

# 塑料闪烁体对带电粒子的光响应<sup>1)</sup>

周大庄

(中国科学技术大学七系)

## 摘 要

具有许多优点的塑料闪烁体广泛应用在粒子物理中。高能高电荷情形下塑料闪烁体的光响应研究在高能物理和宇宙线物理中有着重要意义。芝加哥大学的高能宇宙线实验,除了获得许多重要天体物理结果,还为塑料闪烁体对高电荷相对论粒子的光响应研究积累了资料。本文介绍上述宇宙线实验和资料分析结果并对塑料闪烁体的非线性光响应进行讨论。

## 一、引 言

适于做粒子探测的各种闪烁体中,塑料闪烁体具有众所周知的许多特点,如大面积、高信号输出、快时间响应、加工容易、成本低廉等。由于这些特点,高能物理和宇宙线物理广泛使用塑料闪烁体做触发计数器,符合探测器,高能量能器,飞行时间谱仪和计数器望远镜。

然而,关于塑料闪烁体对多电荷带电粒子的光响应研究还相当落后。过去的研究仅仅局限于低能情形( $\sim \text{MeV}/\text{核子}$ )和少数几种带电粒子(多为质子和 $\alpha$ 粒子)。高能情形下的多电荷粒子( $\sim \text{GeV}/\text{核子}$ , 电荷数 $z \leq 28$ )还无人做过系统研究。主要原因在于放射性源粒子和加速器粒子都局限在少数几种电荷,而高空宇宙线核成分探测又存在许多技术上和经济上的困难。

芝加哥大学宇宙线天体物理的一个重要组成部分是高空气球实验,其中的宇宙线核成分探测系统使用了大面积塑料闪烁体,多次飞行实验为详细研究塑料闪烁体的光响应积累了观测资料,这是在地面上利用放射源和加速器还无法实现的。

## 二、仪器与实验简介

本仪器是芝加哥大学七十年代研制的气球宇宙线仪器中的一个<sup>[1]</sup>,主要目的是准确测量宇宙线核成分的电荷分布,同位素组成和元素的平均质量。图1是仪器剖面图。

$T_1$ 和 $T_2$ 是两个全同的塑料闪烁探测器,由质量厚度为 $1 \text{ 克}/\text{cm}^2$ 的塑料闪烁体组成。

1) 作者于1983—1985年在美国芝加哥大学费米研究所天体物理与空间研究室工作期间的部分研究成果。  
本文1985年12月22日收到。

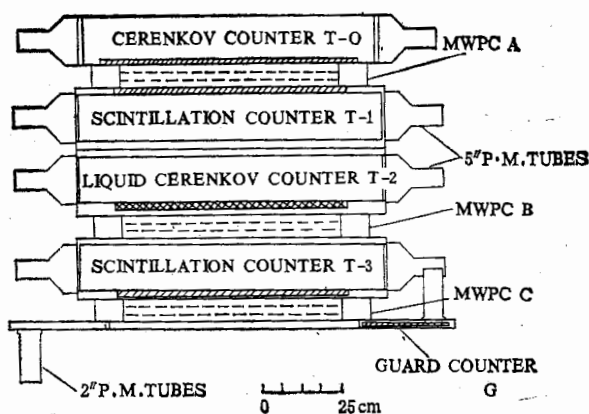


图 1 宇宙线核成分望远镜剖面图

为使仪器能够观测高电荷粒子,选用了光响应线性度较好的 PilotY 塑料闪烁体<sup>[2]</sup>。T<sub>1</sub>和 T<sub>3</sub>主要用作触发,符合,飞行时间及电荷测量。

T<sub>0</sub>是塑料切伦柯夫探测器,使用 Pilot 425,质量厚度为 1.3 克/cm<sup>2</sup>,光学折射系数为 1.49(NaD 线),主要用于宇宙线电荷测量。

T<sub>2</sub>是液体切伦柯夫探测器,工作介质是无色液体氟里昂,其质量密度=1.66 克/cm<sup>3</sup>,分子量=452.1,光学折射系数=1.257(NaD 线),对可见光和紫外光透明度很高,主要用于粒子动量(能量)测量,其能量阈值约为 0.6 GeV/核子。

