

## 多层平板雪崩式量能器的性能

K. T. McDonald

(Princeton 大学物理系)

A. H. Walenta

(Brookhaven National Laboratory)

陆昌国

(中国科学院高能物理研究所)

### 摘 要

作者第一次尝试将平板雪崩室应用于取样量能器。文章讨论了这种类型量能器中可能存在的涨落因素,给出了在单间隙 PPAC 上进行模拟测试及对多层 PPAC 量能器的实际测试的实验结果。如果采用 2mm 厚的铅板作为吸收体的话,能量分辨率可望达到  $17\%/\sqrt{E}$ 。

### 一、引 言

平板雪崩室 (Parallel Plate Avalanche Chamber, 简称 PPAC) 应用于核物理实验已有很久的历史。在早期的文献中<sup>[1,2]</sup>,人们已经研究了平板结构的充气式计数器的性能,发现在两个平行板之间加上高压时,其电场是均匀的,所以当入射粒子在气体中产生电离粒子,而且所加电压足够高的话,在电离粒子产生点立即会开始一个雪崩放大过程。它不同于 Geiger 管的情况,必须当电离电子漂移到离中央阳极足够近的区域,才会引起雪崩。这样 PPAC 就避免了由电子漂移距离不同而引起的时间抖动 (gitter)。同时, PPAC 输出信号的上升时间也非常短,  $\sim 3 \cdot 10^{-9}$  秒。这些性质对于要求高时间分辨率的实验是有吸引力的。

对这种类型计数器的进一步研究就发展成为后来广为应用的火花室,然而后者已经进入火花放电区了。至于 PPAC 本身并没有在粒子物理中得到广泛的应用,主要是由于其探测效率低和能量分辨率较差。尽管如此,这种类型的探测器在核物理中探测像  $\alpha$  粒子那样的重带电粒子仍不失为一种有特色的工具<sup>[3]</sup>。可以利用非常薄的金属膜作为电极板,制成大面积的带电粒子穿越式计数器,由于它优越的时间特性,可以允许很高的计数率。

在提高这种计数器对最小电离粒子的探测效率方面人们也作了努力<sup>[4]</sup>。采用适当的

气体以及利用分条状的阳极,文献[4]的作者制成了探测最小电离粒子效率为90%,时间抖动为3ns,上升时间为2ns,空间精度好于2mm的PPAC.

本文所讨论的多层平板雪崩式量能器则是将这种平行板式结构的探测器用于能量测量的一种新的尝试.我们知道在对撞机上,由于探测器要覆盖很大的立体角,所以体积十分庞大,尤其是量能器,在整个探测器的建造成本中占相当大比重,如果采用丝室结构的取样量能器,免不了要用几千根,甚至上万根丝,不仅建造困难,而且更换断丝也十分困难.如何降低量能器的建造成本及简化它的建造和维修技术,是粒子物理实验工作者必须考虑的问题.如果PPAC的能量分辨率能达到较为适当的水平,则由于结构简单,成本较低,在一些对能量分辨率要求不太苛刻的实验中,不失为一种可行的方案.

## 二、PPAC 气体放大的基本原理

当带电粒子穿过PPAC时,它会在气体中产生电离,这些初始电离粒子在两平板之间的强电场下将产生雪崩式的气体放大,二次电离的数目随距离作指数增长,当到达阳极时为

$$n_s(x_0) = e^{\alpha(d-x_0)} \quad (1)$$

式中各量见图1所示,其中 $\alpha$ 为第一 Townsend 系数,可表示为  $\alpha = APe^{-B/E^2}$ ,  $P$  为气体压力,  $E$  为电场强度,  $d$  为两平板之间的距离,  $x_0$  为初始电离的位置.假如入射带电粒子在气体内产生了均匀的初始电离,其密度为  $\rho$ ,则总的二次电离的电荷为

