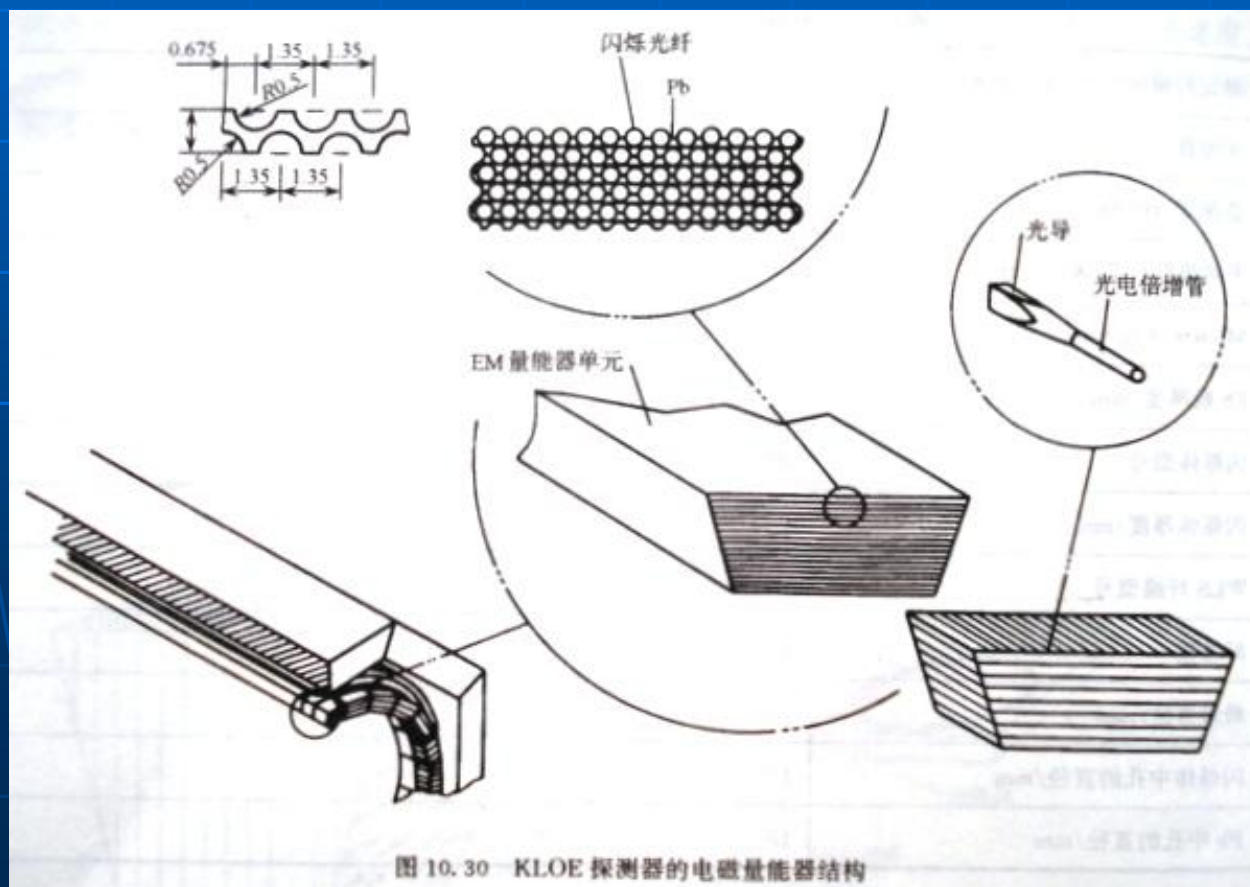
- 易受到光收集不均匀的影响
- 光电倍增管M涨落的影响
- 闪烁体和光电器件随时间衰退



