

空气簇射切伦科夫光观测

李延国 何长孝 袁余奎 姜印琳 徐春娟
戴义方 陈端保 何会林 王建伟
(中国科学院高能物理研究所,北京)

摘 要

用快、慢光电倍增管分别构成两种探测装置,记录了广延空气簇射(EAS)切伦科夫(\checkmark)光的脉冲形状和光强. 测量了海平面EAS(能量 $E_0 > 5 \times 10^{14}$ eV) \checkmark 光脉冲的半高全宽(FWHM)分布和光子密度谱. 两种光强探测结果的比较表明:由GDB100慢光电倍增管和峰值ADC组成的光强测量系统,对于测定EAS \checkmark 光的光强是一种简单和经济的好方法.

一、引 言

利用EAS次级电子在大气层中产生的 \checkmark 光来研究宇宙线超高能现象和宇宙线天文学,至今仍是相当活跃的课题^[1-7]. 测量 \checkmark 光光强的横向分布函数和 \checkmark 光脉冲的时间结构,能确定EAS的极大深度和纵向发展,提供有关初级质量成分和相互作用特性的资料. 值得注意的是,到目前为止,仍没有报道有关 \checkmark 光脉冲的FWHM和光强测量误差的实验文章,这些误差关系到EAS极大深度和初级能量测定的可靠性.

在海平面附近,在离EAS轴心距离 $R < 100$ m的范围内,EAS \checkmark 光脉冲持续时间约为几个ns^[10],而当 $R > 100$ m时, \checkmark 光脉冲的FWHM主要与 R 和观测点到EAS极大的距离 H (km)有关. 通常采用快光电倍增管、快放大器和电荷灵敏ADC等快电子学技术,才能获得较为满意的结果,但是设备复杂,价格昂贵. 因此,寻找一种既经济又简单的观测方法,以用于对EAS \checkmark 光的某些项目的观测是有意义的.

二、实验安排

我们的观测装置已在工作[8]中作过介绍. 本实验安排如图1,六个探测器相互紧靠放置在一个大木箱中,构成五重符合,垂直对天观测. 其中,1[#]—4[#]为国产GDB100型慢光电倍增管,用于 \checkmark 光光强——脉冲幅度测量. 5[#]、6[#]探测器为Philips公司生产的XP2041型快光电倍增管,用于记录 \checkmark 光脉冲形状. 用半张角为 12° 的准直筒限制夜空背景光(测得本实验所在地夜空背景光强 $\Phi_B \sim 6 \times 10^8$ 光子/cm²·sr·s),保证信

噪比大于 4.

两个快光电倍增管的信号分别由 10m 和 22m 长的宽频带电缆, 直接耦合到 275 MHz 的存贮示波器. 存贮示波器的工作状态设置为: 内触发, 自动清除, 线性相加

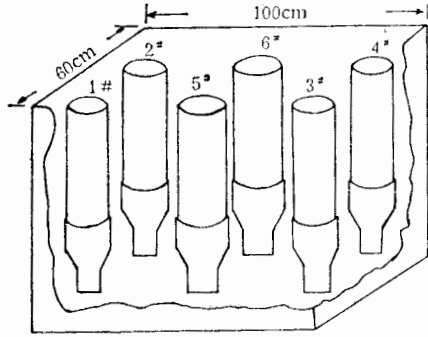


图1 实验安排框图

〈A + B〉. 主门输出信号参加符合选择. 在符合信号的控制下, 显示在屏幕上的脉冲波形被自动照相记录下来. 经过调整, 两个快光电倍增管的系统分辨率一致, 上升时间为 3.0ns, FWHM 为 3.8ns. 对天观测时, 阳极电流 I_a 约为 $100 \mu\text{A}$. 典型的脉冲波形见图 2. 用 PV-500 型投影仪测量每个脉冲的面积、FWHM 和两个脉冲的前沿上升到峰值 50% 的时间间隔.