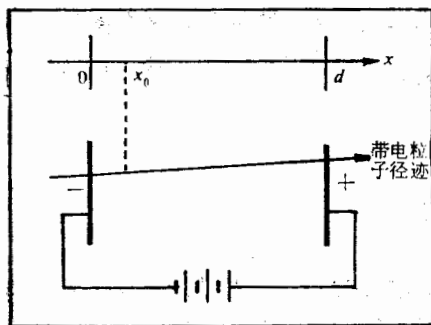


图1 PPAC 雪崩放大的示意图

$$Q = \int_0^d \rho e^{\alpha(d-x_0)} dx_0$$

$$= \frac{\rho}{\alpha} (e^{\alpha d} - 1) \approx N_0 \frac{e^{\alpha d}}{\alpha d} \quad (2)$$

其中  $N_0 \equiv \rho d$ . 由(2)式可得气体增益

$$G = \frac{e^{\alpha d}}{\alpha d} \quad (3)$$

很易看出,在气体增益很大的情况下,放电信号的绝大部分由非常靠近阴极的初始电离引起,所以两平板之间真正有效的区域只是这很薄的一层.这一点正是使PPAC能量分辨率变差的主要原因,以下在分析实验数据时还要提到.

## 三、单间隙 PPAC 的实验结果

用PPAC去探测单个最小电离粒子,其输出信号很微弱,但用于探测簇射信号的话,一簇带电粒子在PPAC中造成的信号的迭加,将使它们易于被观察到.我们首先制作了一个单间隙的PPAC,进行了簇射的模拟性测量.一个极板为铝板,另一个极板为覆盖

第  
在  
0.3c  
的  
使  
2Mc  
束  
放  
速  
器  
器  
信  
在  
良  
可  
置  
定  
在  
后  
改  
度  
与

2000  
超过  
MeV  
测量  
能量  
特点  
所  
下  
的  
为

在铝制框架上的铝箔, 两者之间用绝缘支架隔开, 改变绝缘垫圈的厚度, 可将间距保持为 0.3cm 或 0.67cm. 它们被密封在一个有机玻璃制成的盒内, 盒内通以 95%Ar + 5% 丙酮的混合气体. 在有机玻璃盒的端盖上相对铝箔电极板的位置挖有一方孔, 覆盖 Mylar 膜, 使带电粒子容易穿过 Mylar 膜及铝箔进入电场区.

首先我们测量了 PPAC 的气体增益. 测试在美国 Brookhaven 国立实验室化学部的 2MeV 电子静电加速器上进行. 实验装置示意图见图 2. 为了对静电加速器射出的电子束团中电子数目进行标定, 我们在束流线上放置了电离室, 正比室及闪烁计数器, 调节加速器的输出强度, 我们就可以测得闪烁计数器计数 (即电子数目) 与电离室、正比室输出信号幅度的关系曲线, 实验结果显示它们存在良好的线性关系, 所以在以后的实验中就可以用电离室和正比室作为监视电子数的装置. 移开闪烁计数器, 将加速器输出强度固定在适当的值上 (20~25 个电子/束团), 然后改变 PPAC 上的高压, 测量其输出信号幅度与电压的关系曲线. 当电压甚低时 (如

