第7卷 第4期 空间科学学报 Vol. 7, No. 4
1987 年 10 月 GHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Oct., 1987

识别朝阳 1 号聚碳酸酯记录的宇宙线重粒子

康铁笙 翟鹏济
（中国科学院高能物理研究所）

摘 要

本文介绍了根据一定 REL 区间所对应的粒子在固体核径迹探测器中的穿行距离与粒子原子序数的关系识别重粒子的方法，并用此法得出在我国卫星上放置的朝阳 1 号聚碳酸酯记录的宇宙线重粒子的原子序数和比能。

一、引 言

在宇宙空间的人造卫星、宇宙飞船和宇航员受到强烈的宇宙线照射，这些宇宙线粒子有很大的原子序数范围和能量范围。测定这些粒子原子序数和能量对于了解宇宙空间的辐射环境和宇航员所受的辐射剂量十分必要，尤其是重粒子比轻粒子的辐射损伤更大，所以有必要对其监测和研究。

聚碳酸酯固体核径迹探测器是一种性能优良的重粒子探测器，它不仅对重粒子响应好，而且重量轻、操作安装方便，不需任何电子学仪器，能很简单地装在卫星和宇宙飞船里，还可装在宇航员头盔、服装上，已在探测宇宙空间重粒子辐射等方面得到了广泛应用[1]。

朝阳 1 号聚碳酸酯具有良好的记录重粒子的性能[2,3]。我们用重离子加速器加速的已知原子序数和比能的重离子对其进行了标定[4]。识别重粒子的方法很多[5-9]。本文介绍利用标定曲线，使用一定 REL 区间所对应的粒子在探测器中的穿行距离与粒子原子序数的关系识别重粒子的方法，并用此法得出在我国卫星舱内放置的朝阳 1 号聚碳酸酯迭片记录的宇宙线重粒子的原子序数和比能。

二、径迹几何及 REL 的测定

带电粒子射入固体核径迹探测器，沿其路径产生辐射损伤。使用化学试剂蚀刻时，损伤部份的径迹蚀刻速度 V_T 比未受损伤部份的体蚀刻速度 V_B 大。如果探测器材料均匀并具有各向同性的蚀刻性质，则 V_B 为常数，蚀刻后沿粒子损伤路径形成正圆锥形蚀坑，

本文于 1986 年 12 月 30 日收到。

其几何见图 1. 当粒子入射的倾角 $\delta \neq 90°$ 时，此蚀坑在膜片表面的开口为椭圆. 测量椭圆开口的长轴 $2a$、短轴 $2b$ 以及圆锥在膜片表面的投影长度 g，即可由下列公式计算圆锥长度 l[5]:

$$\sin\theta_P = b/[(g-a)^2 - a^2 + b^2]^{1/2}, \quad (1)$$

$$\sec^2\delta = \frac{a^2}{a^2-b^2} + \sin^2\theta_P, \quad (2)$$

$$\sin\theta = \cos\delta \cdot \sin\theta_P, \quad (3)$$

$$x_0 = -a\tan\theta/\tan\delta, \quad (4)$$

$$l = (g - a - |x_0|)/\cos\delta. \quad (5)$$

上述式中 θ 是蚀坑的圆锥角，θ_P 是 θ 在膜片表面的投影，x_0 是膜片表面上粒子入射点到椭圆开口中心的距离. 若以 V 表示比蚀刻速度，$V = V_T/V_B$，则