T<sub>0</sub>、T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>统称为 T 计数器。

另一类重要探测器是多丝正比室(MWPC) A、B、C,每个室有两层信号丝平面和三层高压电极。二层信号丝的走向互相垂直,故每个室都可测量入射粒子的坐标(x, y),联合三组(x, y)坐标可以定出粒子径迹和入射方向。多丝正比室的主要功用是:

1. 减少本底计数。

2. 计算粒子的入射天顶角(探测器平面的法线与入射方向间的夹角),用来修正闪烁计数器的脉冲高度,将它们“归一化”到垂直入射时的脉冲高度,以提高电荷分辨能力。

3. 计算粒子径迹与 T 计数器的交点,用来修正 T 计数器的非均匀性响应。

仪器的几何因子为 0.25 m<sup>2</sup> · sr.

本仪器从 1973—1975 年一共飞行 4 次,分别在德克萨斯(Texas)和奥克拉荷马(Oklahoma)进行,飞行高度约为 4 克/cm<sup>2</sup> 残余大气质量,总飞行时间约为 154 小时,仪器暴露因子约为 38 m<sup>2</sup> · sr · h。

### 三、资料分析

本文处理电荷  $z = 7 - 28$ , 动能  $T = 0.7 - 10 \text{ GeV/核子}$  的粒子事例,并直接用输出脉冲道数代表闪烁体的光产量。

为达到准确测量粒子电荷及能量的目的,第一步是对 T 计数器记录到的脉冲幅度做如下修正。

1. 粒子在  $T$  计数中的径迹长度修正。因为如果不加修正而直接采用记录到的脉冲高度做电荷测量, 大角度入射的低电荷粒子脉冲幅度可能与小角度入射的高电荷粒子的脉冲重合, 严重影响电荷的准确测量。因此必须对粒子的径迹长度进行修正。径迹长度修正通过下式实现:

采用的脉冲道数 = 记录到的脉冲道数  $\times \cos\theta$ , 其中的天顶角  $\theta$  由多丝正比室测量。

2. 借助于探测器在海平面对  $\mu$  介子的非均匀响应图对  $T$  计数器平面上各点进行脉冲幅度修正, 通过这一修正, 可以满意地消除因非均匀响应所造成的脉冲高度误差。

3. 对因电子学系统造成的增益漂移所产生的脉冲高度误差进行修正。

第二步是使用以下三种鉴别标准挑选在探测器中不产生核反应的粒子事例:

(1) 在多丝正比室中, 粒子的径迹为直线。

(2)  $T_1$  与  $T_3$  的脉冲高度基本相等。

(3)  $T_0$  与  $T_2$  的脉冲高度基本相等。

用上述标准挑选出的粒子事例用于塑料闪烁体对宇宙线核的光响应研究。

数据分析借助于该室的一个大型通用计算机程序 MEGCOP 完成。

#### 四、数据分析结果

Pilot Y 塑料闪烁体对相对论宇宙线核的光响应数据分析结果汇于表 1。

表 1 平均脉冲高度  $(T_1 + T_3)/2$  随电荷和能量的变化规律  
( $\Delta T$  是动能间隔,  $z$  是核电荷数,  $k$  是非饱和响应定标线的斜率)