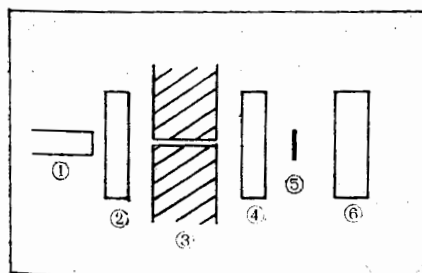


图 2 实验装置示意图

①静电加速器束流管道 ②电离室 ③铅准直器  
④多丝正比室 ⑤闪烁计数器 ⑥ PPAC

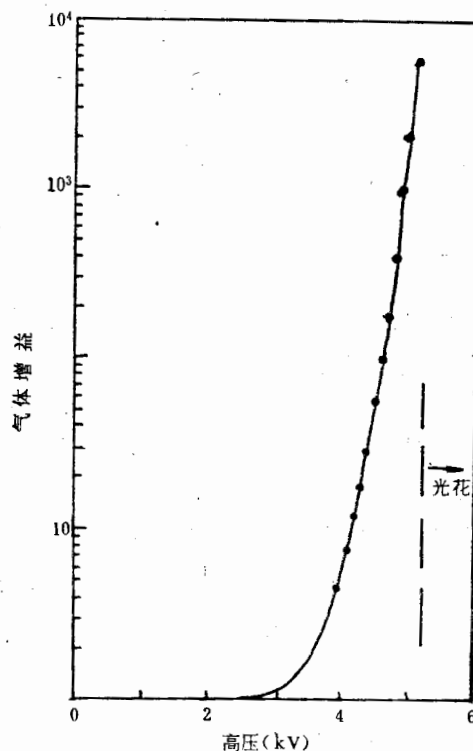


图 3 PPAC 的增益曲线

3mm 间隙, 95%Ar + 5% 丙酮

2000V), PPAC 处于电离工作状态, 没有气体放大, 这时增益为 1, 从图 3 可见, 当高压超过一定值后, 增益随高压迅速上升, 要获得  $\sim 10^3$  的增益是很容易的.

我们分别用此静电加速器和 BNL 同步辐射加速器 (NLSL) 上的电子直线加速器 (25 MeV) 对 PPAC 在簇射工作条件下的性能进行了模拟性测试. 调节电子束团中的电子数, 测量 PPAC 和多丝正比室的能量分辨率, 我们得到了图 4 的能量分辨率曲线, PPAC 的能量分辨率为多丝正比室的 1.5 倍. PPAC 的能量分辨率较差的原因是由 PPAC 的工作特点所决定. 正如第二节中已经提到的, 在 PPAC 中, 只有非常接近阴极的初始电离电子所引起的雪崩, 才对输出信号有最大的贡献, 所以尽管入射粒子在其径迹上均匀地产生了一串初始电离串, 实际上只有很少一部分起了作用. 例如高能电子在穿过 1 个大气压下的 Ar 气体时, 在 1cm 的径迹长度上产生约 25 个初始电离串, 它们两两之间的平均距离为  $1/25$ cm. 假设我们所用的 PPAC 的间隙为 0.67cm, 增益为  $10^3$ , 由 (3) 式可得

之极

1) 系为电均电

(2)

(3)

离引分辨

的话, 制作了覆盖

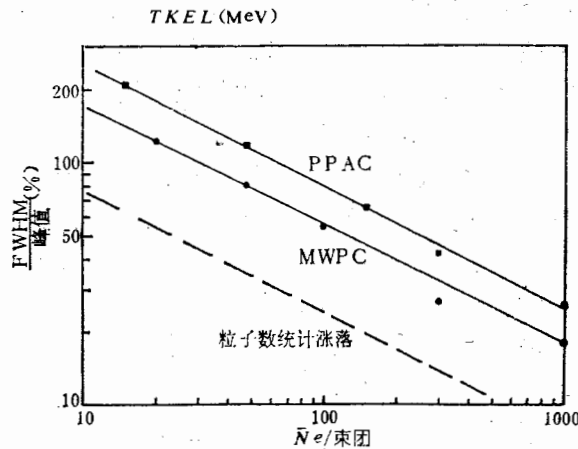


图4 PPAC 和 MWPC 的能量分辨率

$ad \approx 9.1$ ,  $\alpha \approx 14$ , 则  $1/25\text{cm}$  的距离间隔造成的气体增益的差别为  $e^{14 \cdot \frac{1}{25}} \approx 2$ 。有两种涨落现象将会严重影响 PPAC 的能量分辨率, 其一是初始电离的产生点, 在  $\alpha$  值较大情况下, 只要初始电离点稍有涨落, 就会引起气体增益很大的变动, 其二由于实际上起主要作用的只是靠近阴极区域的  $1 \sim 2$  个初始电离电子, 样本数非常少, 所以  $\delta$  粒子的二次电离涨落将是十分可观的。除了这种由过程本身固有的涨落造成的影响外, 两平板之间的距离由机械加工所造成的  $1\%$  的变化也将引起增益的  $10 \sim 15\%$  的变动。所有这些都说明 PPAC 的能量分辨率比 MWPC 差  $1.5$  倍是完全可以预料的。

