

空气簇射切伦科夫光强横向分布测量

李廷国 袁余奎 何长孝 谭有恒 董玉瑀 袁 澎 张慧敏

(中国科学院高能物理研究所,北京 100039)

摘 要

在北京怀柔建立了一个旨在研究广延空气簇射(EAS)切伦科夫光强横向分布及其脉冲时间结构的光学阵列,与怀柔粒子阵联合观测,测量了簇射大小在 $2 \times 10^5 - 10^7$ 粒子范围的切伦科夫光强横向分布,该分布在离轴心 20—150m 范围可表为指数函数形式 $\Phi(R) \sim \exp(-bR/10^4)$. 初步结果与最近的一些实验和理论大致相符.

一、引 言

EAS 切伦科夫光作为研究 EAS 的一种工具,近几年已有些发展,许多实验观测和理论计算表明 EAS 切伦科夫光强横向分布形状与簇射纵向发展有关^[1]. 虽然至今还没找到一个理想的表达式来描述该分布,但在离簇射轴心 R 小于 125m 左右的 EAS 切伦科夫光强横向分布可拟合成指数形式 $\Phi(R) \sim \exp(-bR/10^4)$ ^[2,3],并可用形状参数 b 来推断簇射发展极大深度(X_m),从而有助于回答宇宙线物理的一个问题——高能宇宙线初级核质量成分和相互作用特征.

在对超高能 γ 点源的观测中,EAS 切伦科夫光强横向分布函数的测量也将有助于对 γ 或质子始发簇射的辨认^[4]. 鉴于怀柔 EAS 粒子阵已投入正常运行,增建一个切伦科夫光光学阵列,配合粒子阵研究 $10^{15} - 10^{17}$ eV 能区的超高能现象,特别是研究该能区有争议的能谱拐点和初级质量成分等问题是有意义的.

二、切伦科夫光光学阵列

对所用的各种类型光电倍增管的性能作了充分研究之后^[5],于 1988 年在北京怀柔 EAS 粒子阵所在地,建立了一个旨在研究 EAS 切伦科夫光强横向分布及其脉冲时间结构的光学阵列(图 1). 由于受实验场地地形地物限制,14 个 GDB-100($\phi 100$)、GDB-200($\phi 200$)等类型光电倍增管构成的裸管探头,以 EAS 粒子阵为中心,分布成扇形,用于探测离轴心约 200m 范围内的光强横向分布. 另外,离粒子阵中心 220m 处,有较好快时间响应和光子收集面积的两个 XP2041Q($\phi 100$)光电倍增管放置在一起和 1727A 高速存储示波器(275MHz)构成的切伦科夫光脉冲自动照相单元,记录远离 EAS 轴心的切伦科夫光脉

冲波形,用于脉冲时间结构研究^[6].考虑到 EAS 切伦科夫光角分布^[7]和系统需具有足够高的信噪比,用半张角为 45° 的塑料准直筒限制探测器的视场角,以减少夜空背景光强 Φ_B 产生的噪声.(测得当地 $\Phi_B \sim 6 \times 10^7$ 光子 $\cdot \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1}$).

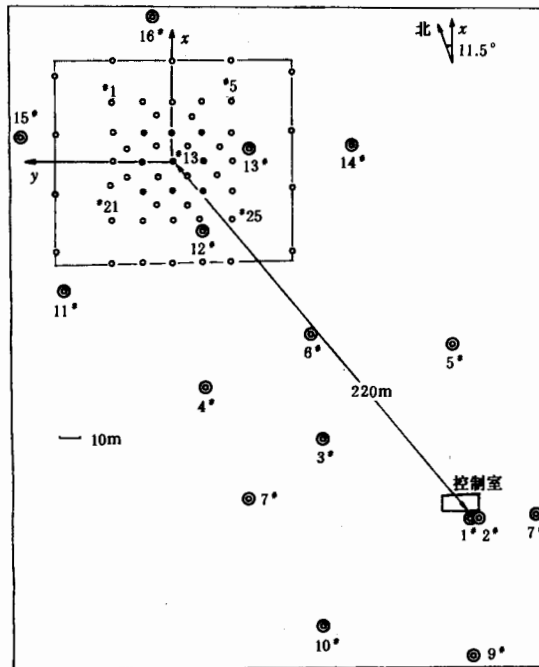


图 1 EAS 切伦科夫光阵列示意图

• 塑料闪烁体计数器; • EAS 粒子阵快时间计数器;