$z$	$\Delta T$	$k$					
		0.7—1.0	1.0—1.2	1.2—1.5	1.5—2.0	2.0—3.1	>3.1(GeV)
		1.347	1.320	1.296	1.274	1.266	1.285
7		61.7 $\pm$ 1.7	60.4 $\pm$ 1.8	59.3 $\pm$ 2.0	58.3 $\pm$ 2.1	57.9 $\pm$ 2.1	58.8 $\pm$ 2.5
8		75.7 $\pm$ 1.9	74.3 $\pm$ 2.0	73.1 $\pm$ 2.1	72.2 $\pm$ 2.2	71.9 $\pm$ 2.4	73.2 $\pm$ 2.9
10		106.5 $\pm$ 2.5	104.2 $\pm$ 2.4	102.8 $\pm$ 2.5	102.0 $\pm$ 2.7	102.3 $\pm$ 3.0	104.1 $\pm$ 3.6
12		139.5 $\pm$ 3.1	136.7 $\pm$ 2.9	135.5 $\pm$ 3.1	134.8 $\pm$ 3.4	135.4 $\pm$ 3.7	138.6 $\pm$ 4.3
14		176.5 $\pm$ 3.6	173.5 $\pm$ 3.5	172.0 $\pm$ 3.7	171.5 $\pm$ 4.0	173.1 $\pm$ 4.6	177.6 $\pm$ 5.4
16		217.9 $\pm$ 4.0	214.0 $\pm$ 3.8	212.3 $\pm$ 3.8	212.2 $\pm$ 4.1	214.7 $\pm$ 5.3	220.1 $\pm$ 5.9
18		263.8 $\pm$ 4.4	258.7 $\pm$ 3.9	256.8 $\pm$ 4.0	256.8 $\pm$ 4.5	258.8 $\pm$ 5.3	266.2 $\pm$ 6.4
20		312.4 $\pm$ 5.7	305.6 $\pm$ 4.7	304.4 $\pm$ 5.1	304.1 $\pm$ 5.3	305.9 $\pm$ 6.0	312.5 $\pm$ 7.1
22		364.0 $\pm$ 7.1	357.0 $\pm$ 6.0	355.5 $\pm$ 6.4	355.5 $\pm$ 7.4	358.9 $\pm$ 7.2	367.6 $\pm$ 8.2
24		419.1 $\pm$ 7.3	411.8 $\pm$ 6.0	407.7 $\pm$ 6.5	407.8 $\pm$ 6.6	412.7 $\pm$ 6.7	423.1 $\pm$ 6.7
26		478.3 $\pm$ 8.5	468.8 $\pm$ 6.9	465.6 $\pm$ 7.5	465.4 $\pm$ 8.1	469.7 $\pm$ 8.8	479.7 $\pm$ 10.7
28		544.2 $\pm$ 8.6	531.9 $\pm$ 6.8	528.0 $\pm$ 5.9	528.1 $\pm$ 10.1	531.5 $\pm$ 8.0	538.3 $\pm$ 11.3

表 1 中的数值是塑料闪烁体的平均脉冲高度  $M = (T_1 + T_3)/2$ , 0.7—10 GeV 的能量范围共分为六个小区间。表 1 中的  $k$  值是“定标线”的斜率, 可从低电荷宇宙线观测资料定出来, 对不同的能量间隔,  $k$  稍有不同。定标线  $kz^2$  的意义是, 如果塑料闪烁体对带电粒子的光响应不是饱和的, 光输出应当是  $kz^2$ 。

从表 1 可以总结出以下几点规律:

1. 低电荷情形的响应与线性响应偏离不远,随着电荷的增加,响应逐渐远离定标线、到高电荷时出现饱和趋势。

2. 响应主要随电荷变化,随能量的变化幅度较小。

3. 对某一固定电荷而言,响应随能量的变化体现了带电粒子的能损变化。低能时,电离损失较高,随能量的增加逐渐减小,经过一个极小值以后又缓慢增加。但严格地讲,表中的平均脉冲高度变化并不就是电离能量损失变化规律。这是因为电离能量损失中只有一部分可以转变成闪烁光,其余部分由于猝灭通过非辐射形式消耗掉,所以表中脉冲高度变化代表的只是通过辐射形式所消耗掉的电离能量损失变化。

### 五、闪烁体非线性光响应的理论模型

闪烁体对带电粒子光响应的近代理论模型把粒子在闪烁体中的电离能量损失分为“核心”和“外围”两部分,因此称为核心-外围(Core-Halo)模型。

核心紧紧围绕入射粒子径迹,是电离能量损失密度较高的“细长圆柱”。外围离入射粒子径迹较远,是包围核心的能量损失密度较低的“粗大圆柱”,高能 $\delta$ 射线是这一区域能量沉积的主要来源,这些 $\delta$ 射线由入射粒子和晶体原子间的近碰撞产生。

核心-外围模型是在宇宙线核乳胶照片的启发下发展起来的。核乳胶照片中,沿粒子径迹有一个浓黑的高密度能量损失区,向外是逐渐变灰的低密度能量损失区。但由核乳胶照片可知,能量沉积密度是由粒子径迹向外逐渐减小的,根本没有明显的核心和外围,所以,核心-外围模型只是复杂电离能量损失的一种简化模型。

