

初能大于 10^{14} eV 的空气簇射的时间相关性

陈映宣 何长孝 肖谦益 王立祥

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

用空气簇射小阵在北京观测了能量大于 10^{14} eV 的宇宙线粒子产生的空气簇射的时间相关性。得到初能 $E > 2.6 \times 10^{14}$ eV 的空气簇射到达时间间隔的分布,在 $t < 21$ 秒以内系统地高于指数分布,显示可能在观测到的簇射中存在时间相关的成份。

一、前 言

研究高能宇宙线粒子的时间分布,寻找可能存在的宇宙线粒子的时间相关现象,是宇宙线和高能天体物理研究中重要而有兴趣的问题。某些天体发射的超高能粒子可能在宇宙线粒子时间分布上导致相关或周期性。此外,星际或行星际物质或磁场的变化过程等也可能引起初级宇宙线粒子到达时间的相关现象。有的理论^[1]预言:某些天体可能发射甚高能(10^{12} eV 以上)射线(主要是 γ)并且有的具有周期性的时间结构。实验上也进行了一些观测。^[2-3]近几年来,几个实验组^[4-7]都报导用空气簇射契伦科夫技术观测到了X射线源 Cyg X-3 发射的甚高能 γ 射线 ($> 10^{12}$ eV) 有瞬发性的(Sporadic)和周期性的(periodical)两种成份。Kiel 组^[8]通过所观测到的广延空气簇射(初能在 10^{15} — 10^{17} eV 能区)时间分布的周期性结构分析认为找到了几个超高能 γ 源。Bhat et al.^[9] 1979、1980 年报导他们用大气契伦科夫装置观测了 $E > 6 \times 10^{14}$ eV 的广延空气簇射到达时间 t 的分布,发现在 $t \leq 40$ 秒内存在显著高于指数分布的非随机成份,在 $t = 4, 8, 12$ 秒处出现高峰。通过分析认为 $t = 4$ 秒的过量簇射成份可能是周期为 3.7 秒的脉冲星 0525 + 21 (位于蟹状星云脉冲星附近)所发射的超高能 γ 所产生的。Fegan et al.^[10] 1981 年报导,在他们的实验中,在 $E \geq 10^{14}$ eV 的空气簇射中没有观测到非随机成份。由于大量时间无关的随机簇射构成了很少量时间相关簇射的本底,所要研究的现象往往被淹没在本底之中。在实验方面需要提高灵敏度,同时也需要通过进一步观测来大量积累数据,证认以前的结果并发现新的现象。本文介绍我们用空气簇射小阵在北京观测原初能量大于 10^{14} eV 的空气簇射的时间相关性。

二、实验装置

空气簇射阵列由十个塑料闪烁计数器组成。每个计数器的灵敏面积为 0.28m^2 ，厚 2.5cm 。其结构、性能和定标方法在 [11] 中已有详细描述。计数器的布局如图 1 所示，九个计数器布置成矩形，面积 $\sim 260\text{m}^2$ ，第十个计数器安放在 42m 远处，用以观测大簇射。

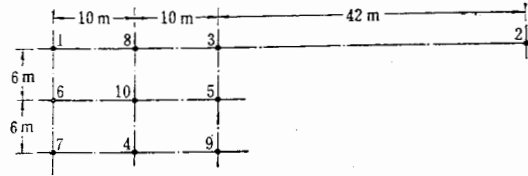


图 1 计数器阵的布置

符合触发方式分为两种^[12]：

I. 四边形上的 8 个计数器分成四组，每组三个计数器进行符合：

$$6 \times 8 \times 1, 6 \times 7 \times 4, 8 \times 3 \times 5, 5 \times 9 \times 4,$$