◎ 切伦科夫光计数器;

1[#]、2[#]:XP2041Q 7[#]—10[#]:GDB-200 其余:GDB-100

本实验所用的电子学记录系统(图 2)是在工作[8]的基础上作了扩大和改进. 3[#]—16[#] 探头探测到的切伦科夫光脉冲幅度信号,先由前置放大器(50MHz)放大五倍,再由(100—300)m 长的 SBYV-75 宽频带电缆传输到控制室(每百米衰减 16.3%). 脉冲峰值经过预展宽($0.5\mu\text{s}$)-符合选通展宽($2\mu\text{s}$)-采样保持($64\mu\text{s}$),与两路阳极电流监测信号一起通过 16 路模拟量开关,由高速 A/D 转换器顺次将其转换成 8bit 数字代码并存入缓冲器,供事后读出处理.

三、联合观测

为减少 EAS 粒子阵与切伦科夫光阵联合观测的相互依赖性,采用两阵相对独立观测,事后再根据事例的绝对到达时间挑选两阵相关联的 EAS 事例的联合观测方式. 两阵相关时间分辨 0.5s , 误选率 $< 2\%$, 于 1988 年 5—6 月在晴朗无月夜晚进行了观测. 对观测期间粒子阵列的数据分析得到粒子阵列的性能如下: EAS 心位测定误差分别为 $\leq \pm 2\text{m}$, ($R \leq 20\text{m}$), $\leq \pm 5\text{m}$, ($R < 50\text{m}$); EAS 到达方向测定误差 $\sigma_\theta \leq \pm 2^\circ$, $\sigma_\phi \leq \pm 5^\circ$; EAS 大