■ 闪烁光纤量能器

- 吸收体介质层和闪烁光纤层相间堆砌而成
- 点阵结构，闪烁光纤埋藏于吸收物质之中
- 需抗辐照性能高的闪烁光纤；液体闪烁光纤

能量分辨达
 $5.7\%/\sqrt{E}$



3. 液体介质取样量能器

- 液体的密度大、电离能损大，可用简单的电离室来收集
- 无放大，稳定性高，刻度简单
- 液态取样介质的净化十分重要

两种结构

- 游泳池型：吸收体、电极等都在液体介质中
结构简单、死空间小
- 液态吸收体置于密闭容器中

取样介质：

- **LAr**，价格便宜易于获得
- 也有 **LKr**， **LXe**

§ 5 量能器应用

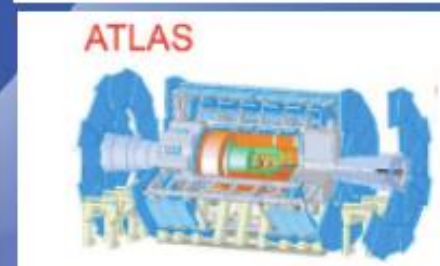
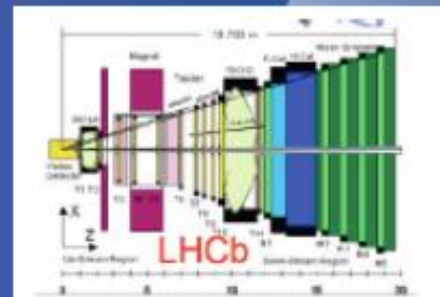
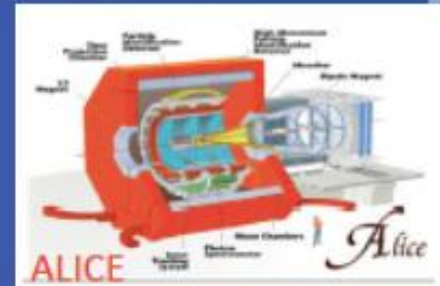
Summary of Crystals for HEP

Crystal	NaI(Tl)	CsI(Tl)	CsI	BaF ₂	BGO	PbWO ₄	LSO(Ce)	GSO(Ce)
Density (g/cm ³)	3.67	4.51	4.51	4.89	7.13	8.3	7.40	6.71
Melting Point (°C)	651	621	621	1280	1050	1123	2050	1950
Radiation Length (cm)	2.59	1.85	1.85	2.06	1.12	0.9	1.14	1.37
Molière Radius (cm)	4.8	3.5	3.5	3.4	2.3	2.0	2.3	2.37
Interaction Length (cm)	41.4	37.0	37.0	29.9	21.8	18	21	22
Refractive Index ^a	1.85	1.79	1.95	1.50	2.15	2.2	1.82	1.85
Hygroscopicity	Yes	Slight	Slight	No	No	No	No	No
Luminescence ^b (nm)(at peak)	410	560	420 310	300 220	480	560 420	420	440
Decay Time ^b (ns)	230	1300	35 6	630 0.9	300	50 10	40	60
Light Yield ^{b,c} (%)	100	45	5.6 2.3	21 2.7	13	0.1 0.6	75	30
d(LY)/dT ^b (%/°C)	~0	0.3	-0.6	-2 ~0	-1.6	-1.9	-0.3	-0.1
Experiment	Crystal Ball	CLEO BaBar BELLE BES III	KTeV	TAPS (L*) (GEM)	L3 BELLE PANDA?	CMS ALICE PANDA? BTev...	-	-

a. at peak of emission; b. up/low row: slow/fast component; c. measured by PMT of bi-alkali cathode.

Technologies used in the LHC calorimeters

- PbWO_4 homogeneous calorimeter:
 - ▶ CMS ECAL, ALICE PHOS
- LAr sampling calorimeter:
 - ▶ ATLAS EM Barrel and Endcap, Hadronic Endcap, Forward calorimeters
- Scintillator/WLS fiber sampling calorimeters:
 - ▶ CMS HCAL Barrel and Endcap, ATLAS TileCal (barrel HCAL), LHCb HCAL
- Shashlik Pb/Scint sampling calorimeters:
 - ▶ ALICE EMCa/DCaI, LHCb ECAL
- Quartz Fiber/Steel sampling calorimeter:
 - ▶ CMS HCAL Forward

