

闪烁计数器在宇宙线探测中的应用

李彬¹, 王锋², 余仲秋¹, 张波涛¹, 冯向华¹

(1 解放军信息工程大学 理学院, 郑州 450002)

(2 河南工业大学 信息科学与工程学院, 郑州 450001)

摘 要:用闪烁计数器完成对宇宙线信号的采集和转换工作,其输出信号作为原始数据被记录. 提出利用动态分析仪进行记录的新方法,应用该方法能够观测到宇宙线与探测器作用的详细情况,并得出一些新的结果. 本文介绍这种方法的应用情况,并对观测结果进行分析.

关键词:宇宙线; 闪烁计数器; 动态分析仪; 数据采集

中图分类号: TL822

文献标识码: A

0 引言

宇宙线是来自宇宙空间的高能粒子流,对于超高能宇宙线($\geq 10^{15}$ eV),主要借助于它产生的广延大气簇射现象(EAS)进行研究. 观测 EAS 现象常用的方法,是在地面上分散布置多个粒子探测器组成 EAS 观测阵列,通过有效探测 EAS 次级粒子,获取 EAS 的有关参量,对超高能相互作用的性质以及有关的天体物理现象进行研究.

EAS 阵列中,常使用塑料闪烁计数器作为探测器,由于其造价低廉,易于长时间野外观测,而且工作稳定,便于维护. 所以闪烁计数器被广泛应用于世界各地的宇宙线观测站^[1]. EAS 阵列中,闪烁计数器可以用作电子密度探测器,用于测量超高能宇宙线产生的广延大气簇射的次级粒子密度. 还可以用作快速时间探测器,进行快速时间测量. 几十年来,人们利用闪烁计数器作了大量的研究工作,获得了许多有意义的结果.

对闪烁计数器输出信号的记录,大都采用模拟—数字转换器 ADC 完成电信号到数字量的转换,但是 ADC 的转换结果不涉及输出波形的具体形状和变化细节,如脉冲的上升时间、幅度、宽度、波形的中间变化细节等. 而这些波形的参量不但与粒子的数目有关,而且还能够给出许多关于簇射性质的重要信息. 为了弥补 ADC 记录方法的不足,本文引入一种新的记录方法,利用实时动态分析仪来记录探测器输出的完整波形,从而为宇宙线的研究提供更充分的数据资源^[2].

1 用于 EAS 探测的闪烁计数器

宇宙线探测阵列中,一般要使用多个塑料闪烁

计数器,闪烁计数器主要由闪烁体、光导箱、光电倍增管及高压分压器等几部分组成. 以原郑州 EAS 阵列为例,其所采用的闪烁计数器的结构如图 1^[3].

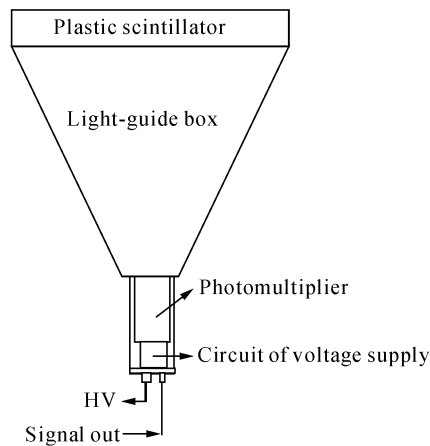


图 1 塑料闪烁计数器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of scintillation counter

阵列采用塑料闪烁体,其面积为 $50\text{cm} \times 50\text{cm}$,厚度 5 cm. 闪烁体的五个表面被涂上漫反射涂料,未涂的一面是一个最大面积的抛光面,它在安装时水平向下. 闪烁体下方 50 cm 处是光电倍增管. 光导箱采用 2 mm 厚的铁皮制成,形状为倒金字塔形,采用空气光导,箱内壁涂有漫反射涂层. 借助于漫反射涂层的反射,闪烁体发出的光子被尽可能多地收集到光电倍增管的光阴极,获得较大的脉冲输出.