$$V = \sin^{-1}\delta + \frac{l}{V_B t}. \quad (6)$$

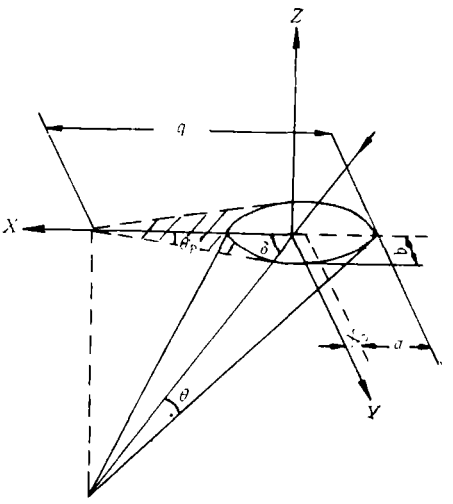


图 1　蚀刻径迹的几何

Fig. 1 Geometrical diagram of a etching track

式中 t 为蚀刻时间. 在一定蚀刻条件下，V 是限定能量损失率 REL 的函数. 本实验使用的朝阳 1 号聚碳酸酯材料均匀并具有各向同性的蚀刻性质[2]. 当使用 KHC (20gKOH+72gH_2O + 42gC_2H_5OH)，40℃ 和 NS (6.25NNaOH + 0.05% 烷基苯磺酸钠)，60℃ 这两种蚀刻条件蚀刻它记录的重粒子径迹时，V 与 REL 的关系可用以下二式表示[4]:

$$V = 9.1 \times 10^{-6}\mathrm{REL}^{1.516}, \quad \text{KHC, 40℃.} \quad (7)$$

$$V = 8.1 \times 10^{-8}\mathrm{REL}^{2.073}, \quad \text{NS, 60℃.} \quad (8)$$

式 (7) 和 (8) 可改写成:

$$\mathrm{REL} = 2.114 \times 10^{3}V^{0.6596}, \quad \text{KHC, 40℃.} \quad (9)$$

$$\mathrm{REL} = 2.636 \times 10^{3}V^{0.4824}, \quad \text{NS, 60℃.} \quad (10)$$

式中 REL 单位为 MeV · cm² · g^{-1}. 测量 q、$2a$ 和 $2b$，由式 (1)—(6) 计算 V，根据式 (9) 和 (10) 即可求出 REL.

三、穿行距离与原子序数的关系

宇宙空间的重粒子辐射的原子序数范围和能量范围很大. 由于宇宙飞行耗资多，所以置于宇宙飞行器上的探测器要具有宽的响应范围，探测方法也应与之相适应，才能在一次飞行中获得较多的实验资料. 利用粒子穿行距离和其原子序数的关系识别重粒子可以较好满足这一要求.

朝阳 1 号聚碳酸酯的分子结构和密度与 Lexan 相同，故本文引用了关于 Lexan 聚碳酸酯中一些粒子的 REL 和射程数据[5]，其中 REL 与比能 E/M (粒子单位质量的能量，单位是 MeV/Nucl，即每个核子的能量)的关系见图 2. 由此可得 REL 与剩余射程 R 的关

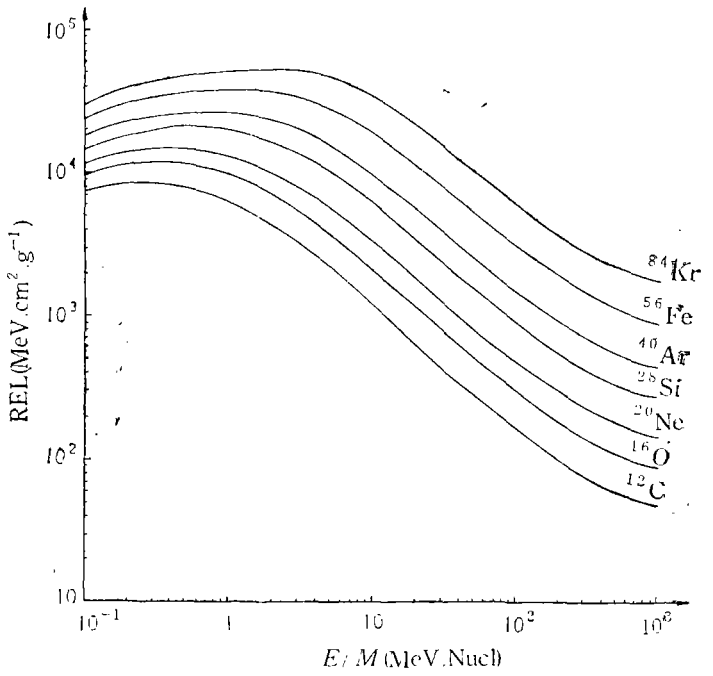


图 2 一些粒子在 Lexan 聚碳酸酯中的 REL 与 E/M 的关系

Fig. 2 The relation between REL and E/M of some particles in Lexan polycarbonate

系，见图 3，根据这一关系即可得出不同 REL 区间所对应的粒子在材料中的穿行距离 D 与粒子原子序数 Z 的关系。图 4 画出了几种选定的 REL 区间 D 与 Z 的关系。可见 D 是 Z 的单值函数，对 Z 的变化十分灵敏。测量粒子路径上两点的 V 及两点间距离 D，即可确定粒子的原子序数。