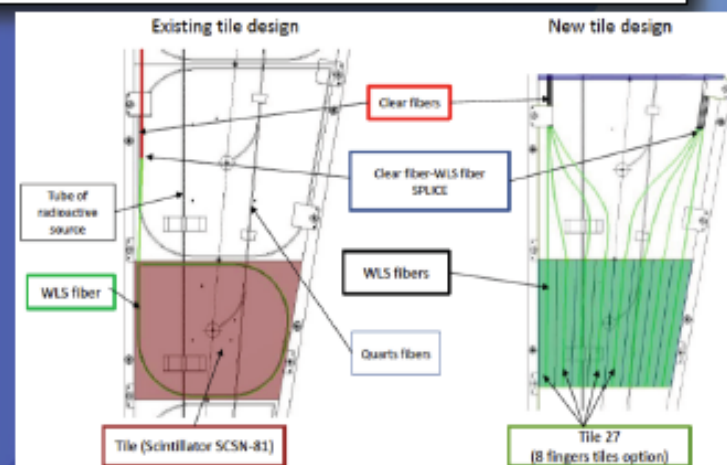
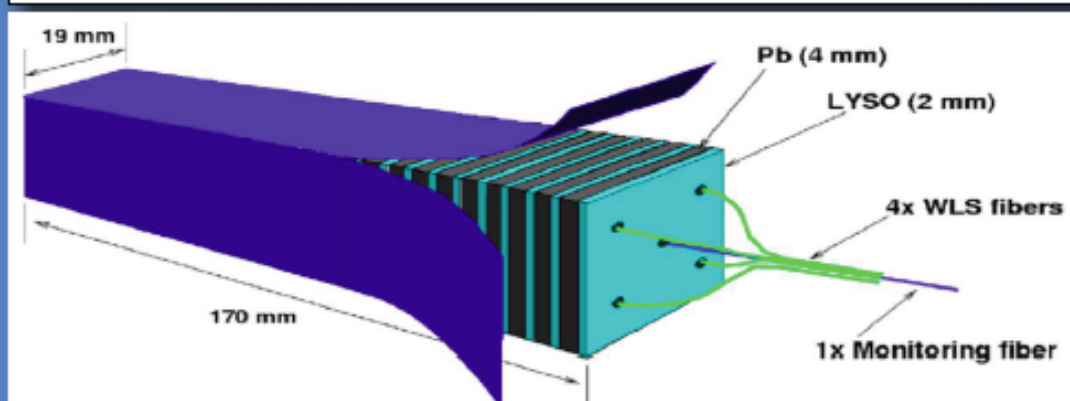


CMS Endcap Upgrade Options

Two approaches

I. Maintain traditional geometry:

- ▶ ECAL w. Shashlik-like design with rad. hard scintillators, e.g. LYSO, CeF3
- ▶ HCAL w. rad. hard scintillators and more readout fibers



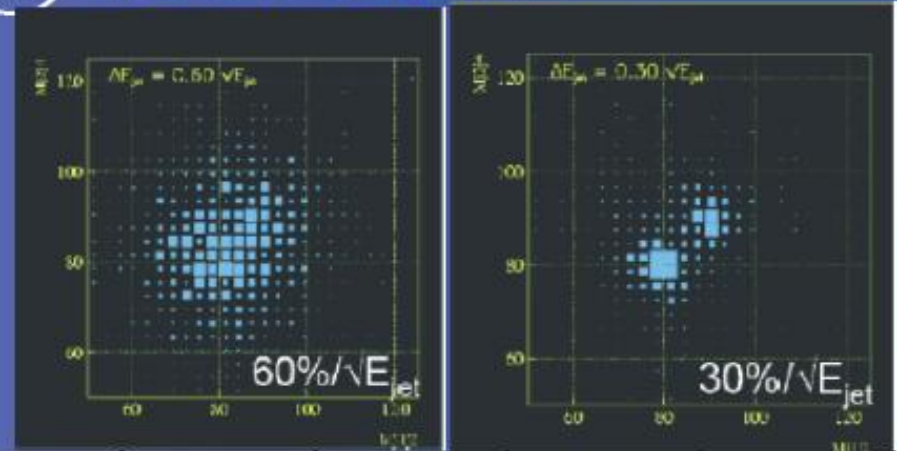
2. Alternative geometry/concepts with potential improved performance at high pileup

- ▶ Dual Readout following DREAM/RD52
- ▶ Particle Flow Calorimeter w. high granularity detector following work of CALICE