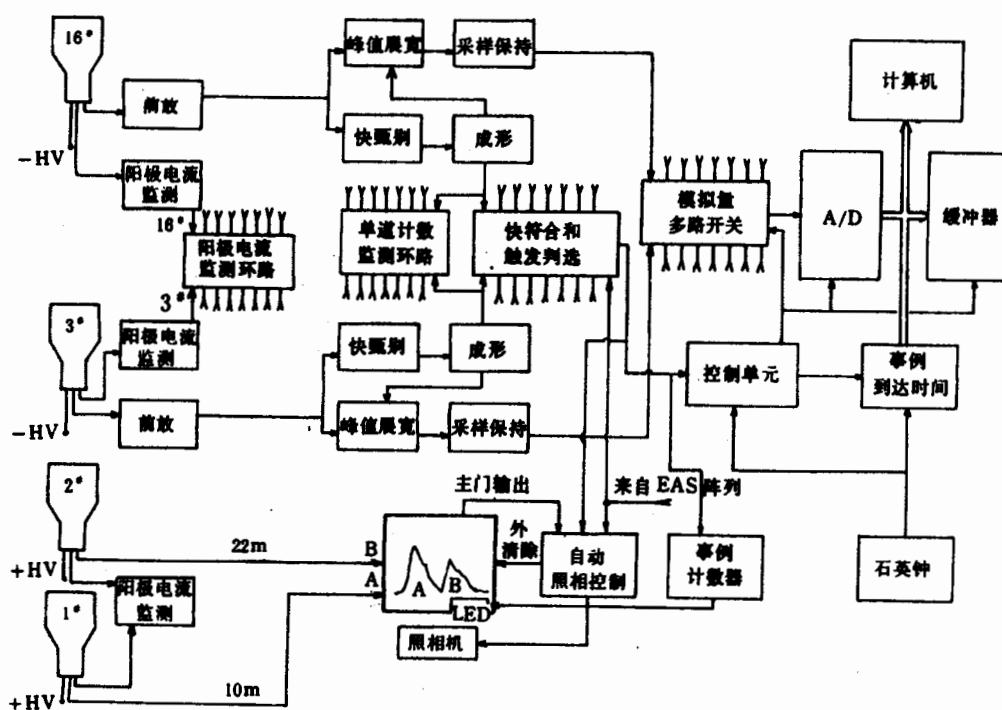


图2 EAS切伦科夫光观测电子学框图

小测定相对误差 $\leq 20\%$. 粒子阵触发条件为: 1° 、 5° 、 21° 和 25° 粒子密度 ≥ 4 个粒子/ m^2 , 13° 密度 ≥ 20 个粒子/ m^2 , 触发率 ~ 5 个/h, 相应的簇射大小 $\geq 2 \times 10^5$ 粒子^[9,10]. 切伦科夫光阵, 4° 、 7° 、 11° 、 12° 、 13° 、 14° 、 15° 和 16° 8重符合, 选择簇射轴心落入粒子阵的事例, 触发率 ~ 30 个/h, 相应的观测阈能 $\geq 10^{15}$ eV.

用平均触发计数率分别监测粒子阵和光阵每个无月夜晚的工作状况, 作为联合观测的候选条件, 再根据所监测的光电倍增管阳极电流, 选出两个阵列都处于良好工作状态的无月夜晚, 以保证事例之间观测条件基本一致. 经以上处理, 两阵联合观测有效时间 ~ 50 小时, 满足条件的关联事例为197个, 占粒子阵记录事例的75%, 选出183个两阵相关好事例作分析计算.

为保证光强测量的相对精确性, 每月观测前后都在相同条件下用工作[8]所介绍的定标装置, 以相对论性宇宙线 μ 介子($E > 0.4$ GeV)在有机玻璃中产生的切伦科夫光为标准光源, 测量各个光电倍增管的光子密度——脉冲幅度谱, 作为标定数据. 光电倍增管的每次重新安装或移动都保证在同一位置点上, 以减少地磁效应引起的增益变化.

四、结果和讨论

根据粒子阵提供的EAS粒子的到达方向(天顶角 θ 、方位角 φ)、轴心位置(x, y)和簇射大小 N . 分析计算光学阵列的数据, 发现单个EAS事例的切伦科夫光强横向分布形状与Patterson和Hillas^[3]模拟的横向分布形状基本相符(如图3), 并如Patterson和

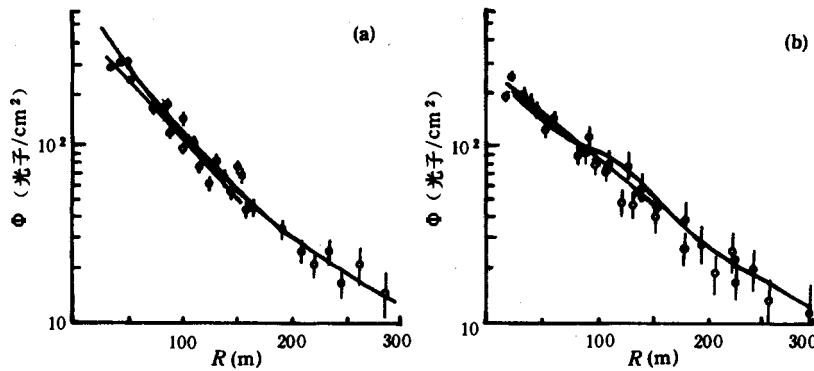


图 3 单个 EAS 切伦科夫光强横向分布(一拟合直线, $pH^{[3]}$ 曲线
纵坐标为任意单位)

(a) $pH: 10^{16} eV, 15^\circ, H_m = 3.1 km$	(b) $pH: 10^{16} eV, 15^\circ, H_m = 5.1 km$
本实验:	本实验:
N_e θ b	N_e θ b
• 2×10^6 13° 145 ± 11	• 1.8×10^6 9° 119 ± 12
• 2×10^6 16° 146 ± 13	• 2×10^6 12° 118 ± 13