慢光电倍增管的脉冲幅度信号经过 50 MHz 前置放大器放大 5 倍, 由 100m 长的宽

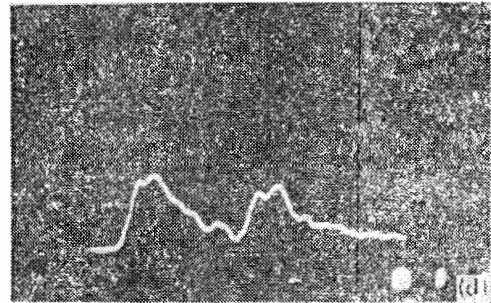
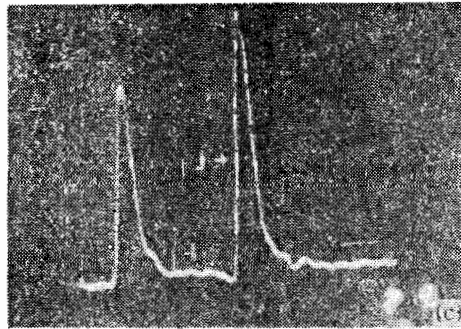
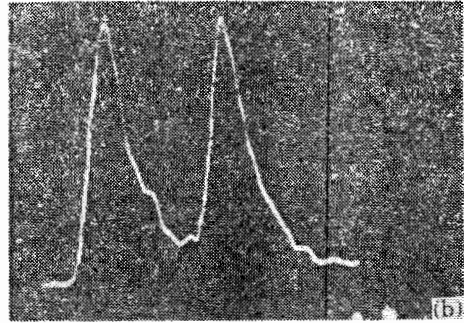
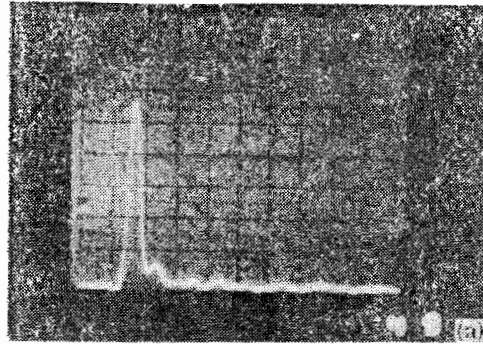


图2 典型 EAS \checkmark 光脉冲照片 (x 轴 10ns/div, y 轴 50mV/div)

- a) 系统响应脉冲 ($t_r = 2.8\text{ns}$, $\text{FWHM} = 3.7\text{ns}$)
- b) 宽脉冲 (FWHM 分别为 10.5ns , 12.0ns)
- c) 窄脉冲 (FWHM 分别为 5.5ns , 5.0ns)
- d) 脉冲有结构 (FWHM 分别为 17.5ns , 14.4ns)

为了从 GDB100 输出脉冲幅度得到相应的光阴极光子数,在相同条件下测量了宇宙线 μ 子穿过不同厚度的有机玻璃产生的 \checkmark 光的脉冲幅度. 考虑了光谱响应之后,得到 GDB100 输出脉冲幅度与 \checkmark 光子密度的关系. 根据文献报道的 EAS \checkmark 光光强的理论计算^[9]和实验测量^[17]推断阈能. 本实验探测到的光子阈密度约为 8 光子/cm²,相应 EAS 的下限阈能约为 5×10^{14} eV.

本实验于 1987 年元月在高能所主楼楼顶完成,有效观测时间约为 36 小时,共记录 1417 个事例,其中,有两个清晰脉冲波形照片的事例为 1337 个.

三、数据处理

我们对 1337 个事例作了如下分析计算:

1. 脉冲形状数据: a) 依照 Thornton 和 Clay^[10] 的经验,扣除系统分辨 FWHM (3.8ns), 求两个脉冲 FWHM 的平均值 $\langle \text{FWHM} \rangle$, 作为事例脉冲 FWHM 的期待值, 检验两个快光电倍增管脉冲 FWHM 数据的一致性,求 EAS \checkmark 光脉冲 FWHM 的测量误差. b) 根据每个光电倍增管的增益,修正脉冲面积数据,求其平均值 $\langle S \rangle$, 作为事例脉冲面积的期待值. 检验数据的一致性,求出 EAS \checkmark 光脉冲面积的测量误差.

2. 脉冲幅度数据: 在离线分析过程中,四个慢光电倍增管的脉冲幅度数据分别作放大倍数校正和 ADC 台阶扣除. 求四个幅度的平均值 $\langle P \rangle$ 作为事例脉冲幅度的期待值, 检验数据之间的一致性,求出 EAS \checkmark 光脉冲幅度测量的误差.