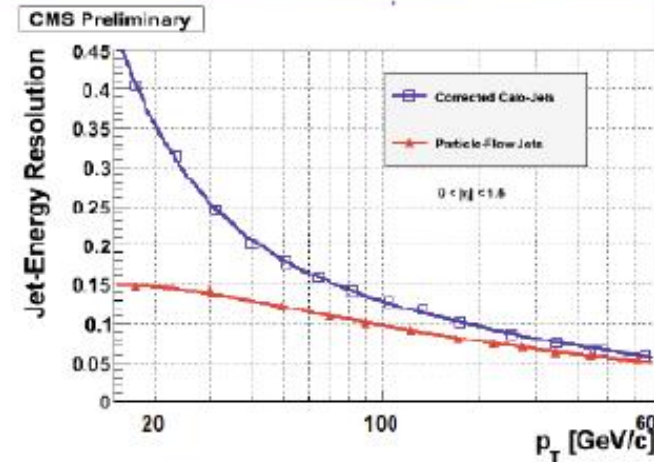
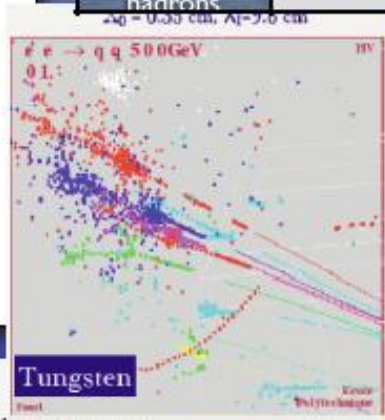
Considering an integrated approach with an endcap detector covering up to $\eta=4$

Calorimetry @ ILC/CLIC

- Goal: distinguish W,Z hadronic decays
 - ▶ $WW/ZZ \rightarrow 4 \text{ jets}$
- Requirement: jet energy resolution $\sim 3\text{-}4\%$ @ $\sim 50 \text{ GeV}$
 - ▶ $30\% \sqrt{E}$ stochastic term
- High granularity detectors
- Particle Flow Algorithm:
 - ▶ measure charged particles with trackers
 - ▶ photons with ECAL
 - ▶ neutral hadrons with ECAL+HCAL
 - ▶ Combine tracker and calo information to separate clusters originated by charged from those by neutral
 - ▶ Minimization of shower overlaps to avoid ambiguity and double counting



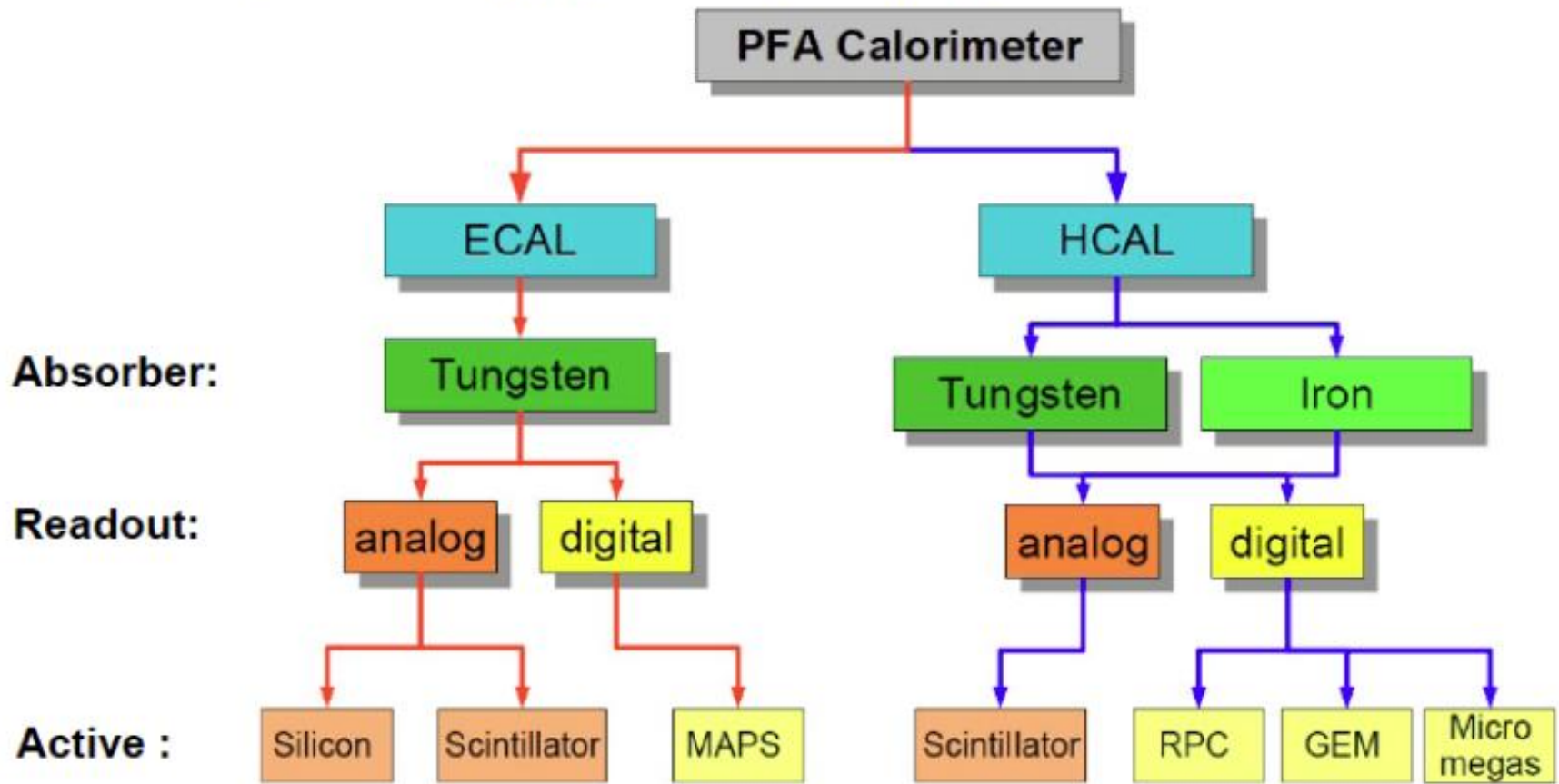
Particles in jet	fraction of energy in jet	detector	single particle resolution	jet energy resolution
charged particles	60%	tracker	$\sim 0.01\% \cdot p_T$	negligible
photons	30%	ECAL	$\sim 15\%/\sqrt{E}$	$\sim 5\%/\sqrt{E}$
neutral hadrons	10%	ECAL+HCAL	$\sim 45\%/\sqrt{E}$	$\sim 15\%/\sqrt{E}$



