

# 空间重离子的鉴别

颜红梅 卫增泉 郝冀方

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

梅曼彤

(华南农业大学生物技术学院 广州 510642)

**摘要** 采用地面加速的重离子模拟空间重离子标定了 CR-39 固体核径迹探测器,通过物理分析和计算方法获得了一个数学表达式,这样就可以通过 CR-39 固体核径迹探测器上径迹的测量进行离子鉴别和能量估计。

**关键词** 空间重离子,CR-39 固体核径迹探测器,标定实验,离子鉴别

**中图分类号** Q691

通常认为,空间环境对生物具有诱变作用,这种诱变效应究竟是空间重离子造成的还是微重、真空、磁场等因素的影响,仍然是争论的问题。我们采用 CR-39 固体核径迹探测器与水稻种子组成的整个系统,通过蚀刻径迹定位与种子培育,试图判断突变效应是否重离子辐射的结果,以及由何种离子造成。为此,本文在鉴别离子和能量估计方面进行了尝试。

## 1 材料与方法

### 1.1 固体核径迹探测器

CR-39 是一种比较理想的塑料探测器,具有灵敏、均匀、稳定、分辨率高、光学性能好等优点<sup>[1]</sup>。我们采用了两种不同的 CR-39 材料,一种是美国塑料公司(ATP,INC.)生产的剂量学 CR-39 材料,分子式为  $C_{12}H_{18}O_7$ ,密度为  $1.31g/cm^3$ ,厚度为  $600\mu m$ ;另一种是北京防化院生产的 SY-II 型 CR-39 探测器,厚度为  $300\mu m$ 。

### 1.2 蚀刻条件

蚀刻条件包括溶液种类及其浓度、蚀刻温度和时间。对不同的 CR-39 材料,不同能量的不同离子其蚀刻条件应该有所不同,但从我们目前有限的实验中(采用  $5.14MeV$   $^3He$   $\alpha$  粒子、 $25MeV/u$   $^{40}Ar^{15+}$ 、 $50MeV/u$  和  $75MeV/u$  的  $^{12}C^{6+}$ ,分别对国内外生产的 CR-39 片子进行试验)得知,它们之间的差别不太大。最终确定的蚀刻条件是:浓度为  $6.25mol/L$  的 NaOH 溶液,温度控制在  $70\pm 1^\circ C$ ,蚀刻时间由需要而定。

### 1.3 标定实验和有关参数

标定实验在兰州重离子加速器国家实验室(NLHIAL)重离子研究装置(HIRFL)上进行,采用外靶技术,在大气环境中进行的,用  $50、75MeV/u$   $^{12}C^{6+}$  分别辐照国产的 CR-39 叠层,离子束经过扫描,截面直径为  $4cm$ ,均匀度为  $55\%$ ,束流强度调整到最小,约为  $10^4 ions/cm^2$ 。辐照后进行蚀刻,蚀刻完成后,用螺旋测微仪测定 CR-39 片的剩余厚度,将原有厚度与剩余厚度之差的半值  $d$  除以蚀刻总时间  $t$  便得到体蚀刻率  $V_G$ 。在光镜下测定蚀刻后得到的径迹长度,并考虑了它在体蚀刻层中的长度后,可以通过计算得到径迹蚀刻率  $V_T$ <sup>[2]</sup>。

离子在穿过 CR-39 叠层时,能量逐渐减小,LET 逐渐增大,可以测到不同层片上的  $V_T$  并计算出相应的 LET 值,便可拟合出一个数学表达式:

$$V_T = A \cdot LET^B$$

(1)

同时,获得拟合系数  $A$  和  $B$ 。

1.4 离子鉴别方法

1.4.1 离子鉴别 离子在材料中总的能量损失率主要由它的速度和有效电荷决定,可以表征如下:

$$-dE/dX = (C_1 Z^{*2}/\beta^2) \cdot [\ln(W_{max}^2/I^2) - 2\beta^2 - \delta - U]$$

(2)