核心-外围模型中,核心具有猝灭效应,猝灭使受激分子通过非辐射退激,从而减弱了闪烁光产量,因此核心部分的发光效率 $dL/dE$ 很小,代表了闪烁光的饱和部分。外围没有猝灭效应,发光效率 $\sim 1$ ,代表闪烁光的线性部分。总的闪烁光是核心与外围两部分闪烁光之和。

虽然核心-外围模型看起来很简单,但却可以用它解释现有的各种观测现象。

Voltz<sup>[3]</sup>等人和 Tarle<sup>[4]</sup>等人对同一个核心-外围物理模型提出了不同的数学公式。

粒子在单位程长中闪烁光产量的 Voltz 公式为

$$\frac{dL}{dx} = A \left\{ (1 - F_h) \exp \left[ -B_s (1 - F_h) \frac{dE}{dx} \right] + F_h \right\} \frac{dE}{dx} \quad (1)$$

其中 $A$ (mV/MeV)是探测器的增益因子; $B_s$ (g/MeV·cm<sup>2</sup>)是猝灭中心控制参数; $F_h$ (无量纲)是沉积在外围中的能量在总能量损失中所占的比例。 $F_h$ 可进一步表示为

$$F_h = \frac{1}{2} \frac{\ln(\epsilon_{\max}/T_0) - \beta^2}{\ln(\epsilon_{\max}/I) - \beta^2} \quad (2)$$

其中 $I$ 是闪烁体平均电离势; $T_0$ 是能够进入外围的 $\delta$ 射线的最小动能; $\epsilon_{\max} = 2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2$ ,是进入外围的 $\delta$ 射线的最大动能,这里的 $m_e$ 是电子静止质量, $c$ 是真空光速, $\beta = \frac{v}{c}$ ,

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}.$$

公式(1)的第一项代表核心闪烁光贡献,第二项代表外围闪烁光贡献。

Tarle 等人在 Voltz 公式的基础上提出了另一公式(通常称为 BTV 公式),其形式为

$$\frac{dL}{dx} = \frac{A(1 - F_h)dE/dx}{1 + B_s(1 - F_h)dE/dx} + AF_h \frac{dE}{dx} \quad (3)$$

也分为两项,分别代表核心和外围的闪烁光贡献。

从数学上看, BTV 公式只不过是 Voltz 公式的一级近似表示,但 Salamon 和 Ahlen<sup>[5]</sup>对上述两公式用加速器实验数据验算后发现 BTV 公式比较好。

公式(1)、(2)中,  $dL/dx$  正比于  $M$ ,  $dE/dx$  正比于  $z^2$ , 为了精确起见,  $dE/dx$  应取 Bethe-Bloch 公式,即:

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dx} &= \frac{4\pi e^4}{m_e v^2} N_e z^2 \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right) - \beta^2 \right] \\ &= \alpha z^2 \left[ \frac{1}{\beta^2} \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} \right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (4)$$

其中的  $\alpha = \frac{4\pi e^4 N_e}{m_e c^2} \approx 0.164 \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}$ ,  $I = 65.6\text{eV}$  (对 PilotY 塑料闪烁体);  $z$  是入射核

电荷数;  $\gamma = \frac{T + m_p c^2}{m_p c^2}$ ,  $\beta = \sqrt{1 - \gamma^{-2}}$ , 这里的  $T$  是入射核动能(GeV/核子),  $m_p c^2$  是质子静止能量。

## 六、理论公式的数据拟合

理论公式拟合目的是确定其中的最佳参数值 ( $F_h$ ,  $B_s$ ,  $A$ )。任意函数拟合的 Fortran 程序取自 Bevington 书<sup>[6]</sup>, 输入数据为  $z$  (电荷数)、 $T$  (动能)、 $M$  (平均道数)和  $\sigma_M$  ( $M$  的标准误差)。经过广泛的计算机测试,找到了拟合参数(详见表 2 和表 3)。