$$\sigma = \sigma_{\text{charged}} \oplus \sigma_{\gamma} \oplus \sigma_{\text{neutral}} \oplus \sigma_{\text{collision}}$$

Calorimetry @ ILC/CLIC

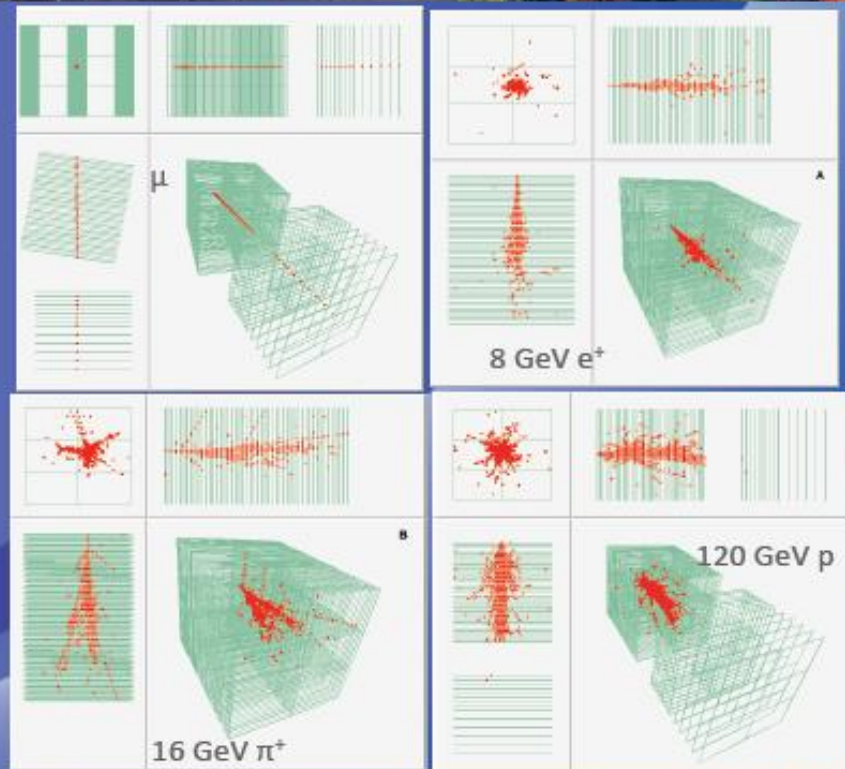
★ Various options for high granularity sampling calorimeters...