Hillas^[2]1983 年所指出的可按轴心距离 $\sim 125m$ 内外,用两种函数形式来表示.本实验由于 $R > 150m$ 的光强采样点少,且测量统计误差大,不宜作定量分析.在离轴心(20—150) m 范围内,用加权最小二乘法分别将好事例的光强分布拟合成指数函数 $\Phi(R) = D \exp(-Rb/10^4)^{[1]}$ (其中 D 为轴心处的拟合光强, $R(m)$ 为离开轴心的距离, $b(m^{-1})$ 称为光强横向分布形状参数),则 94% 事例的相关系数 ≥ 0.9 ,得到如下结果:

1. 将 EAS 切伦科夫光强横向分布函数 $\Phi(R)$ 的形状参数 b ,按天顶角 θ 和簇射大小 N_e .分区处理,得到 b 的平均值在 $0^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ 范围与 Dawson^[3](探测器半张角 45°) 等人 1989 年报道的结果基本一致.

表 1 形状参数 $b(m^{-1})$ 与 Dawson 的结果比较

天顶角		$0^\circ < \theta \leq 15^\circ$		$15^\circ < \theta \leq 25^\circ$		$25^\circ < \theta \leq 35^\circ$		
		本工作	Dawson	本工作	Dawson	本工作	Dawson	
簇射大小 $\times 10^6$	$0.2 < N_e \leq 0.3$	n	5	153	3	97	3	26
	b	90 ± 10	91 ± 3	90 ± 18	82 ± 3	101 ± 24	60 ± 14	
$0.3 < N_e \leq 1.0$	n	22	139	24	175	18	102	
	b	113 ± 19	111 ± 2	109 ± 15	95 ± 1	105 ± 15	81 ± 2	
$1.0 < N_e \leq 3.0$	n	24	49	31	69	16	57	
	b	132 ± 12	120 ± 3	138 ± 18	97 ± 2	133 ± 14	94 ± 2	
$3.0 < N_e \leq 10$	n	7	8	8	10	10	20	
	b	146 ± 16	147 ± 2	141 ± 16	82 ± 2	139 ± 10	82 ± 2	

由于观测高度不同,不好与昆明梁王山(海拔 2720m,探测器半张角 30°)的结果^[11]作

定量比较,有意思的是我们观测到的 b 平均值与簇射天顶角 θ 无关这一迹象与梁王山的结果一致. 由表 1 可见,在天顶角 $15^\circ < \theta \leq 35^\circ$ 范围, Dawson 等人的 b 平均值也几乎为常数,且与簇射大小无关,这一现象有待进一步研究.

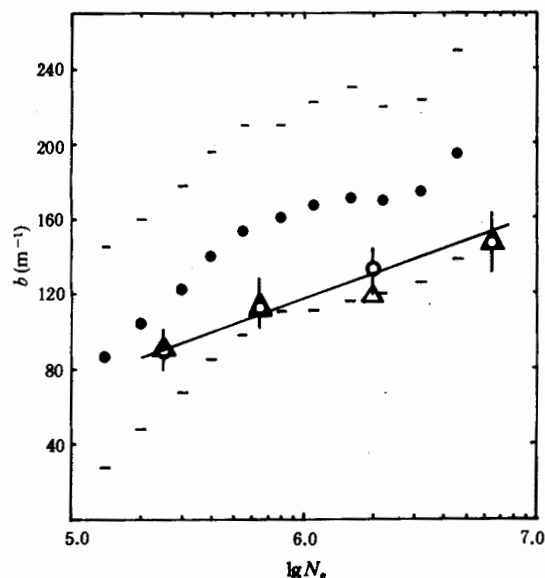


图 4 $0^\circ < \theta \leq 15^\circ$ 平均横向分布参数 b 与 N_0 的关系

○ 本工作; Δ Dawson^[3]; \square Gao Xiaoyu^[11].