闪烁计数器工作过程如下:当宇宙线次级粒子穿过闪烁体时,闪烁体分子被电离激发,分子在退激过程中,闪烁体发光. 光子经过闪烁体、空气光导及光导箱内壁所涂漫反射物质的反射,一部分到达光电倍增管的光阴极,打出光电子,光电子经过倍增放大,最后在阳极输出一个电脉冲. 这样,光信号就被转换成了电信号. 电信号被送入记录系统被记录,记录后的数据作为原始数据被保存下来,通过这些原始数据可以计算初级宇宙线的有关参量.

2 闪烁计数器输出信号的记录方法

2.1 利用 ADC 进行数据记录的方法

EAS 阵列中,通常采用 ADC 作为数据记录和转换的设备. 闪烁计数器的输出脉冲被直接送入 ADC, ADC 将脉冲幅度转换成数字量,称为 ADC 道数. 这些数据通过主控制系统内部的数据通道送往计算机. 这样,阵列采集到的原始数据就以数字的形式记录下来,计算机通过这些数据可以计算 EAS 的基本参量,例如次级粒子总数,初级宇宙线的能量,初级宇宙线的人射方向等.

在进行数据记录的同时,还有一个重要的工作,就是利用 ADC 对闪烁计数器进行定标.

在定标过程中,通过设置整个电子学记录系统的状态,控制记录的过程,每次只记录一个粒子的转换数值. 经过一定时间的记录之后,ADC 道数呈现一定宽度的分布,见图 2. 曲线低端的上升部分由光电倍增管的噪声和低能宇宙线次级粒子引起,曲线高端基本呈正态分布. 对应于最大脉冲处,有一峰值,称为宇宙线单粒子峰,这主要是由单个宇宙线次级粒子穿过闪烁体时的能量损失所引起的. 把这个分布的期待值,作为单个粒子入射时的 ADC 道数. 确定宇宙线单粒子峰的过程,称为“定标”.

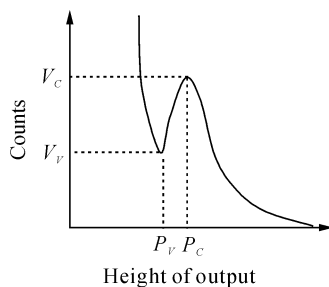


图 2 单个粒子的输出脉冲幅度分布
Fig. 2 Distribution of output pulse height produced by single particle

由于 ADC 的输入与输出间呈线性关系,因此,在实际采集过程中就以记录到的 ADC 道数与单粒子峰道数之比来估算次级粒子数.

单粒子峰的宽度由多方面因素决定^[4],诸如入射粒子方向的天顶角分布,粒子在闪烁体内能量损失的涨落,到达光电倍增管光阴极的光子数的涨落,多个宇宙线次级粒子同时到达闪烁计数器的事例以及 ADC 线性度的涨落等.

以分辨率 η 来量度单粒子峰宽度的分散性^[5],将其定义为

$$\eta = \frac{\text{FWHM}}{P_c} \times 100\%$$

FWHM 为峰的半峰宽度(曲线上最大值一半

的宽度), P_c 为 ADC 道数. η 越小,说明仪器测量的分辨率越高,准确度越高. 同时以峰谷比 V_c/V_v 及 P_c/P_v 的大小衡量信噪比.

可见,定标一方面可以用来检验探测器性能的好坏,另一方面又是计算簇射粒子数的前提. 对于同一个探测器,随着环境温度的变化及使用时间的加长,单粒子峰的位置会发生波动,所以必须定期对闪烁计数器进行定标.

2.2 利用实时动态分析仪记录闪烁计数器的输出波形

实时动态分析仪是一种集测量、分析、结果输出为一体的数据采集系统,可实时捕获和分析各种非周期信号,进行数据采集、波形显示、数据记录、数据处理、波形打印等工作,并且结构简单,使用方便,运行可靠.