四、快光电倍增管脉冲面积与慢光电倍增管脉冲幅度之间的关系

在 EAS \checkmark 光观测中,快、慢两种光电倍增管记录的脉冲面积能很好地反映入射到光阴极的光子数. 但是,由于 EAS \checkmark 光脉冲的 FWHM 是 R 和 H 的函数,观测到的脉冲幅度与入射光子数之间,一般不存在比例关系. 考虑到 GDB100 时间响应慢,当 ns 量级的 \checkmark 光照射时,输出脉冲被展宽. 结果,在一定范围内,脉冲幅度与入射光子数之间具有线性关系. 我们用 XP2041 记录 EAS \checkmark 光脉冲的面积和 FWHM 等参数,来检验 GDB100 脉冲幅度测量的可靠性. 图 3 是 EAS \checkmark 光脉冲面积 $\langle S \rangle$ 与脉冲幅度 $\langle P \rangle$ 的关系. 从图中数据的分布趋势可以看出,在 50 倍的动态范围内,变量间的关系接近线性,直线回归方程为:

$$\langle S \rangle = K(A + B \cdot \langle P \rangle),$$

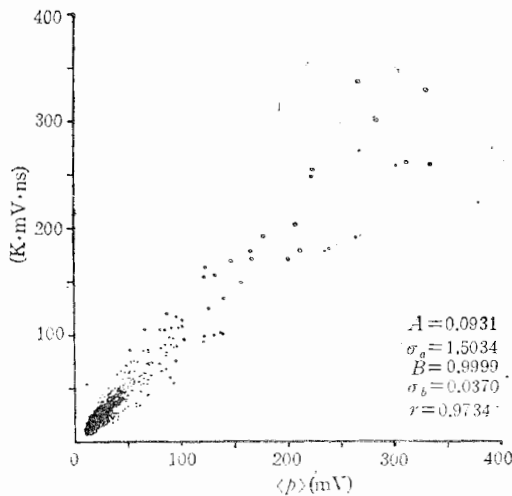


图 3 快、慢光电倍增管脉冲面积与脉冲幅度的关系

其中, $K = 30$, $A = 0.093 \pm 1.503$, $B = 1.000 \pm 0.037$. 截距误差大, 表明小信号测量误差大, 与实际情况相符.

对图3数据的离散性, 用二次抛物线加权回归分析表明, 它们服从正态分布. 其相关指数 $R = 0.978$, 方差 $\sigma = 0.239$.

考虑到 EAS \checkmark 光脉冲的 FWHM (简称 FWHM (\checkmark)) 变化必然会影响 GDB100 的输出脉冲幅度(即当 EAS \checkmark 光脉冲面积一定时, 窄的 FWHM(\checkmark), 对应于大的脉冲幅度), 若观测到的脉冲的 FWHM² 是 FWHM(\checkmark) 和系统 FWHM 的平方和, 那么, 在 FWHM(\checkmark) ≤ 24 ns 时, 对一定的 $\langle s \rangle$, GDB100 输出脉冲幅度的变化可小于 10%. 图4显示了 $\langle s \rangle / \langle p \rangle$ 与 FWHM(\checkmark) 的关系. 从图中点子分布的趋势可以看出, 在实验误差范围 ($\sigma = 0.24$), $\langle s \rangle / \langle p \rangle$ 与 FWHM(\checkmark) 无关.

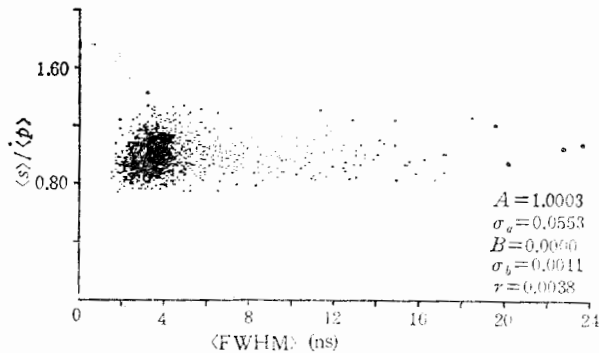


图4 $\langle s \rangle / \langle p \rangle$ 与 EAS \checkmark 光脉冲的 FWHM 的关系

五、结果和讨论

对实验数据进行的分析计算表明: 数据之间一致性很好, 观测是可靠的. 结果如下:

1. EAS \checkmark 光脉冲的 FWHM 和光强的测量误差: 单个快光电倍增管 EAS \checkmark 光脉冲的 FWHM 和脉冲面积的测量误差均约为 26%. 单个慢光电倍增管脉冲幅度测量误差约为 16%.

2. EAS \checkmark 光脉冲的 FWHM 分布: 图5显示了海平面 EAS \checkmark 光脉冲的 FWHM 分布 ($E_0 > 5 \times 10^{14}$ eV). 由图可见, 对于绝大多数事例, EAS \checkmark 光脉冲的 FWHM < 4 ns, 这是因为所记录的事例多数是近心簇射. 其中, 有三个事例脉冲幅度并不大, 而脉冲的 FWHM > 20 ns, 表明也记录到一些能量较高的远心簇射. 该分布与 McComb 和 Turver^[11] 的模拟计算及 Thornton 和 Clay^[10] 的实验结果一致, 与早期实验^[12] 所报道的 EAS \checkmark 光脉冲 FWHM 的分布也符合得很好.

3. \checkmark 光光子密度谱: 图6显示了用快光电倍增管测量 EAS \checkmark 光脉冲波形的面积和用慢光电倍增管测量脉冲幅度(峰值 ADC)得到的海平面 EAS \checkmark 光光子密度谱 ($E_0 > 5 \times 10^{14}$ eV). 用最小二乘法拟合得幂谱指数分别为: 1.62 ± 0.07 (面积测量结

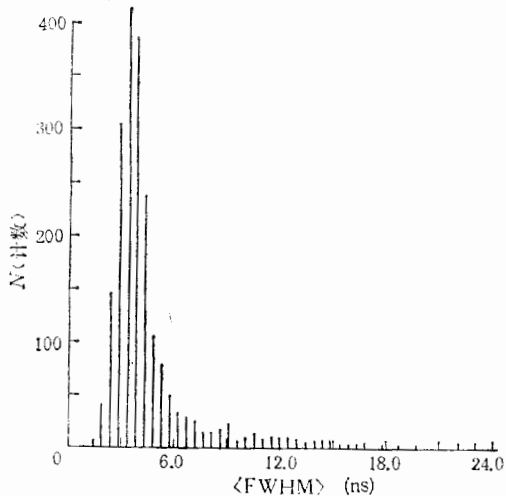


图 5 海平面 EAS Č 光脉冲的 FWHM 的分布
($E_0 > 5 \times 10^{14} \text{eV}$)

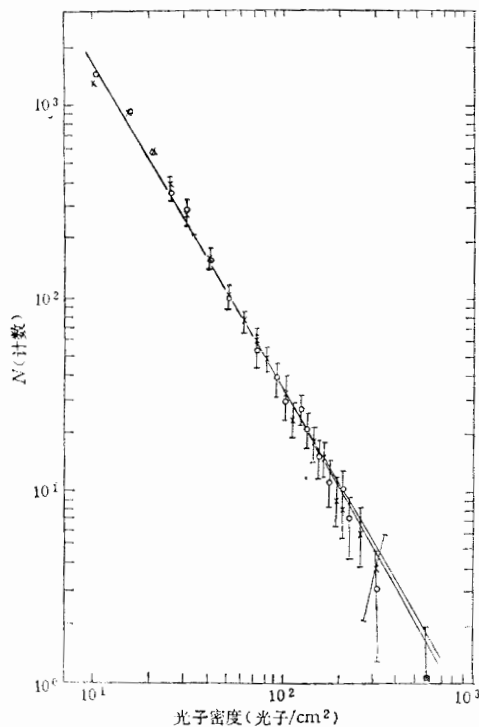


图 6 海平面 EAS Č 光密度谱
○ GDB100, $r_\phi = 1.64 \pm 0.07$
× XP2041, $r_\phi = 1.62 \pm 0.07$

果)和 1.64 ± 0.07 (幅度测量结果), 两种方法所得结果一致。该结果与 Protheroe 和 Patterson^[13] 最新的模拟结果 (r_ϕ 约为 1.63) 相符。考虑到如果不知道初级宇宙线质量成分^[13], 单个探测器 (或几个探测器放在一起) 是不能测定宇宙线能谱的, 我们准备用小型光阵列, 测量 EAS Č 光光强的横向分布函数和脉冲时间结构, 来确定 $10^{14} - 10^{16} \text{eV}$ 能区的能谱形状。EAS Č 光探测器的能量定标有待于与怀柔 EAS 粒子阵联合观测和理论上的模拟计算。

4. 仅对 EAS Č 光光强的测量来说, 在 24% 的误差范围内 (内含脉冲面积测量误差 19%), 用国产 GDB100 慢光电倍增管测量脉冲幅度所得的结果, 并不比用 XP2041 快光电倍增管测量脉冲面积得到的结果差。由于大气层对 EAS Č 光光谱紫外段的吸收, 两种光电倍增管的光谱响应差别不大 (图 7)。此外, 大气透明度的变化, 探测器离轴心