阈能 $\sim 1.7 \times 10^4 \text{eV}$ ，偶然符合率 $< 10^{-4}$ /小时，当计数器被一个以上粒子击中并满足上述

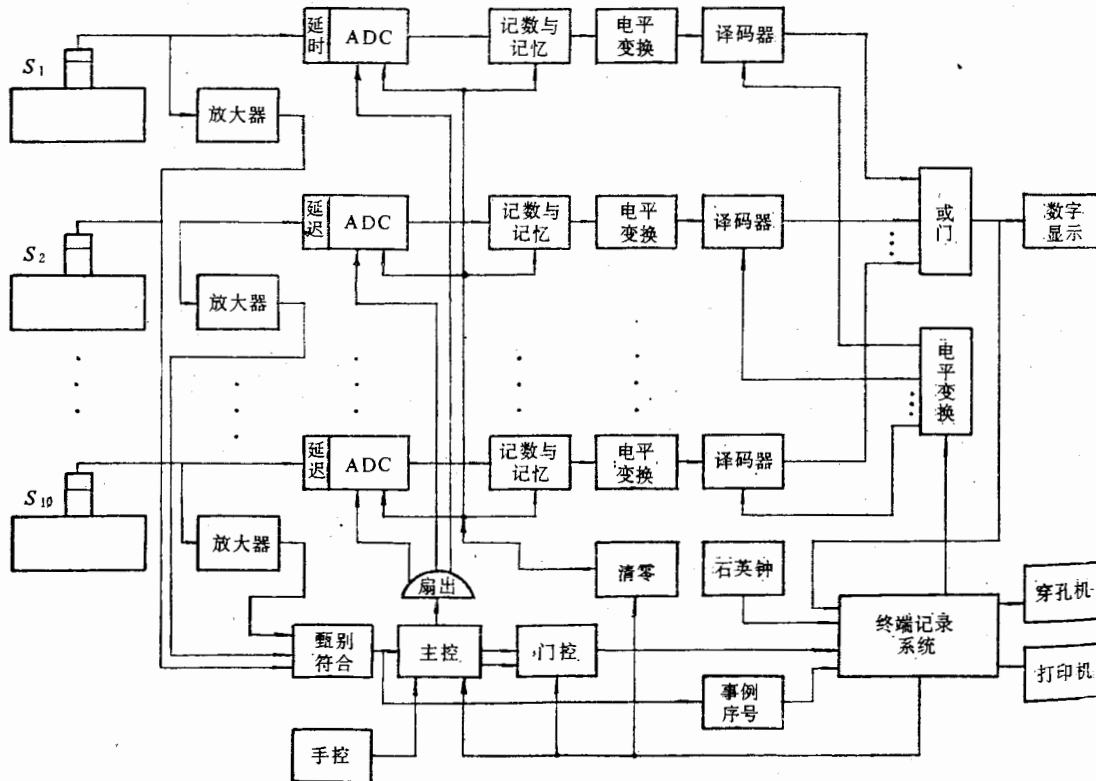


图 2 记录系统框图

符合方式之一时,记录系统被触发;

II. 四边形角上四个计数器组成三重符合:

$$1 \times 7 \times 9, 1 \times 3 \times 9, 7 \times 1 \times 3, 3 \times 7 \times 9,$$

阈能 $\sim 2.6 \times 10^{14}$ eV, 偶然符合率 $< 10^{-4}$ /小时, 当每个计数器被一个以上粒子击中并满足上述符合方式之一时,记录系统被触发.

各个计数器都记录簇射粒子的密度. 从计数器出来的簇射粒子密度信号分成两路(图2). 第一路经放大后送至带甄别阈的符合电路参加符合. 符合选通后, 符合电路输出一个方波去触发主控电路动作, 给出控制信号通过扇出去触发各路模数转换器工作. 此时记录系统自动封门, 在整个系统进行分析、记录期间, 拒绝接受新的事例. 簇射信号的第二路信号, 延迟 $1.2 \mu\text{s}$ 后经过线性门送到模数转换电路转换成数字信息, 由计数器系统贮存, 再经译码器译码后送到终端记录系统, 同时记录在打印机纸带和穿孔机纸带上, 二者可以互相检验.

簇射事例到达的序号和时间也同时被记录下来. 系统中采用了具有恒温控制的石英钟作时间基准, 走时精度 7.7×10^{-7} , 石英钟用协调世界时 UTC 标准信号定时校准. 记录事例到达时间的显示精度 0.1 秒, 全系统记录时间 1.2 秒. 有关记录系统细节, 在文章[13]中有详细描述.

三、实验数据分析

时间无关的空气簇射到达时间间隔的分布遵从指数规律, 因而随机到达计数器阵的相继两次空气簇射相隔时间 t 的分布应为 $n = N_0 e^{-mt}$. 其中 m 为单位时间间隔内的平均簇射数, n 为时间间隔 t 内的簇射数. 倘若有时间关联的簇射叠加在随机簇射本底上, 则必然会出现偏离指数分布的现象.