动态分析仪记录过程中以真实信号启动采集,由于闪烁计数器输出信号比较小,不易触动态分析仪,所以在进入动态分析仪前要将其放大 10 倍. 动态分析仪的采集长度为 4K,即 40 960 ns,是 ADC 记录时间 200 ns 的 200 多倍,所以对信号的记录范围更大.

2.2.1 波形种类

本文利用动态分析仪共采集到了五种波形,其中大部分波形如图 3. 波形中有一大一小两个负脉冲,其间隔约 90 ns,脉冲总宽度约 180 ns. 由于这种波形出现的次数非常多,即认为是由单个宇宙线次级粒子产生,为“单粒子波形”. 另外还观测到一些较为少见的波形,如图 4.

图 4(a)中,有两个分开的脉冲波形,两脉冲形状均符合单粒子波形,本文认为这是动态分析仪记录到两个粒子的情况,将其称为“双粒子波形”. 这是由于动态分析仪对信号的记录范围更大,因此其采集到两个粒子的可能性比 ADC 大.

图 4(b)中,只有一个脉冲波形,但是脉宽很大,

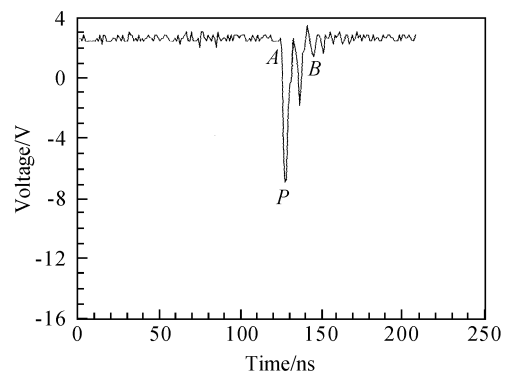


图 3 动态分析仪记录的探测器输出信号波形
Fig. 3 Output waveform recorded by dynamic waveform analyzer