#### 四、多层 PPAC 的结果

让我们首先估算一下多层 PPAC 取样量能器的能量分辨率。有不少作者对电磁簇射和强子簇射量能器中簇射过程发展的固有涨落因素和实际量能器中的人为的局限因素作了详尽的讨论<sup>[5-10]</sup>。影响电磁簇射取样量能器的能量分辨率的主要因素有以下两大类:

(1) 取样涨落。这是在取样量能器中簇射过程本身的统计涨落所造成的。

簇射粒子的总径迹长度  $T$  定义为簇射中所有带电粒子的径迹长度之和, 当然它依赖于在量能器中能探测到的带电粒子的最小动能  $E_c$ , 即截断能量 (Cut-off energy), 在气体取样量能器中,  $E_c$  值很小, 可近似地认为  $E_c = 0$ , 则有

$$T \approx \frac{E}{\epsilon} x_0, \quad (4)$$

其中  $E$  为入射粒子能量,  $\epsilon$  为吸收体物质的临界能量,  $x_0$  为其辐射长度。如果每片吸收层的厚度为  $x$ , 则敏感层拦截的总带电粒子径迹数 (Number of gap crossing)  $N$  为

$$N = \frac{T}{x} \approx \frac{E}{\epsilon} \frac{x_0}{x}. \quad (5)$$

于是我们可以得到取样涨落的估算值

其中

度  $T$ 

其中

量并

正比:

量分

由每

式成

量漏

手

间隙

铁板

个放

数据

通

达  $120$ 

略。

注

结果图

的结果

测

上进行

带

计算机

图

能

呈现

$$\left(\frac{\sigma(E)}{E}\right)_{\text{取样}} = \frac{1}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{e}{E} \frac{x}{x_0}} = 3.2\% \sqrt{\frac{e(\text{MeV}) \cdot t}{E(\text{GeV})}}, \quad (6)$$

其中  $t$  为以  $x_0$  为单位的一层吸收体厚度。

考虑到截断能量  $E_c$  及由多次散射造成的簇射次级粒子径迹的偏斜  $\cos\theta$  对总径迹长度  $T$  的影响, 可得到更精确些的公式<sup>[10]</sup>

$$\left(\frac{\sigma(E)}{E}\right)_{\text{取样}} = 3.2\% \sqrt{\frac{e(\text{MeV}) \langle \cos\theta \rangle}{F(x)}} \cdot \sqrt{\frac{t}{E(\text{GeV})}}, \quad (7)$$

其中  $F(x)$  为  $E_c$  的函数,  $\langle \cos\theta \rangle$  为  $\cos\theta$  的平均值。

(2) 读出方法造成的统计涨落。在取样量能器中, 次级粒子的信息由灵敏层加以测量并读出的。采用液氩或闪烁体读出, 这种涨落因素并不严重, 但如果采用气体取样, 如正比丝室或 PPAC 等, 则由于 Landau 涨落及次级粒子径迹长度的涨落等, 则会对总的能量分辨率造成严重的影响。要指出的一点是 Landau 涨落和次级粒子径迹长度涨落都是由每个穿越粒子径迹引起, 我们可以指望  $\left(\frac{\sigma(E)}{E}\right)_{\text{取样}} \propto 1/\sqrt{N}$  的关系依旧成立, 也即下式成立

$$\left(\frac{\sigma(E)}{E}\right)_{\text{取样}} = R(\%) \sqrt{\frac{t}{E(\text{GeV})}}. \quad (8)$$