2. 图 4 为 $0^\circ < \theta \leq 15^\circ$ 范围内平均横向分布参数 b 与 N_0 的关系, 由图可见, 随着 N_0 的增大横向分布变陡. 根据 Kuhmann 和 Clay^[12] 由实验所给出, 并与 Patterson 和 Hillas^[2] 模拟计算结果相符合的形状参数 b 和簇射极大高度 H 之间的关系式 $bH = 550$ (m^{-1}km), 并利用 Hillas^[13] 的高度 H 与大气深度 X 之间关系, 得到本工作的簇射极大深度 X_m (图 5). 它与 Alimov^[14] 等人的结果基本一致.

由于观测时间短, 缺乏足够的统计量, 这些结果只是初步的, 有待今后作更精确测量.

感谢霍安祥教授、丁林培教授对本工作的关心和指导, 朱清棋同志的热情帮助和有益讨论.

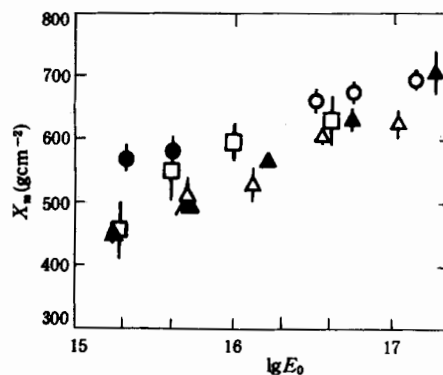


图 5 簇射极大与初能的关系

\square 本工作; \bullet Samarkand; \circ Yakutsk;
 \blacktriangle Adelaide; \triangle Akeno.

参 考 文 献

- [1] R. J. Protheroe "Workshop on High Energy Cosmic Ray Experiments", Salt Lake City January (1983), 137.
- [2] J. R. Patterson and A. M. Hillas. , *J. Phys. G: Nucl. Phys.* , **9**(1983), 1433.
- [3] B. R. Dawson et al. , *J. Phys. G: Nucl. Phys.* , **15**(1989), 893.
- [4] S. D. Biller and G. B. Yodh, 22nd ICRC 3(1991), 520.
- [5] 李延国, 何长孝, 袁余奎, 高能物理与核物理, **13**(1989), 5.
- [6] 李延国等, 全国第六届宇宙线会议(南宁)1992, 10.
- [7] R. J. Protheroe and K. E. Turver. , *Nuov Cim.* , **51A**(1979), 277.
- [8] 李延国等, 核电子学与探测技术, **6**(1987), 342.
- [9] Y. H. Tan et al. , 21st ICRC7(1991), 3-7; 6(1991), 2-16.

- [10] 谭有恒等, 怀柔 EAS 阵列建造综合报告(1990)(内部资料).
[11] Gao Xiaoyu et al. , 22nd ICRC 3(1991), 355.
[12] J. D. Kuhmann and R. W. Clay, *J. Phys. G: Nucl. Phys.* , 7(1981), L183.
[13] A. M. Hillas, *J. Phys. G: Nucl. Phys.* , 8(1982), 1475.
[14] T. Alimov et al. , 18Th ICRC (Bangalore), 11(1983), 387.

Measurement of the Lateral Distribution of Cerenkov Light from Air Shower

LI YANGUO YUAN YUKUI HE CHANGXIAO TAN YOUHENG

DONG YUJU YUAN PENG ZHANG HUIMIN

(*Institute of High Energy Physics Academia Sinica, Beijing 100039*)

ABSTRACT

In order to investigate both the lateral distribution of Cerenkov light and the pulse time structure depending on the longitudinal development of the shower, a small Cerenkov light array has been built in Huairo. Lateral distributions of Cerenkov light intensity from EAS have been measured using the combined Cerenkov-particle array, for showers in the size range 2×10^5 to 10^7 particles. The preliminary results are in agreement with the results of some recent experimental measurements and theoretical simulations.