(2)式是离子能量和原子序数的函数,可表达为:  $LET = f(Z, E) = f(Z, R)$ 。式中,  $E, R$  分别为离子的能量和剩余射程,  $LET$  为传能线密度,通常即为离子在材料中的能量损失率。于是,可建立一个数学模型:

$$LET = cZ^d R^b = aR^b$$

(3)

将式(3)代入标定实验中建立的数学表达式(1),便得:

$$V_T = A \cdot (cZ^d R^b)^B = Ac^B \cdot Z^{dB} \cdot R^{bB}$$

(4)

为使问题简化,令  $bB \equiv -1$ , 同时让

$$Ac^B = p, dB = q, \text{即 } R = pZ^q V_T^{-1}$$

(5)

两边取导数后,得  $dR/dV_T^{-1} = pZ^q$ , 于是:

$$Z = (dR/pdV_T^{-1})^{1/q}$$

(6)

式中,  $p, q$  系数可通过计算和实测的数据拟合得到,  $dR/dV_T^{-1}$  可以通过实测到的蚀刻率  $V_T$  的倒数在  $X$  轴上、剩余射程  $R$  在  $Y$  轴上作图<sup>[3]</sup>, 由它们拟合成线性方程,其斜率即为  $dR/dV_T^{-1}$ 。最后,可由(6)式来鉴别离子种类。

1.4.2 离子能量确定方法 对于某一径迹,从测到的一组  $V_T$  值可以判别离子入射的方向(通常  $V_T$  最小者为入射处),选取离子入射第一片 CR-39 的径迹蚀刻率  $V_T$ ,利用(5)式可以求得其剩余射程  $R$ ,再根据鉴别到的离子种类及其能量( $E$ )与射程( $R$ )的关系曲线,得到其入射时相应的能量  $E$ 。

2 结果

2.1 标定结果

2.1.1 50MeV/u  $^{13}\text{C}$  离子辐照国产 CR-39 按照标定实验方法,采用 50MeV/u  $^{13}\text{C}$  离子辐照 21 片 300 $\mu\text{m}$  厚的国产 CR-39 叠层。测得蚀刻率  $V_G = 0.98\mu\text{m}/\text{h}$ ,测得径迹蚀刻率  $V_T$  与其对应的 LET 计算值如表 1。

表 1 测得径迹蚀刻率  $V_T$  与其对应的 LET 计算值

Table 1 Measured track etching rate  $V_T$  and corresponding LET calculation value

| CR-39 片序号    | 径迹蚀刻率 $V_T$                                            | 对应的 LET 计算值                                                            |
|--------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| CR-39 number | Track etching rate $V_T/\mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ | Corresponding LET calculation value/ $\text{MeV}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ |
| 1            | $3.42 \pm 0.13$                                        | 0.05721                                                                |
| 2            | $3.35 \pm 0.21$                                        | 0.05875                                                                |
| 3            | $3.68 \pm 0.15$                                        | 0.06031                                                                |
| 6            | $4.55 \pm 0.52$                                        | 0.06655                                                                |
| 11           | $5.67 \pm 0.67$                                        | 0.08207                                                                |

由以上数据可拟合得到系数为： $A = 2515.425 \mu\text{m}^2/\text{h} \cdot \text{MeV}$ ， $B = 2.375$ 。

2.1.2  $75\text{MeV/u}$   $\text{C}^{13}$  离子辐照美国产 CR-39 按照标定实验方法,采用  $75\text{MeV/u}$   $\text{C}^{13}$  离子辐照 26 片  $600\mu\text{m}$  厚的美国产 CR-39 叠层。测得蚀刻率  $V_G = 0.82 \mu\text{m}/\text{h}$ ,测得径迹蚀刻率  $V_T$  与其对应的  $LET$  计算值如表 2。