此外, 由于量能器不够大, 入射粒子能量太高, 致使部分簇射次级粒子逃逸造成的能量漏泄, 也会使能量分辨率变差<sup>[10]</sup>。

我们测试的装置由 29 块方形铁板组成, 其尺寸为  $15.2\text{cm} \times 15.2\text{cm} \times 1.27\text{cm}$ , 板间间隙为  $0.64\text{cm}$ , 29 块铁板构成 28 个间隙, 充以  $95\% \text{Ar} + 5\% \text{丙酮}$ , 奇数铁板接地, 偶数铁板接上正高压, 信号由偶数铁板通过隔离电容引出, 一共有 14 路输出信号分别输入 14 个放大器, 放大器屏蔽在探测器的一侧, 放大器的输出经  $50\Omega$  电缆连接到 CAMAC 在线数据获取系统。探测器外形见图 5 所示。

通过能量漏泄的估算<sup>[10]</sup>, 在我们测试的多层 PPAC 量能器中, 即使入射粒子能量高达  $12\text{GeV}$ , 也足够包含  $98\%$  以上的簇射能量, 所以能量漏泄对能量分辨率的影响可以忽略。

由(5)式可估算总带电粒子径迹数为  $\sim 60/\text{GeV}$ , 这样, 我们可以由单间隙 PPAC 的结果图 4 来预计多层 PPAC 量能器的能量分辨率  $\frac{\sigma}{\sqrt{E}} \sim 43\%$ , 这就是由取样涨落带来的结果。

测试是在 BNL AGS 加速器的 A-2 试验束 ( $1-4\text{GeV}$ ) 和 SLAC 的试验束 ( $4-16\text{GeV}$ ) 上进行的。14 路输出信号进入 CAMAC ADC 卡件, 通过在线数据获取系统将数据记入磁带。BNL 的在线计算机为 PDP11-60, 在线软件系统为 MULTI 系统, SLAC 的在线计算机为 LSI-11, 软件系统为 ATROPOS 系统。

图 6 为 14 路 ADC 信号之和的峰值与束流能量的关系, 由图可见, 输出信号与入射粒子能量呈现线性关系。我们注意到  $8\text{GeV}$  和  $12\text{GeV}$  两点, 对所有三个高压值下的结果, 都呈现相似的偏离, 这可能是由束流能量的系统误差引起。