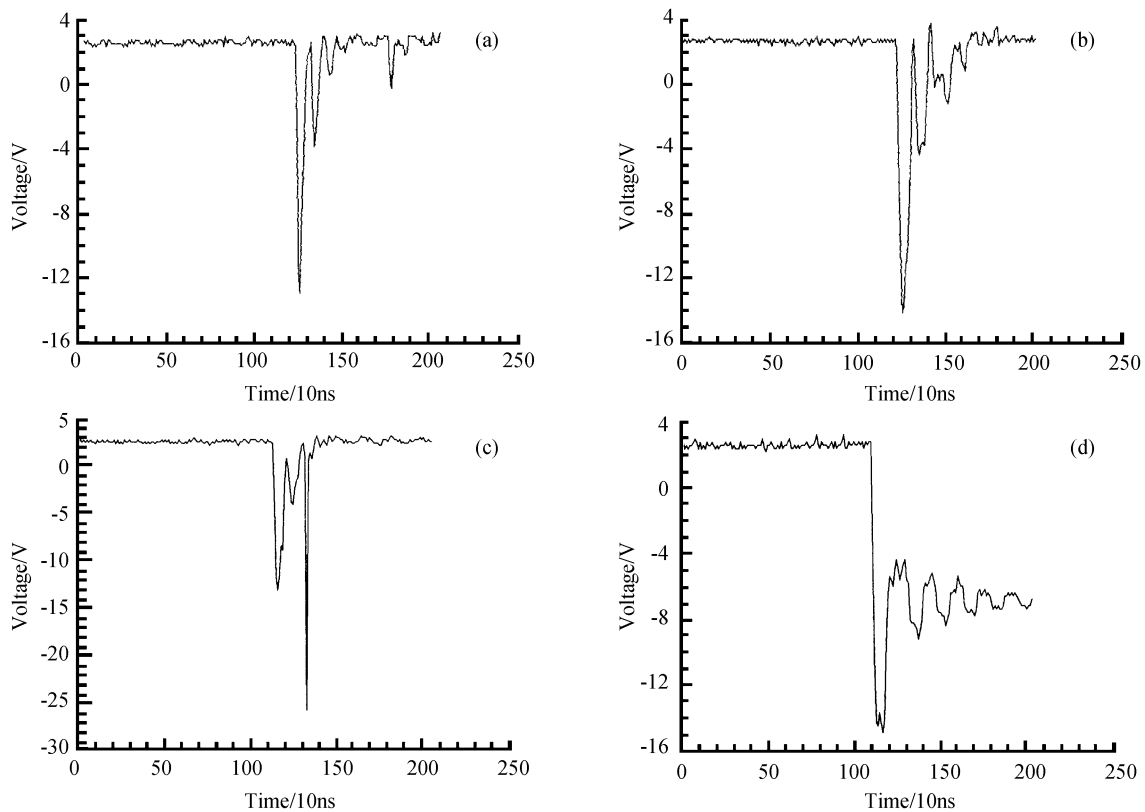


图4 动态分析仪记录的几种特殊波形

Fig. 4 Special waveforms recorded by dynamic waveform analyzer

约在 250 ns~400 ns 之间. 波形中有 3 个以上的小脉冲, 幅度也比单粒子波形中要大. 这种波形可能是能量非常大的次级粒子作用的结果, 也可能是图 4 (a) 中双粒子情况的一种, 即两个粒子紧挨在一起, 动态分析仪的分辨能力无法将其分辨开, 就出现重叠在一起的一个大的脉冲波形. 可以认为后一种可能性更大.

图 4(c) 中, 在波形的 1.34 μ s 处出现一个极大且迅速的下降. 为了确定这种情况是否是真实的闪烁计数器输出波形, 用动态分析仪记录方波发生器的输出波形, 发现有同样的突然下降点. 因此这种情况的出现与分析仪自身的结构有关.

图 4(d) 中, 波形呈振荡形状, 与前面几种波形完全不同. 不是闪烁计数器的有效输出信号, 可能是由外部干扰所产生.

2.2.2 波形分析

利用动态分析仪对阵列中某一个探测器观测一个月的时间, 获得上万个数据文件, 下面分别以脉冲幅度、脉冲下的积分面积和脉冲前沿为对象对波形做一分析.

1) 脉冲幅度的分布

ADC 对计数器输出波形进行转换时, 记录下的是波形的脉冲幅度. 首先以动态分析仪采集到的波形的脉冲幅度为变量, 做出相应的分布.

图 3 中波形, P 点为脉冲最低点, 波形本底的平均值约为 2.448V, 其对应的 ADC 转换值为 3 584, 所以脉冲幅度值 = 3 584 - $y(P)$, $y(P)$ 为动态分析仪所记录的数据文件中 P 点的数值. 在波形图中, 可以看到本底值的附近有一些干扰信号, 在处理数据的时候, 必须去除这些干扰, 采集有效的脉冲. 经过对波形及数据文件中相应数据的对比分析, 取 “3 584 - $y(P)$ = 1 700” 作为有效脉冲的下限, 若 “3 584 - $y(P)$ < 1 700”, 则认为输出脉冲幅度太小, 为干扰信号, 不予考虑. 对于图 4(a), 两个脉冲看作两个单粒子, 它们的幅度都要计算. 而(c)(d)图情况则被剔除, 不作有效脉冲考虑.

对记录的数据文件做相同的处理, 得到有效脉冲幅度值的集合. 随后, 对数值加以统计, 以脉冲幅度值为横坐标, 以每一个脉冲幅度值出现的次数为纵坐标, 做出脉冲幅度的微分能谱.

图 5 是对分布运用最小二乘法进行正态拟合后的结果^[6]. 第一个峰的位置在 2 724 处, 第二个峰的位置在 4 127 处.