表 2 测得径迹蚀刻率  $V_T$  与其对应的  $LET$  计算值

| Table 2 Measured track etching rate $V_T$ and corresponding $LET$ calculation value |                                                          |                                                                            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| CR-39 片序号                                                                           | 径迹蚀刻率 $V_T$                                              | 对应的 $LET$ 计算值                                                              |
| CR-39 number                                                                        | Track etching rate $V_T/\mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ | Corresponding $LET$ calculation value/ $\text{MeV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ |
| 4                                                                                   | $1.33 \pm 0.17$                                          | 0.04402                                                                    |
| 6                                                                                   | $1.56 \pm 0.19$                                          | 0.04674                                                                    |
| 7                                                                                   | $1.61 \pm 0.18$                                          | 0.0479                                                                     |
| 8                                                                                   | $1.62 \pm 0.21$                                          | 0.04945                                                                    |
| 9                                                                                   | $1.66 \pm 0.18$                                          | 0.05112                                                                    |
| 10                                                                                  | $1.72 \pm 0.25$                                          | 0.05318                                                                    |
| 12                                                                                  | $1.69 \pm 0.18$                                          | 0.05745                                                                    |
| 14                                                                                  | $1.75 \pm 0.22$                                          | 0.0635                                                                     |
| 15                                                                                  | $1.77 \pm 0.24$                                          | 0.0678                                                                     |
| 16                                                                                  | $1.82 \pm 0.25$                                          | 0.07249                                                                    |
| 17                                                                                  | $1.90 \pm 0.28$                                          | 0.07897                                                                    |
| 18                                                                                  | $2.46 \pm 0.29$                                          | 0.08848                                                                    |

由表 2 数据可拟合得到系数为： $A = 1044.723 \mu\text{m}^2/\text{h} \cdot \text{MeV}$ ， $B = 2.375$  两个  $A$  值的平均值为： $1780.074 \mu\text{m}^2/\text{h} \cdot \text{MeV}$ 。

2.2 鉴别离子及其检验

首先用程序 TRIM92 计算出在空间丰度较大的、典型的  $\text{C}$ 、 $\text{O}$ 、 $\text{Ne}$ 、 $\text{Si}$ 、 $\text{Ar}$ 、 $\text{Fe}$  6 种离子在 CR-39 材料中的  $LET$  (传能线密度) -  $R$  (剩余射程) 的关系曲线。并用这 6 种不同离子  $LET - R$  的关系曲线,取多个(3 个以上)点的值,对(3)式  $LET = aR^b$  进行拟合,求得  $a$ 、 $b$  系数列于表 3。

表 3 对  $LET = aR^b$  进行拟合求得的  $a$ 、 $b$  系数

| Table 3 Fitting with $LET$ and $R$ for $LET = aR^b$ to get $a$ , $b$ coefficients |         |         |         |         |         |         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 离子种类 Ion sort                                                                     | C       | O       | Ne      | Si      | Ar      | Fe      |
| $Z$                                                                               | 6       | 8       | 10      | 14      | 18      | 26      |
| $a$                                                                               | 2.5085  | 4.1663  | 5.3746  | 9.7458  | 11.7332 | 19.1623 |
| $b$                                                                               | -0.4301 | -0.4372 | -0.4268 | -0.4354 | -0.4018 | -0.3939 |

结果发现,不同离子拟合得到的系数  $b_i$  非常接近,处在  $-0.437 - -0.394$  之间,取其算术平均值  $b = -0.421$ , 根据  $bB \equiv -1$ ,  $B$  值应为 2.375。

然后,由(3)式可知： $a = cZ^d$ , 用表 3 中这 6 种不同离子的  $a$  和  $Z$  值进行拟合,得到系数： $c = 0.3, d = 1.277$ 。于是, (4)式的具体表达式为

$$V_T = A \cdot (0.3Z^{1.277}R^{-0.421})^{2.375} = A \cdot (0.0573Z^{3.033}R^{-1}) \tag{7}$$

在标定实验中,通过蚀刻测出径迹蚀刻率  $V_T$  及与之相应的相对  $R$ , 便可拟合得到斜率  $dR/dV_T^{-1}$ ：

$$dR/dV_T^{-1} = 25238.3 \mu\text{m}^2/\text{h} \cdot \text{MeV} \quad (\text{对于 } 50\text{MeV/u } \text{C}^{13} \text{ 和国产 CR-39})$$

$$dR/dV_T^{-1}=20215.64\mu\text{m}^2/h\cdot\text{MeV} \quad (\text{对于 } 75\text{ MeV/u } \text{C}^{6+} \text{ 和美国产 CR-39})$$