有两种  
值较大情  
况上起主要  
作用的二次电  
子板之间的  
与这些都

对电磁  
的局限因素  
有以下两大

当然它依  
energy), 在

如果每片吸  
) N 为

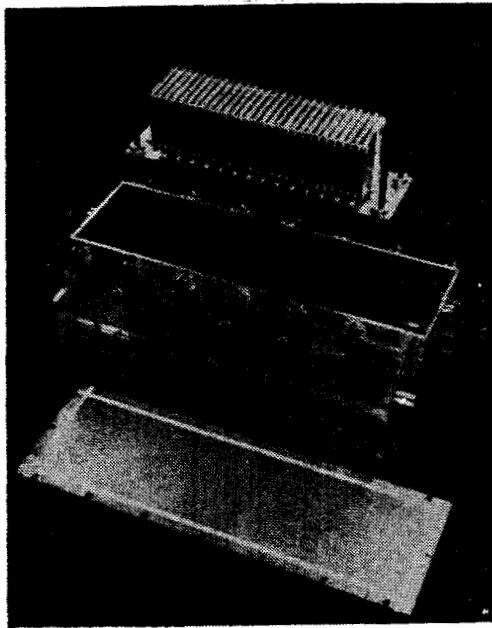


图 5 多层 PPAC 量能器外形  
图中自上而下: ① 铁板吸收体 ② PPAC 密封外壳  
③ 放大器屏蔽外壳 ④ PPAC 密封端盖

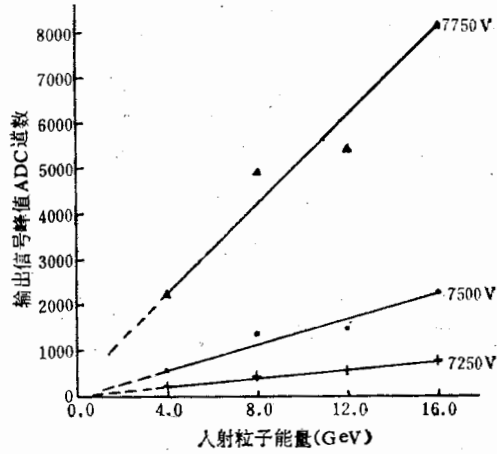


图 6 多层 PPAC 输出信号与入射粒子能量关系 (SLAC 实验结果)。  
曲线旁数值为加于 PPAC 上的高压值

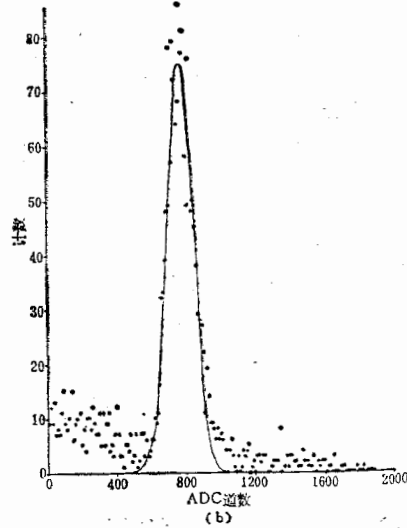
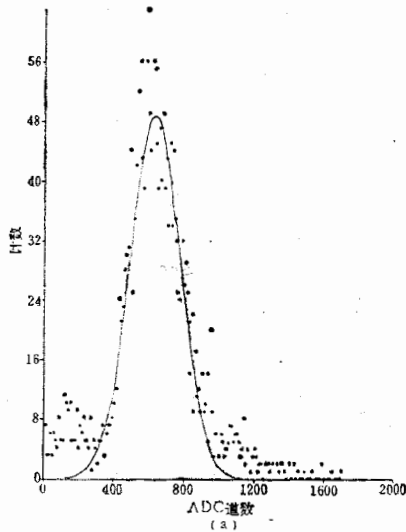


图 7 多层 PPAC 输出信号幅度谱。图中 Gauss 形曲线是对实验点的拟合  
(a) 4GeV, H. V. = 7500V (b) 16GeV, H. V. = 7250V

在图 7 中给出 4GeV 和 16GeV 两种能量下 14 路 ADC 信号之和的脉冲幅度谱, 以及用 Gauss 分布对实验点的拟合, 在谱的低端的实验点是由电子束流中的  $\pi$  介子引起的, 谱的高端, 我们可以明显地看到 Landau 尾巴的影响。

对各入射粒子能量下的输出信号幅度的实验点进行 Gauss 拟合, 我们求得相应的能量分辨率  $\sigma(E)/\sqrt{E}$ , 见图 8。在图中我们同时给出了由单间隙 PPAC 实验结果给出的

第  
预计  
接近  
PPA  
式(板,  
情况  
层间  
由于  
造成  
2, 4  
地显  
强子  
们可  
能。  
时, 强

6  
5  
4  
3  
2

其中:  
能量  
的电  
可见  
强子  
项

预计  $\sigma/\sqrt{E} = 0.43$ . 除了在 BNL AGS 试验束上的几个实验点外, 其它的点基本上都接近 0.43 的估计, 前者之所以较大, 可能是由于束流质量差所造成. 这说明我们对多层 PPAC 能量分辨率的理论估计基本上是符合实际情况的, 为了改善能量分辨率, 根据公式(6), 我们可以采用临界能量  $\epsilon$  小的物质, 并减小每层吸收体的厚度  $x$ , 如用 2mm 的 Pb 板, 则能量分辨率可望达到  $\sim 17\%/\sqrt{E}$ .