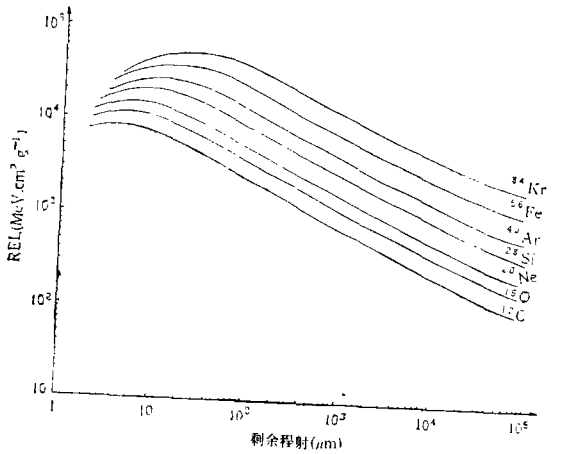
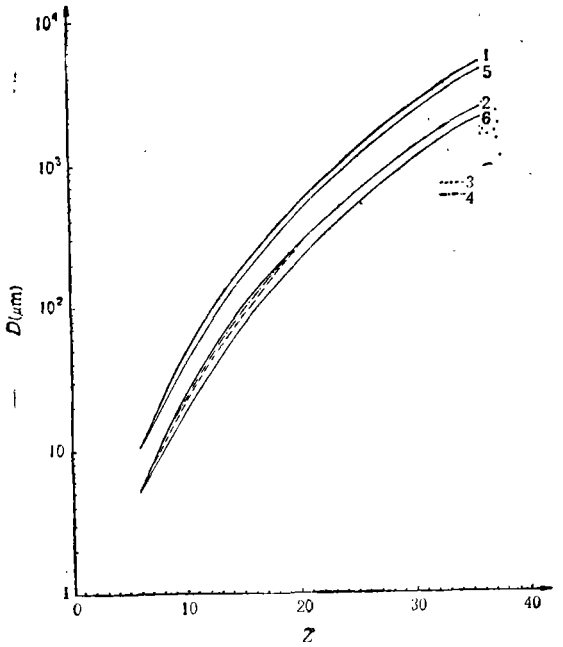


图 3 一些粒子在 Lexan 聚碳酸酯中的 REL 与 R 的关系

Fig. 3 The relation between REL and R of some particles in Lexan polycarbonate



1. REL 3.3×10^3—3.7×10^3 MeV · cm² · g⁻¹, 2. REL 3.3×10^3—3.5×10^3 MeV · cm² · g⁻¹,
3. REL 3.5×10^3—3.7×10^3 MeV · cm² · g⁻¹, 4. REL 3.4×10^3—3.6×10^3 MeV · cm² · g⁻¹,
5. REL 3.4×10^3—3.8×10^3 MeV · cm² · g⁻¹, 6. REL 3.6×10^3—3.8×10^3 MeV · cm² · g⁻¹

图 4　D 与 Z 的关系

Fig. 4　The relation between D and Z

四、宇宙线重粒子的识别

1976 年，在我国 JAT 卫星舱内安放了一迭朝阳 1 号聚碳酸酯膜片（片号 384—395）。卫星回收后，分别用 80℃ 的 KHC，40℃ 的 KHC 和 60℃ 的 NS 蚀刻这些膜片，用光学显微镜扫描，在各膜片表面找到属于同一入射粒子的圆锥形径迹，并测量它们的 q、$2a$ 和 $2b$，计算出 V 和 REL。用 H_0 表示蚀刻前粒子穿透处某一膜片的初始厚度，H 表示蚀刻 t 时间后该处膜片的剩余厚度，则