实验从 1982 年 12 月到 1983 年 5 月进行, 共收集了 75460 个空气簇射事例, 其中触发方式 I 的事例 62828 个, 触发方式 II 的事例 12632 个. 在数据分析中, 采用最小二乘法和最大似然法进行拟合^[14], 二者在误差范围内符合得很好. 下面给出用最大似然法拟合的结果^[15].

(一) 触发方式 I 的簇射到达时间间隔的分布

实验点的分布和拟合指数分布曲线表示在图 3. 图中横轴 t 为相继两次簇射的相隔时间, 纵轴 n 为时间间隔 t 内的簇射数. 由图可见, 实验点的分布与指数分布

$$n = (923.8 \pm 4.4) \exp[-(1.998 \pm 0.009) \times 10^{-2} t (\text{秒})]$$

相一致.

(二) 触发方式 II 的簇射到达时间间隔的分布

实验点的分布和拟合的指数分布曲线见图 4. 图中各符号的意义与图 3 相同. 拟合得到的指数分布为

$$n = (116.5 \pm 1.1) \exp[-(1.039 \pm 0.010) \times 10^{-2} t (\text{秒})].$$

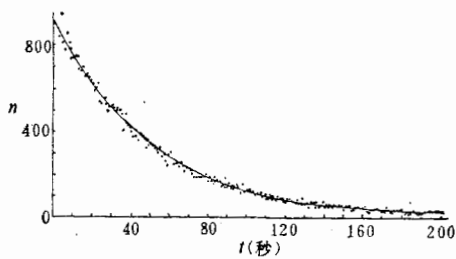


图3 触发方式 I 所记录的簇射到达时间间隔的分布

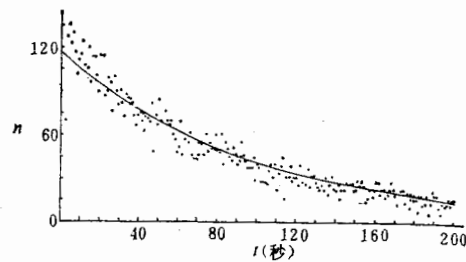


图4 触发方式 II 所记录的簇射到达时间间隔的分布

由图可见, $t < 21$ 秒的实验点明显地系统偏离指数分布。在拟合中对 t 用几种时间尺度把数据分组进行了拟合。无论用哪种方法都出现系统地高于指数分布的情况。在 $t = 4, 6, 11, 14, 20, 21$ 秒处的偏离都在 2 倍标准偏差以上。

造成这种偏离的原因可能有:

1. 统计涨落。由于实验样本统计量不很大, 统计涨落使实验点在理论指数曲线上出现较大摆动。但是, 我们在计算机上进行了上百次的模拟计算, 每次所取的随机数样本容量与实验样本容量相近 ($> 10^4$), 拟合结果都没有发现如此宽范围的系统性偏离^[5], 所以至少可以说, 统计涨落造成这样明显的系统偏离的几率极小。

2. 实验仪器的系统偏离。从实验时间安排上可以排除实验仪器系统工作不正常造成偏离的可能。选择触发方式 I 的实验曾分成两个阶段, 分别安排在选择触发方式 II 实验的前后, 在整个实验过程中设备状态良好。改变选择条件也仅仅是改变一下符合电路输入接线的排列, 不会改变整个实验仪器系统的工作状态。而且对于触发方式 I 两个阶段所得实验数据分别进行指数拟合的结果, 在 $t < 21$ 秒的区域并未发现异常。

3. 其他原因能否造成这种偏离呢? 我们用蒙特卡罗方法对周期信号进行了模拟。方法是在具有指数分布的时间间隔本底上叠加上具有一定时间周期的信号。这里给出叠加上一个周期的结果。

(1) 参数选择

随机的本底分布为 $n = N_0 e^{-mt}$, 取随机数总个数 $N (= \sum n_i) > 10^4$, $m = 0.009$ (主要取决于阈能), 它们都接近实验值。周期信号有两个指标, 即周期 T 和被探测到的效率 η 。我们选 $T = 20$ 秒, η 做为可变参量进行多次模拟。

(2) 模拟结果

当 $\eta \leq 0.016$ 时, 看不出有偏离统计涨落的现象;

当 $0.016 < \eta < 0.024$ 时, 能看到在 $t = 20$ 秒处有明显偏离, 但偏离值不超过三倍标准偏差;