Calorimetry @ ILC: DHCAL

J. Repond, *First Results from the CALICE Digital Hadron Calorimetry*, CHEF 2013, April 2013

- DHCAL prototype:
 - ▶ RPC + Fe (or W) absorbers
 - ▶ Main stack (38-layers 17.5mm steel)
 - ▶ Tail catcher (14-layer 25 mm steel + 6x10mm)
 - ▶ Each layer (1m² area) consists of 3 RPCs (1cm² pads) for approximately ~9000 channels/layer
- Exposed on testbeam at FNAL first and then to CERN on PS and SPS beams



Calorimetry @ ILC: SDHCAL

Linearity recover (INL < 5%) with semi-digital readout with multiple (Nthr=3) thresholds

Description

CERN SPS TB & Data Taking

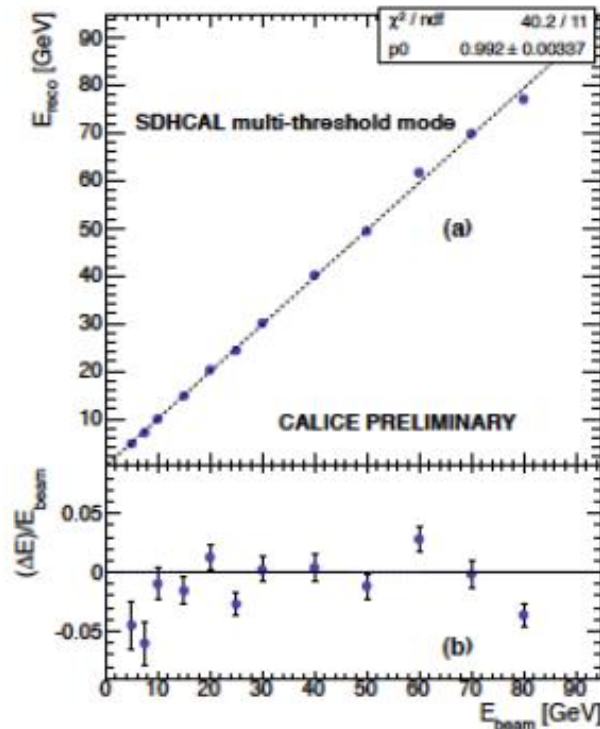
Particle Identification

Energy Response

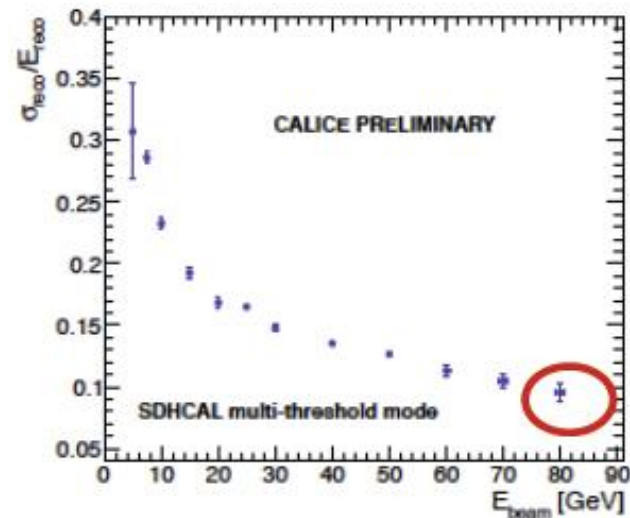
Summary

back-up

Multi-threshold mode : linearity & resolution



- Linearity $\leq 5\%$ over full range
- Significant impact on the energy resolution