$$H_0 = H + 2V_B t. \tag{11}$$

用厚差法求出 $V_B = 1.10\mu m/h$，KHC，40℃；$V_B = 0.754\mu m/h$，NS，60℃。粒子在各膜片射入和穿出处的 REL 值见表1。由图 2 可见，当粒子比能大于几个 MeV/Nucl 时，REL 随比能增加而减小。故由表 1 可知此粒子是从 395 号片射入，由 384 号片穿出。以 395 号片上粒子入射处为起点，使用相邻膜片表面 REL 的平均值作为界面处 REL，得到 REL 随 H 的变化，见图 5。按线性关系处理，得

$$\mathrm{REL} = 3.745 \times 10^{-4} H + 3.159, \tag{12}$$

REL 单位为 10^3 MeV · cm² · g⁻¹，H 单位为 μm。则

$$H = (\mathrm{REL} - 3.159) \times 10^4 / 3.745. \tag{13}$$

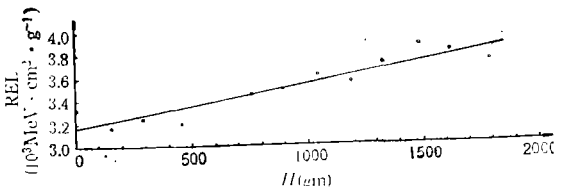


图 5 REL 与 H 的关系

Fig. 5 The relation between REL and H

表 1 在粒子射入和穿出处的 REL

膜片号	表 面	V	REL (10^3MeV · cm^2 · g^{-1})	H_0 (μm)	蚀刻条件
384	出 入	2.051 2.151	3.72 3.81	170.6	NS, 60℃, 30h
385	出 入	2.444 2.489	3.81 3.86	137.3	KHC, 40℃, 20h
386				149.4	KHC, 80℃, 80m
387	出 入	2.324 2.196	3.69 3.55	142.6	KHC, 40℃, 20h
388	出 入	1.820 1.824	3.52 3.52	137.3	NS, 60℃, 30h
389	出 入	2.008 1.829	3.69 3.52	156.0	〃
390	出 入	1.792 1.807	3.43 3.51	140.1	〃
391	出 入	1.661	3.37	148.8	NS, 60℃, 20h
392	出 入	1.474	3.18	155.4	〃
393	出 入	1.485 1.510	3.19 3.22	164.9	〃
394	出 入	1.544	3.25	140.7	〃
395	出 入	1.454 1.610	3.16 3.32	148.5	〃

由下式求出 D:

$$D = H/\sin\delta, \tag{14}$$

式中 δ 是各圆锥计算值平均得到，$\delta = 45.4°$. 由式 (13) 和 (14) 求得图 4 各曲线 REL 区间对应的 D，利用图 4 求出各 Z 值，取平均得 $Z = 26.88 \pm 0.53$.

对朝阳 1 号聚碳酸酯，REL 表示为[4]:

$$\mathrm{REL} = 8.0974 \times 10^{-2}[\ln(\beta\nu)^2 - \beta^2 - 2\frac{c}{Z} + 12.2624]Z^{*2}/\beta^2 \qquad (15)$$

若此粒子的 Z 按 27 计算，得其 REL 与 E/M 的关系见图 6. 由式 (12) 得该粒子在 395 号片入射面的 REL 为 $3.159 \times 10^3 \mathrm{MeV \cdot cm^2 \cdot g^{-1}}$. 由图 6 可知该粒子在 395 号片入射时的比能为 109MeV/Nucl (图 6 横坐标为 MeV/Nucl).