当 $\eta > 0.024$ 时, 在 $t = 20$ 秒处有明显的大于三倍标准偏差的锐峰, 而且效率越高越明显。

模拟结果表明, 具有单一时间周期的信号有可能在随机本底的指数分布的局部时间间隔区域产生不超过三倍标准偏差的偏离, 但很难在稍大一点的范围内发挥作用。

由以上分析得出, 我们不能排除在所观测到的簇射中包含了时间相关的成份。

四、讨 论

1. 由上节模拟计算知道, 叠加在随机本底的指数分布上的周期信号是否能显示出偏离, 取决于周期信号数目与本底数目之比即信噪比: $\eta\tau/(T - \eta\tau)$. 这里 $\tau = 1/m$, 是簇射之间的平均时间间隔, 它主要取决于触发阈能. 信噪比主要由因子 $\eta\tau$ 决定, 只有当 $\eta\tau$ 大于一定值之后, 周期信号才能从指数分布的涨落中显示出来. 对于一定的触发方式, τ 有确定的值, 信噪比随着 η 的提高而增大. 在我们的实验中, 对于两种触发方式 η 相同, 虽然两种触发方式的阈能相近, 但触发方式 I 的 τ 值约为触发方式 II 的一半, 这使得触发方式 I 的信噪比比触发方式 II 下降了一倍多. 因此, 触发方式 I 所记录的簇射到达时间的分布未显示出偏离统计涨落的情况, 可能是由于较低能量的随机簇射贡献增大而淹没了时间相关成份的缘故.

2. 由于我们的计数器阵没有快时间探测器来确定簇射到达方向, 不能对发射高能粒子的天体作定向观测, 所观测到的系统偏离现象可能是多种时间相关成份的总效应. 同时由于时间相关成份很微弱, 全向探测器的信噪比不高, 较难得到超出三倍标准偏差的“偏离”和“锐峰”. 尽管如此, 我们的结果和 Bhat et al.^[9] 的结果仍然是很相似的. 如果在我们的阵列中配上方向探测器和 μ 子探测器, 则可以定向观测某些天体发射的高能 γ 射线及其时间分布, 可以压低本底, 提高信噪比, 并能区别带电粒子和 γ 产生的簇射.

致谢 我们的大量数据计算工作是在我室的 DJS-130 机和 FUJITSO MICR07 微型机上进行的, 作者感谢戴义方、杨长友、王晓明、丁林培同志的大力支持. 此外还和李惕碚、朱清棋、吴枚、徐春娴等同志进行过多次有益的讨论, 作者在此一并致谢.

参 考 文 献

- [1] M. Grewing, et al., *Astrophys. Lett.*, 8(1971), 167.
- [2] J. A. Murphy et al., 16th ICRC, 1(1979), 248.
P. N. Bhat et al., 16th ICRC, 1(1979), 216.
李惕碚, 自然, 1No. 8(1978), 469.
- [3] B. Mcbreen et al., 17th ICRC, 6(1981), 301.
- [4] V. P. Fomin et al., 17th ICRC, 1(1981), 28.
- [5] J. B. Mukanov et al., *Astrof. Abs.*, 62(1980), 98.
- [6] S. Danaher et al., *Nature* 28 (1981), 568.
- [7] C. Morello et al., 18th ICRC, 1(1983), 127.
- [8] W. Stamm et al., 18th ICRC, 1(1983), 131.
- [9] C. L. Bhat et al., 16th ICRC, 8(1979), 57.
- [10] D. J. Fegan et al., 17th ICRC, 6(1981), 296.
- [11] 陈映宣等, 高能物理与核物理, 4(1980), 683.
- [12] 王立祥, 高能物理研究所宇宙线研究室年报, 1981—1982, p. 50.
- [13] 何长孝等, 郑州大学学报(自然科学版), 1983年增刊, p. 203.
- [14] 李惕碚, 实验的数学处理, 科学出版社, 1980年2月第一版.
- [15] 何长孝等, 高能宇宙线粒子时间分布实验数据的进一步分析和模拟, 高能物理研究所宇宙线研究室年报, 1983 p.79.

THE TIME DISTRIBUTION OF EAS WITH $E > 10^{14}$ eV

CHEN YING-XUAN HE CHANG-XIAO

XIAO QIAN-YI WANG LI-XIANG

(Institute Of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

We have observed the arrival times of EAS initiated by cosmic rays of $E > 10^{14}$ eV using the EAS array in Beijing. The distribution of arrival time intervals of EAS With $E > 2.6 \times 10^{14}$ eV is considerably higher than the exponential distribution in the region of time interval $t < 21$ second. It is suggested that a time correlation component is probably present in the EAS events.