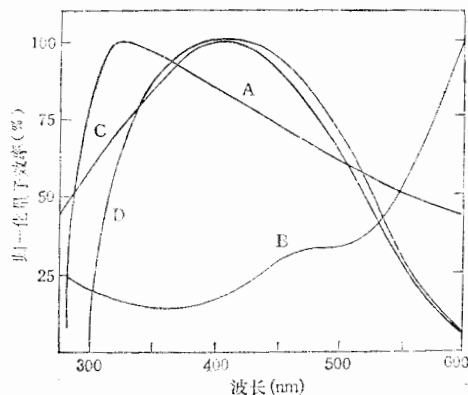


图 7 光谱响应曲线
A 海平面归一化 EAS Č 光光谱
B 海平面归一化夜空背景光谱
C XP2041 光谱响应曲线
D GDB100 光谱响应曲线

距离的不同,对紫外段都有影响^[14],因而 GDB100 的输出较为稳定一些. 根据文献报道^[10,15,16],在 10^{15} — 10^{16} eV 能区,当 $R < 200\text{m}$ 时, EAS \checkmark 光脉冲的 FWHM $< 20\text{ns}$,它对于 GDB100 的脉冲幅度影响小于 8%,在知道轴心距离的情况下,可对其作修正. 由于脉冲幅度测量技术简单,造价便宜,在建立多参数观测的小型光阵列 ($R < 200\text{m}$) 中, GDB100 型慢光电倍增管更适合于光强横向分布函数的测量.

感谢霍安祥同志对本工作的关心和指导.

参 考 文 献

- [1] A. M. Hillas, *J. Phys. G: Nucl. Phys.*, **8**(1982), 1475.
- [2] M. P. Chantler et al., *J. Phys. G: Nucl. Phys.*, **9**(1983), L27.
- [3] De. Jager et al., "The Design And Evaluation of A 1TeV Gamma Ray Telescope" (1985).
- [4] R. W. Clay et al., *Aust. J. Phys.*, **36**(1983), 227.
- [5] N. Inoue et al., *J. Phys. G: Nucl. Phys.*, **11**(1985), 657.
- [6] J. R. Patterson and A. M. Hillas., *J. Phys. G: Nucl. Phys.*, **9**(1983), 1433.
- [7] D. F. Liebing et al., *J. Phys. G: Nucl. Phys.*, **10**(1984), 1283.
- [8] 李延国等: 核电子学与探测技术, **7**(1987), 342.
- [9] T. Hara et al., 15th ICRC, **8**(1977), 308.
- [10] G. J. Thornton and R. W. Clay., *J. Phys. G: Nucl. Phys.*, **4**(1978), L193.
- [11] T. J. L. McComb, and K. E. Turver, *Nuov Cim.*, **5C**(1982), 131.
- [12] J. V. Jelley., "Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics", Vol. IX (1967), p. 83—85.
- [13] R. J. Protheroe and J. R. Patterson, *J. Phys. G: Nucl. Phys.*, **10**(1984), 841.
- [14] R. J. Protheroe and K. E. Turver., *Nuov Cim.*, **51A**(1979), 277.
- [15] A. A. Andam et al., 17th ICRC (Paris), **6**(1981), 125.
- [16] T. A. Alimov et al., 18th ICRC (Bangalore), **11**(1983), 387.
- [17] N. N. Kalmykov et al., 18th ICRC (Bangalore), **11**(1983), 383.

OBSERVATION OF CERENKOV LIGHT FROM EXTENSIVE AIR SHOWER

LI YANGUO HE CHANGXIAO YUAN YUKUI JIANG YINLIN XU CHUNXIAN DAI YIFANG

CHEN DUANBAO HE HUILIN WANG JIANWEI

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing)

ABSTRACT

The pulse shape and the intensity of Cerenkov light from extensive air shower have been recorded by using two different types of photomultipliers (fast and slow). The distribution of the FWHM of Cerenkov light pulse and the spectrum of Cerenkov photo density have been measured for $E > 5 \times 10^{14}$ eV, at sea level. Comparing the two intensity results from two types of tubes indicate that the system which consists of the slow tubes and the peak ADC is not only simple but also cheap for the Cerenkov light intensity measurement.