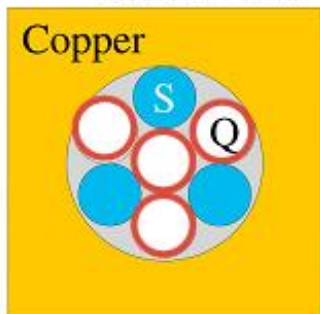
$\sigma(E)/E < 10\% @ 80\text{GeV}$

EH-CAL

- Dream Detector : not PFA
- scintillator / cerenkov fiber

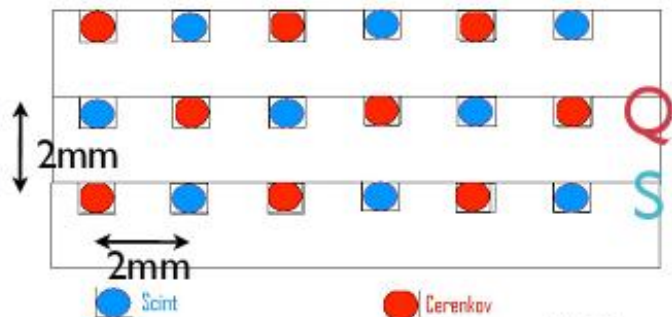
charged EMshower

unit cell



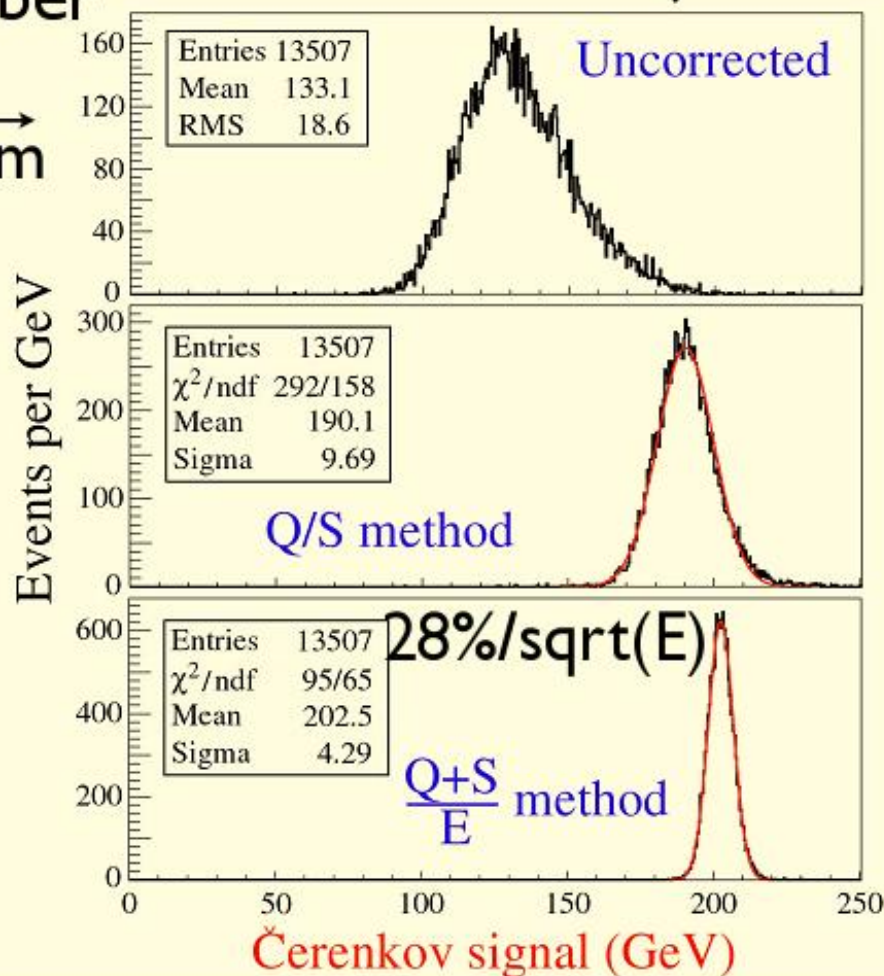
2.5 mm

4 mm



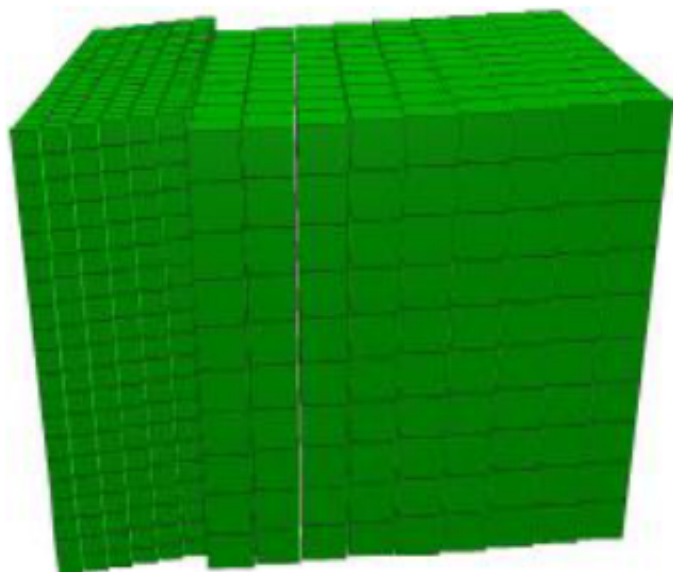
ILC

200GeV-'jet'