左边第一个峰幅度非常大, 对应于观察到的大量同类型脉冲. 因此, 这个峰应该对应于 ADC 定标图中的单粒子峰, 而第二个峰应该是双粒子峰. 由于动态分析仪分辨率高, 双粒子峰比 ADC 定标图中的明显. 可得两个峰的分辨率及峰谷比:

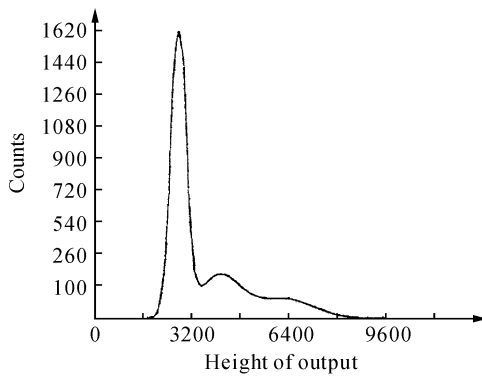


图5 脉冲幅度分布的拟合图

Fig. 5 Fitting curve for distribution of output pulse height

单粒子峰: $\eta_1 = 22.4\%$; 双粒子峰: $\eta_2 = 41.2\%$
 $V_c/V_v = 1.14$ $P_c/P_v = 1.21$.

同期利用ADC定标,结果如图6.图中单粒子

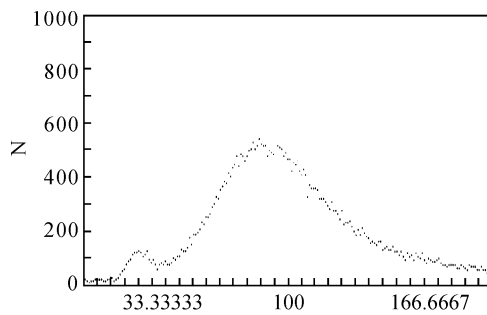


图6 ADC定标图

Fig. 6 Calibration curve by ADC

峰的分辨率和峰谷比为: $\eta = 64.7\%$, $V_c/V_v = 6.95$,
 $P_c/P_v = 2.32$

2) 积分面积的分布

图3中波形, A点为脉冲起始点, B点为脉冲结束点,那么 A、B间所有点数值之和即是脉冲的积分面积. 积分面积记录了信号从开始到结束的全部信息,反映了探测过程的全面情况. 对积分面积的分析也是检验闪烁计数器及动态分析仪性能的一种方法.

图4(a)中,两个脉冲看作两个单粒子,它们的积分面积分别计算. (c)(d)两图情况则剔除,不予考虑. 同样对记录到的数据文件作处理,得到积分面积值的集合,然后以积分面积值为横坐标,以每一个积

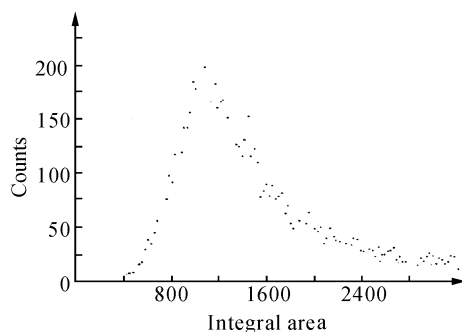


图7 积分面积分布图

Fig. 7 Distribution of integral area

分面积值出现的次数为纵坐标,做出积分面积的微分分布,如图7.图中分辨率 $\eta = 63.9\%$.

3) 脉冲前沿的分布

闪烁计数器输出波形的脉冲前沿取决于闪烁体的发光衰减时间 τ . 图3中 A点为脉冲起始点, B点为脉冲结束点, P点为脉冲最低点,所以 A、P之间即为脉冲下降的时间. 显而易见,脉冲前沿较陡,后沿变化比较缓慢. 对数据文件进行处理,做出有效脉冲前沿下降时间的分布,见表1. 从表中可以看到, t 集中在40 ns附近,在40 ns处达到极大值. 这也正证明了 t 取决于 τ 的结论. 因此在以后的分析中认为脉冲前沿为40 ns,但后沿差别较大,而且较宽,一般大于100 ns.