将上面有关值和  $c、d$  值代入(5)和(6)式,便得  $Z=6.16$ (对于  $50\text{MeV/u } \text{C}^{6+}$  和国产 CR-39)和  $Z=5.73$ (对于  $75\text{MeV/u } \text{C}^{6+}$  和美国产 CR-39)。

2.3 能量确定

在  $50\text{MeV/u } \text{C}^{6+}$  离子情形下,  $V_{T1}=3.42\mu\text{m}/h, Z=6, A$  取平均值  $1780.074\mu\text{m}^2/h\cdot\text{MeV}$ , 由(7)式求得  $R=6797.75\mu\text{m}$ , 从  $R-E$  关系曲线上查得  $E=53.9\text{MeV/u}$

对于  $75\text{MeV/u } \text{C}^{6+}$  离子情形,  $V_{T1}=1.565\mu\text{m}/h, Z=6, A$  取平均值  $1780.074\mu\text{m}^2/h\cdot\text{MeV}$ , 由(7)式求得  $R=14855.14\mu\text{m}$ , 从  $R-E$  关系曲线上查得  $E=83.6\text{MeV/u}$ 。

3 讨论

(1)由于对 6 种离子的拟合得到了较一致的  $b$ 。按照  $bB=-1$  的设定,可求得  $B$ 。以该  $B$  为准,利用(1)式对不同标定实验,拟合求得的  $A$  值误差较大。若  $B$  有一个范围,则拟合得到的  $A$  值误差会小些,得到的  $Z$  值就会较准。

(2)由(7)式求得的  $Z$  和  $E$  均有较大误差。误差主要是由拟合和取值造成的,在径迹测定中,由显微镜左右位移、上下降的机械运动致使  $R$  和  $dR$  造成误差。

(3)实验离子种类、能量和重复次数较少,有待于进一步检验此法的准确性和可靠性。

(4)判断生物效应是否重离子辐照的结果可参考文献[4]、[5],它是用 CR-39 固体核径迹探测器与水稻种子组成的整个系统,通过蚀刻径迹定位与种子培育得到的。

本文在鉴别离子和能量估计方面进行了一些研究,试图解决‘由何种离子造成’这后半个问题,这个方法对生物材料和固体材料等都普遍适用。

参 考 文 献

1 朱润生著. 固体核径迹探测器的原理和应用. 北京 科学出版社, 1987. 171—182  
ZHU Runsheng. Principle and application of solid state nuclear track detector. Beijing :Science Press, 1987. 171—182

2 颜红梅, 李强, 党秉荣, 等. 核技术, 1999, 22(7) 425—427  
XIE Hongmei, LI Qiang, DANG Bingrong, *et al.* Nucl Tech, 1999, 22(7) 425—427

3 Benton E V, Henke R P. AFWL—TR—72—5, 1971

4 卫增泉, 颜红梅, 李强, 等. 核技术, 1999, 22(7) 428—430  
WEI Zengquan, XIE Hongmei, LI Qiang, *et al.* Nucl Tech, 1999, 22(7) 428—430

5 梅曼彤, 卫增泉, 庄楚雄, 等. 见 华南农业大学生物技术学院编, 中国国防科学技术报告, 863—2—7—10—1, 2000  
MEI Mantong, WEI Zengquan, ZHUANG Chuxiong, *et al.* In :South China Agricultural University ed. . China science and technique report of national defence, Bio—technique College, 863—2—7—10—1, 2000

## Identification of heavy ions in space

XIE Hongmei WEI Zengquan HAO Jifang

(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000*)

MEI Mantong

(*South China University of Agriculture, Guangzhou 510642*)

### Abstract

CR-39 solid state nuclear track detector (SSNTD) was calibrated with heavy ions from an accelerator which were used to simulate space heavy ions in the paper. A mathematical equation has been obtained with physical analysis and calculation method. According to that ion identification and energy estimation can be performed through measurement of etched tracks in CR-39. Finally, the results were discussed.

**Key words** Space heavy ion, CR-39 solid state nuclear track detector, Calibration experiment, Ion identification

**CLC** Q691