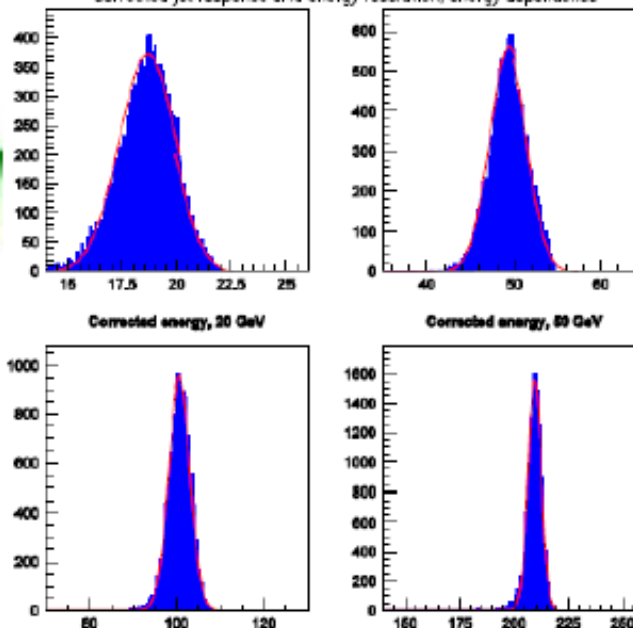




The HHCAL Detector Concept

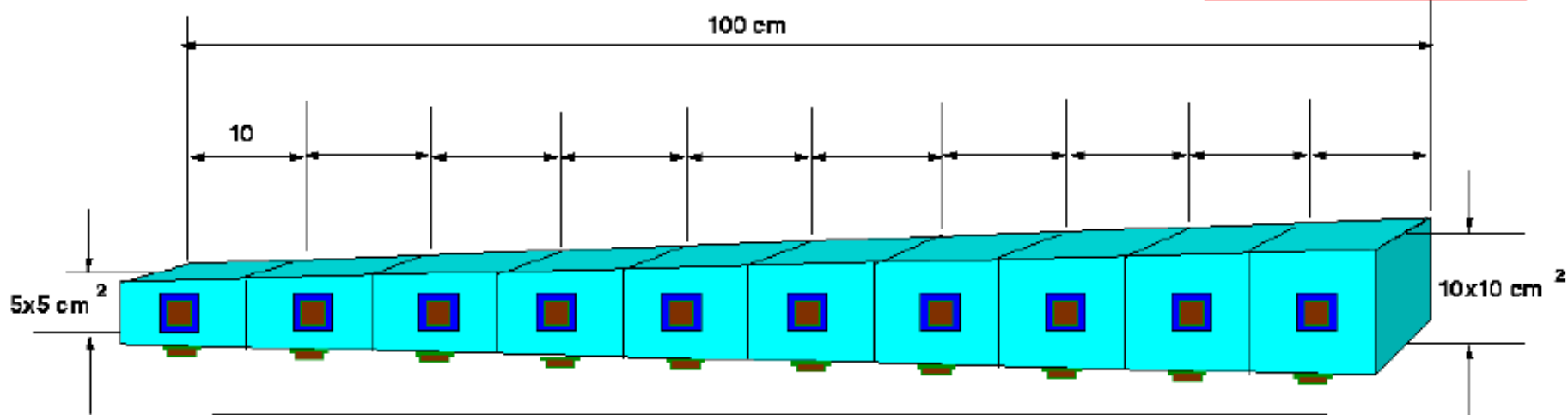


Corrected jet response and energy resolution, energy dependence



See S. McGill, H. Wenzel, Callor2012: GEANT simulations show a jet energy resolution at a level of $20\%/\sqrt{E}$ after corrections.

Cost < \$2/cc!



R.-Y. Zhu, ILCWS-8, Chicago: a HHCAL cell with pointing geometry



Candidate Crystals for HHCAL



Parameters	$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO)	PbWO_4 (PWO)	PbF_2	PbClF	$\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (BSO)
ρ (g/cm ³)	7.13	8.29	7.77	7.11	6.8?
λ_1 (cm)	22.8	20.7	21.0	24.3	23.1
n @ λ_{max}	2.15	2.20	1.82	2.15	2.06
τ_{decay} (ns)	300	30/10	?	30	100
λ_{max} (nm)	480	425/420	?	420	470
Cut-off λ (nm)	310	350	250	280	300
Light Output (%)	100	1.4/0.37	?	17	20
Melting point (°C)	1050	1123	842	608	1030
Raw Material Cost (%)	100	49	29	29	47

总结

- 量能器就是用来测量粒子能量的探测器。同时也能给出粒子的位置、飞行方向。
- 按灵敏层结构可分为
 - 全吸收型（全灵敏型）
 - 取样型
- 按入射粒子和量能器物质的相互作用可分为
 - 电磁量能器
 - 强子量能器
- **PFA**成像型量能器