对多层 PPAC 对入射强子的响应我们作了初步观察. 图 9 显示了 12GeV  $\pi$  介子入射情况下得到的输出信号幅度谱, 幅度最低的尖峰是由最小电离粒子产生的,  $\pi$  介子穿过 28 层间隙, 在其中留下了最小电离能损. 第二个峰表示  $\pi$  介子在探测器内造成的强子簇射. 由于  $\pi$  介子束流中混杂有小量电子, 所以在图中还可以明显地看到由电子的电磁簇射所造成的“肩”. 对最小电离粒子进行了更细致的分析, 图 10 显示最小电离粒子分别在穿越 2, 4, 6, 8 个间隙后输出信号之和的幅度谱, 由图可见, 通过 4 个间隙后的信号谱已清晰地显示了最小电离粒子峰. 以上研究表明多层 PPAC 是有可能用来探测最小电离粒子及强子簇射的. 由于在这面积累的事例数较少, 所以在本文中无法作出定量的结论. 我们可以根据已有的对电磁簇射的知识大致上推断多层 PPAC 作为强子簇射量能器时的性能. 由文献 [10] 我们知道, 当取样量能器的吸收体为厚度  $x \leq 100 \text{gcm}^{-2} \approx 13 \text{cm}$  的铁板时, 强子簇射的能量分辨率为

$$\left[\frac{\sigma(E)}{E}\right]^2 \approx \left[\frac{50\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}}\right]^2 + \left[R'(\%) \sqrt{\frac{4t}{3E(\text{GeV})}}\right]^2, \quad (9)$$

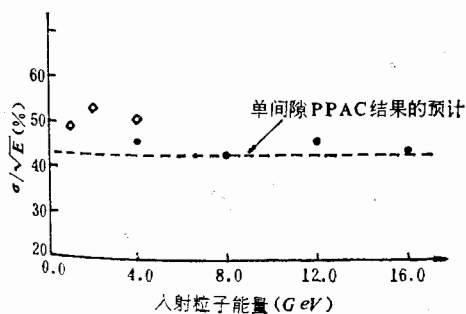


图 8 多层 PPAC 的能量分辨率  
◇取自 BNL 数据 ●取自 SLAC 数据

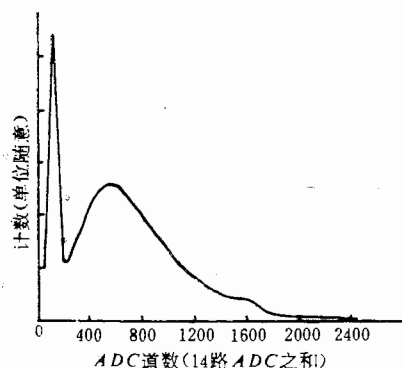


图 9 入射 12GeV  $\pi$  介子的输出  
信号幅度谱

其中第一项为由强子簇射本身的涨落所造成的, 因为在强子簇射中差不多有 1/4 以上的能量是不可见的, 这部分丢失的能量的涨落严重地影响了能量分辨率. 第二项具有典型的电磁簇射能量分辨率的形式, 只是在根号中多了系数 4/3, 这也是由于  $\sim 1/4$  的能量不可见所致, 另外  $R'/R \approx 1.5 - 2$  (吸收体为铁),  $R$  是电磁簇射下的系数. 已知在电磁簇射情况下, 利用 PPAC 得到的  $\sigma/\sqrt{E} \approx 43\%$ , 利用 MWPC 得到的  $\sigma/\sqrt{E} \approx 29\%$ , 则在强子簇射的条件下, (17) 式的第二项对 PPAC 将变为 74%, 对 MWPC 为 50%, 再加上第一项的影响, 对 PPAC 得到 90%, 对 MWPC 得到 71%. 可见, 在用作为强子量能器时,