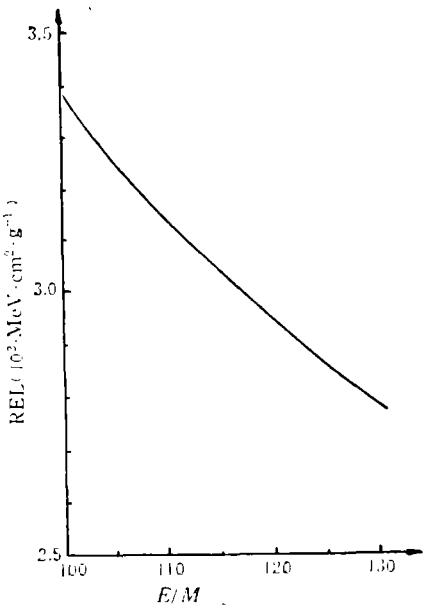


图 6　Z 为 27 的粒子的 REL

Fig. 6　REL of the particle with Z of 27

五、讨　论

由以上可见，一定 REL 区间所对应的粒子在探测器中的穿行距离是粒子原子序数的单值函数，因此可作为确定粒子原子序数的参量. 所得原子序数的精确度与对 REL 与 H 关系的处理十分密切. 本文将其处理成线性关系是近似的. 若实验数据更多(如减少每一膜片厚度使迭由更多层膜片组成)，就能找到更合理的关系式，提高 Z 的精确度. 为了集中讨论穿行距离在识别粒子中的作用，本文把标定曲线视为无误差. 实际标定曲线存在误差且对 Z 的精确度有一定影响.

由以上测定结果，我们认为所测粒子最可能是 Co($Z = 27$)，也可以是 Fe($Z = 26$)，考虑到实际误差还要大，可认为此粒子处于宇宙线电荷谱的铁峰之内.

由图 3 可知，在粒子比能较小时，一个 REL 可对应两个 R 值，所以本方法不能用于比能低 ($E/M <$ 几个 MeV/Nucl) 的粒子. 这一点对于研究宇宙空间的重粒子辐射来说并不重要，因为所测宇宙线粒子具有极大比能，其值都在几 MeV/Nucl 以上. 由图 2 可知，在中、高比能区，REL 随 E/M 增加而减少，当 REL 减少到某一确定值 REL_c 时，此粒子将不能被记录. 聚碳酸酯的 $\mathrm{REL}_c = 3.3 \times 10^3 \mathrm{MeV \cdot cm^2 \cdot g^{-1}}$[5]，故在 REL 小于此值时不能确定出 Z 值. 与 REL_c 相对应的比能即称为阈能，对 ^{56}Fe 为100MeV/Nucl，^{84}Kr 为 230MeV/Nucl 等. 对这种超过阈能的粒子，可采用更厚的迭片将其比能在迭片中降到阈能以下而被记录和识别.

可见本方法对宇宙线重粒子的原子序数和比能的响应范围很大，对粒子在迭片中穿行状况(透出或停止)要求不高，而且通过改变膜片厚度和迭片层数使方法有极大灵活性，能适应不同的探测需要. 只要定出粒子路径上任意二点的 V 和此二点间的距离，即可根据标定曲线和穿行距离确定粒子原子序数等参量. 由于本方法所具有的使用探测器简单、重量轻、体积小、容易安装等优点，从而能在研究宇宙空间重粒子辐射方面发挥重要作

用。

参 考 文 献

[1] Fleischer, R. L., P. B. Price and R. L. Wallker, Nuclear Tracks in Solid, University of California Press, 1975.
[2] 翟鹏济，康铁笙和张志尧，高能物理与核物理，第7卷，第649页，1983。
[3] 康铁笙和翟鹏济，高能物理与核物理，第8卷，第380页，1984。
[4] 康铁笙和翟鹏济，高能物理与核物理，第11卷，第289页，1987。
[5] Benton, E. V., USNRDL-TR-68-14, 1968.
[6] Murakami, Akira, *Nucl. Instr. Meth.*, Vol. **111**, p. 567, 1973.
[7] Price, P. B., R. L. Flescher and D. D. Petereon, *Phys. Rev.*, Vol. **164**, p. 1618, 1967.
[8] Kuminori, Endo, *Nucl. Instr. Meth.*, Vol. **111**, p. 29, 1973.
[9] Grabez, B., R. Beckmann, P. Vater and R. Brandt, *Nucl. Instr. Meth.*, Vol. **211**, p. 209, 1983.

Identification of Heavy Cosmic Ray Nuclei Recorded by a Satellite Borne Chaoyang No. 1 Polycarbonate

Kang Tie-sheng Zhai Peng-ji

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

Abstract

In this paper a method based on relation of past distance of particle in SSNTD to atomic number of the particle for identification of heavy charged particle is presented. The atomic number and the energy of the heavy cosmic ray nuclei recorded by Chaoyang No. 1 polycarbonate borne in a Chinese satellite are determined with this method.