表 2 Voltz 公式拟合参数

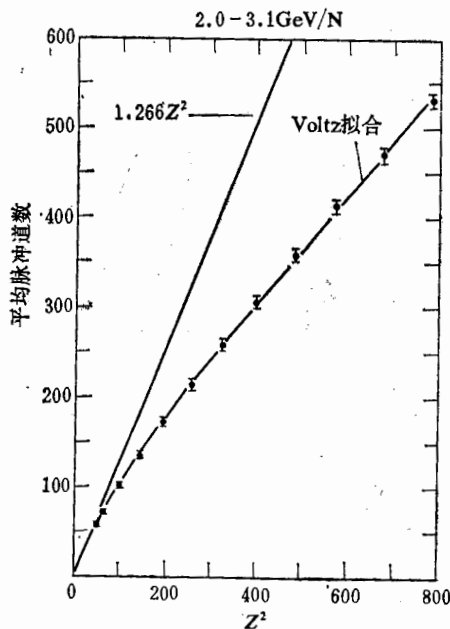
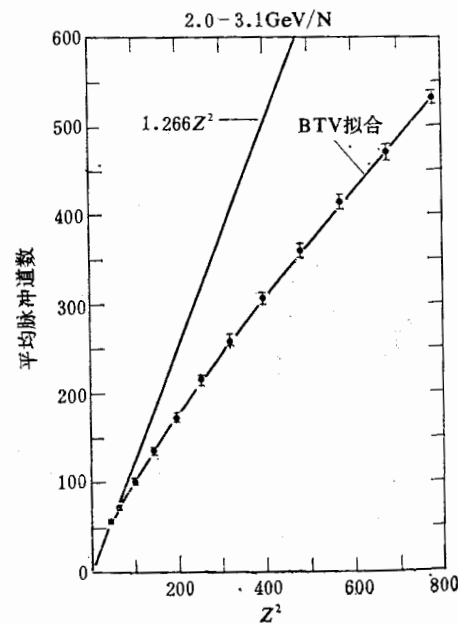
动能间隔 (GeV/核子)	$F_h$	$B_s$	$A$
0.7—1.0	0.5052±0.0031	0.0052±0.0002	0.6116±0.0034
1.0—1.2	0.5111±0.0027	0.0053±0.0001	0.6276±0.0031
1.2—1.5	0.5184±0.0029	0.0052±0.0002	0.6273±0.0032
1.5—2.0	0.5276±0.0034	0.0055±0.0002	0.6358±0.0038
2.0—3.1	0.5341±0.0036	0.0052±0.0002	0.6331±0.0040
3.1—10.0	0.5395±0.0042	0.0047±0.0002	0.6000±0.0043
0.7—10.0	0.5266±0.0042	0.0054±0.0002	0.6377±0.0047

拟合曲线与实验数据的比较见图 2 和图 3(对某一固定能量间隔而言)。

图中上方的直线是线性响应定标线,下方是拟合曲线,曲线附近是实验观测值。可以看出,两种拟合均相当好,但 BTV 拟合略优于 Voltz 拟合,与 Salamon 和 Ahlen 的结论一致。

表3 BTV 公式拟合参数

动能间隔 (GeV/核子)	$F_k$	$B_r$	A
0.7-1.0	$0.3644 \pm 0.0029$	$0.0085 \pm 0.0002$	$0.7259 \pm 0.0041$
1.0-1.2	$0.3683 \pm 0.0026$	$0.0085 \pm 0.0002$	$0.7442 \pm 0.0037$
1.2-1.5	$0.3792 \pm 0.0027$	$0.0080 \pm 0.0002$	$0.7321 \pm 0.0038$
1.5-2.0	$0.3908 \pm 0.0033$	$0.0080 \pm 0.0003$	$0.7300 \pm 0.0043$
2.0-3.1	$0.4018 \pm 0.0036$	$0.0073 \pm 0.0003$	$0.7151 \pm 0.0045$
3.1-10.0	$0.4073 \pm 0.0044$	$0.0059 \pm 0.0002$	$0.6635 \pm 0.0048$
0.7-10.0	$0.3916 \pm 0.0041$	$0.0077 \pm 0.0003$	$0.7286 \pm 0.0053$

图2 Voltz 拟合曲线(对  $dE/dx =$  Bethe-Bloch 公式)图3 BTV 拟合曲线(对  $dE/dx =$  Bethe-Bloch 公式)