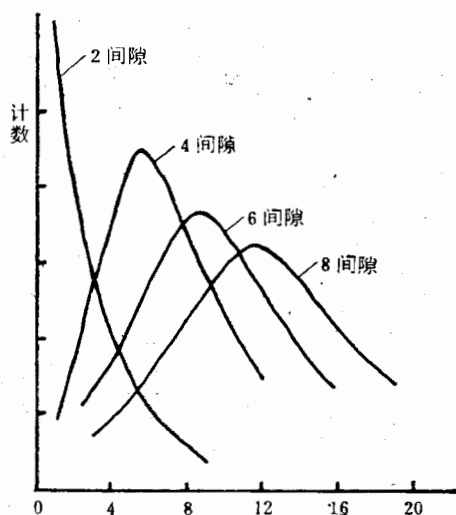


图 10 最小电离粒子的能损谱

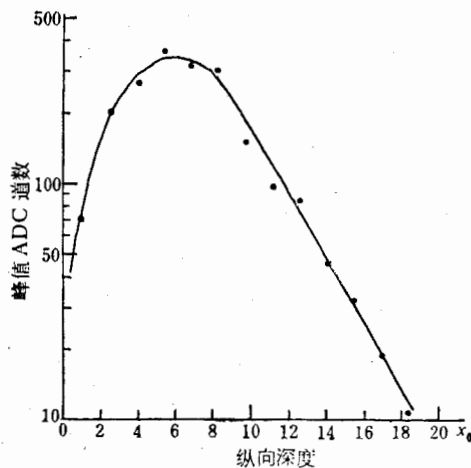


图 11 电磁簇射在多层 PPAC 中的纵向发展

PPAC 只比 MWPC 差 1.26 倍了。

最后,在图 11 中我们给出了电磁簇射在多层 PPAC 中的纵向发展过程。

## 五、结 论

多层 PPAC 量能器的性能可以简单地综述如下:

- (1) 结构简单,造价较廉,不需要丝和光电管,所以实际应用方便,维修容易。
- (2) 作为电磁簇射量能器,能量分辨率可望达到  $\sim 17\%/\sqrt{E}$ 。
- (3) 有 4 个气体间隙就可以分辨出最小电离粒子。
- (4) 可以作为很好的强子量能器。
- (5) 上升时间很快,  $\lesssim 10\text{ns}$ 。
- (6) 死时间比 MWPC 要小。
- (7) 如果阳极板采用条状或小块状结构,可以用来确定入射粒子的位置。

## 后 记

这项工作的结果曾在 1981 年夏季 BNL 的 ISABELLE 讨论会上由作者之一 (K. T. McDonald) 宣布过。本文由陆昌国加以整理,文章未经其他两位作者审阅,文中错误之处,由整理者负责。

在整个测试过程中受到了 BNL, SLAC 实验室有关工作人员及吴坚武同志的大力协助, Princeton 大学物理系基本粒子实验室的工作人员制作了单间隙和多层 PPAC 探测器,在此表示深切的谢意。

[1]  
[2]  
[3]  
[4]  
[5]  
[6]  
[7]  
[8]  
[9]  
[10]

ing  
mult  
mult  
17%



## 参 考 文 献

- [1] R. W. Pidd and L. Madansky, *Phys. Rev.*, 75(1949), 1175.
- [2] J. W. Keuffel, *Phys. Rev.*, 73(1948), 531.
- [3] F. W. Büsler et al., *Z. Physik*, 187(1965), 243.
- [4] W. R. Graves et al., *N. I. M.*, 176(1980), 229.
- [5] W. V. Jones, *Phys. Rev.*, D1(1970), 2201.
- [6] G. Abshire et al., *N. I. M.*, 164(1979), 67.
- [7] W. J. Willis and V. Radeka, *N. I. M.*, 120(1974), 221.
- [8] J. K. Walker and T. M. Knasel, *Rev. Sci. Ins.*, 37(1966), 913.
- [9] D. Hitlin et al., *N. I. M.*, 137(1976), 225.
- [10] V. Amaldi, *Physica Scripta*, 23(1981), 409.

## PERFORMANCE OF THE PARALLEL MULTIPLATE AVALANCHE CALORIMETER

K. T. McDONALD

(Princeton University, U. S. A.)

A. H. WALENTA

(Brookhaven National Laboratory, U. S. A.)

LU CHANG-GUO

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

### ABSTRACT

This is the first try to use PPAC as sampling calorimeter. The article is discussing the possible fluctuations in this type of calorimeter, presenting the results of simulating measurements performed on single gap PPAC and actual measurements for multiplate PPAC calorimeter. It is prospected that the energy resolution could be  $17\%/\sqrt{E}$ , if using 2 mm Pb plates as absorbers.

(K. T.  
错误之

大力协  
探测器,