表1 脉冲前沿的时间分布表

时间(ns)	次数	时间(ns)	次数	时间(ns)	次数
20	101	200	4	510	5
30	1346	210	7	530	3
40	2891	220	3	550	1
50	1422	230	4	580	1
60	298	250	1	590	1
70	123	270	1	660	3
80	38	290	1	670	1
90	13	330	1	710	2
100	7	350	1	720	1
110	5	370	3	740	3
120	5	380	4	780	4
140	3	400	1	930	1
170	1	430	1	1080	1
190	1	440	1		

目前只是对动态分析仪进行了初步的应用,它的应用潜力还很大,今后还有很多的工作需要继续开展. 科技人员需要继续采集数据,得到更多的波形,以便作进一步更全面的分析.

3 结论

本文介绍了闪烁计数器在宇宙线探测中的应用,针对传统 ADC 记录方法的不足,引入了利用动态分析仪进行记录的新方法,观测到了闪烁计数器输出波形的详细情况,对波形的种类、脉冲幅度、脉冲下的积分面积和脉冲前沿进行了分析,并将分析结果与 ADC 获得的结果进行了比较,从而显示出该方法的优越性,这为宇宙线的研究又提供了一条新的途径.

参考文献

- [1] FENG Zhen-yong, HUANG Qing. The application of photoelectric signal analysis to the cosmic ray observation and investigation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1997, 24(3):49-52.
 冯振勇,黄庆. 光电信号分析在宇宙线观测研究中的应用[J].

- 光电工程,1997,**24**(3):49-52.
- [2] GUO Rui, LIU Xue-bin, WEN De-sheng, *et al.* A new UWB pulse design algorithm for inband interference suppression[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006,**35**(6): 953-956.
郭瑞,刘学斌,汶德胜,等.空间雷电探测实时采集定位系统[J].光子学报,2006,**35**(6):953-956.
- [3] ZHAO Shu-jun, SUN Luo-rui, GUO Zheng-yuan, *et al.* Design of scintillation counters used in an EAS array [J]. *Nuclear Techniques*, 1995,**18**(3):162-165.
赵书俊,孙洛瑞,郭正元,等.一种用于EAS阵列的大面积闪烁计数器的研制[J].核技术,1995,**18**(3):162-165.
- [4] SUN Luo-rui, GUO Zheng-yuan, ZHAO Shu-jun, *et al.* Design and initial performance of zhengzhou EAS array[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 1993,**17**(7):595-600.
孙洛瑞,郭正元,赵书俊,等.郑州EAS观测阵列的设计和初期运行[J].高能物理与核物理,1993,**17**(7):595-600.
- [5] MAO Rong-wei, CHEN Bu-wen, LI Chuan-bo, *et al.* The fabrication of low cost Si-based continuously tunable 1.55 μ m RCE photodetector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005,**34**(12): 1783-1787.
慕容伟,成步文,李传波,等.硅基1.55 μ m可调谐共振腔窄带光电探测器的研究[J].光子学报,2005,**34**(12):1783-1787.
- [6] GUO Feng, ZHANG Yi-qi. A new UWB pulse design algorithm for inband interference suppression[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006,**35**(9):1345-1348.
郭锋,庄奕琪,带内干扰抑制的超宽带脉冲设计[J].光子学报,2006,**35**(9):1345-1348.

Scintillation Counter's Application in Cosmic-ray Detection

LI Bin¹, WANG Feng², YU Zhong-qiu¹, ZHANG Bo-tao¹, FENG Xiang-hua¹

(1 *Information Engineering University of PLA, Zhengzhou, 450002, China*)

(2 *Henan University of Technology, Zhengzhou, 450001, China*)

Received date: 2007-04-26

Abstract: The application of scintillation counter in detecting and researching high-energy cosmic ray is studied. Scintillation counter is an important part for collecting and transferring cosmic ray. Its output signal is recorded as the original data. A new recording method is adopted. Through the method some more detailed information and new result are expected to be detected, and the detecting result is analyzed.

Key words: Cosmic ray; Scintillation counter; Dynamic waveform analyzer; Data acquisition



LI Bin was born on March 21, 1974, in Zhoukou city, Henan Province. She received her B. S. and M. S. degrees from Zhengzhou University in 1996 and 1999. Now she works in Information Engineering University of PLA. Her research interest is particle detection.