## 七、拟合结果的讨论

为了更清楚地看到核心和外围的闪烁光贡献,利用拟合参数和两种理论公式将闪烁光的核心和外围发光量分别算出并绘于图4和图5。

我们从图中看到, Voltz 拟合核心闪烁光随着电荷的增加先是上升,在  $z = 13-14$  时到达最大值,然后逐渐下降,在高电荷时几乎为零,未能体现核心光响应的饱和趋势。与此相反, BTV 拟合的核心光响应却一直随电荷增加缓慢上升,在高电荷时到达饱和。因此,按 Voltz 公式,核心光贡献在高电荷时接近于零,闪烁光全部来自外围,这在物理上难以解释。按 BTV 公式,核心光贡献正是通常意义上的饱和响应,闪烁光总是核心和外围两部分的和。显然, BTV 公式有较清楚的物理意义。

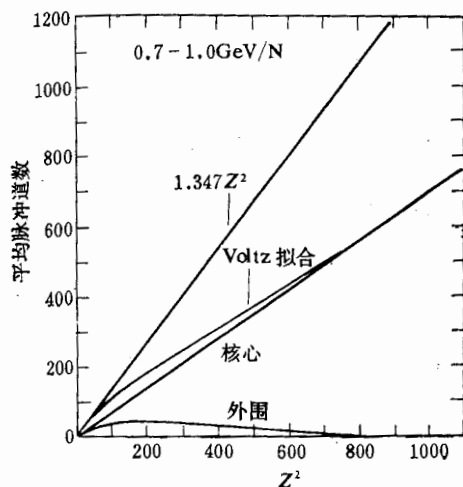


图 4 Voltz 拟合的核心和外围光贡献

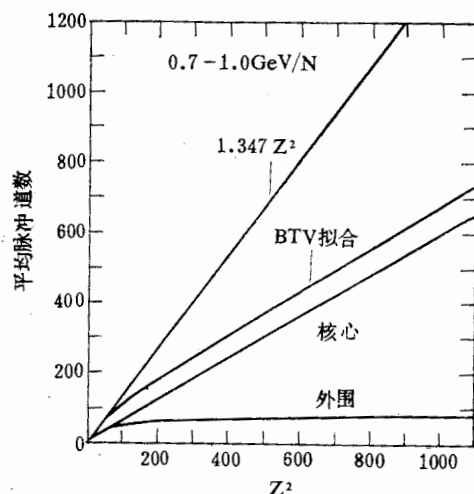


图 5 BTV 拟合的核心和外围光贡献

尽管 Voltz 公式和 BTV 公式有一些差别,但在实际应用时,至少在目前的实验范围内均足够准确。

塑料闪烁体的发光由具有猝灭机制的核心和无猝灭的外围两部分组成,这一特点可以用来鉴别反粒子<sup>[7]</sup>,这种轻便的大面积探测器有可能在今后为人们寻找具有重要天体物理意义的高电荷宇宙线反核作出贡献。

本工作曾得到芝加哥大学费米研究所天体物理与空间研究室 P. Meyer 教授, R. Dwyer 博士和计算机组的支持和协助。定稿过程中,承蒙李惕碚同志提出宝贵意见。在此特向他们表示真诚的感谢。

## 参 考 文 献

- [1] R. Dwyer et al., *Nucl. Inst. and Meth.*, 224(1984), 247.
- [2] Nuclear Enterprises, Inc., San Carlo, USA.
- [3] R. Voltz et al., *J. Chem. Phys.*, 45(1966), 3306.
- [4] G. Tarle et al., *Astrophys. J.* 230(1979), 607.
- [5] M. H. Salamon et al., *Nucl. Inst. and Meth.*, 195(1982), 557.
- [6] P. R. Bevington, *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, 1969, McGraw-Hill Inc., Chap. 11.
- [7] S. P. Ahlen et al., *Nucl. Inst. and Meth.*, 197(1982), 485.

## PLASTIC SCINTILLATOR RESPONSE TO CHARGED PARTICLES

ZHOU DA-ZHUANG

*(University of Science and Technology of China)*

### ABSTRACT

Plastic scintillators with many advantages are widely used in particle physics. Researches on plastic scintillator response at both high energy and high electric charge are significant to the experiments in high energy physics and cosmic ray physics. In addition to many important astrophysical results, the high energy cosmic rays experiments at the University of Chicago accumulate data for plastic scintillator response to relativistic particles of high electric charges. This paper introduces the cosmic ray experiments mentioned above, presents data analysis results and the discusses the nonlinear response of plastic scintillators.