

960A MeV ^{238}U 离子和轻核 相互作用的研究

崔浣华 柯 崑 周 健

(中国科学院高能物理研究所, 北京)

吕 维 纯

(清华大学, 北京)

R. Brandt

(西德 Philipps 大学)

用 CR-39 作为探测器和靶, 研究了 960A MeV ^{238}U 离子和轻核 (^1H 、 ^{12}C 、 ^{16}O) 的相互作用. 测定了 ^{238}U 离子在 CR-39 中的射程; ^{238}U 与轻核相互作用的电荷变化平均自由程 (mfp) 和截面, 并与理论计算值进行了比较; ^{238}U 和轻核相互作用的平均多重数 $\bar{\nu} = 2.03$, 证明相互作用的主要形式是二裂变; 反应产物的径迹按直径分布形成两个峰, 测定了每个峰的径迹密度与两个峰总径迹密度之比.

一、引 言

近十年来, 由于重离子加速器的迅速发展, 已能将重离子加速到相对论性能区, 目前美国 Lawrence Berkeley 实验室的 Bevalac 已将铀离子加速到 960A MeV, 这为相对论性重离子研究的发展提供了实验条件.

固体核径迹探测器受照蚀刻后, 径迹参数提供了产生这些径迹的核粒子的重要信息^[1,2]. 有关相互作用的形式、截面等信息, 在核物理及其它学科领域中是非常重要的. CR-39 是一种性能良好的重离子径迹探测器, 它的电荷分辨能力超过了半导体探测器^[3]. 本工作是用 CR-39 研究 960A MeV ^{238}U 和 CR-39 中轻核的相互作用.

二、实验方法

用 CR-39 径迹探测器研究 960A MeV ^{238}U 离子和轻靶核 (^1H 、 ^{12}C 、 ^{16}O) 的相互作用时, CR-39 既是靶, 又做探测器.

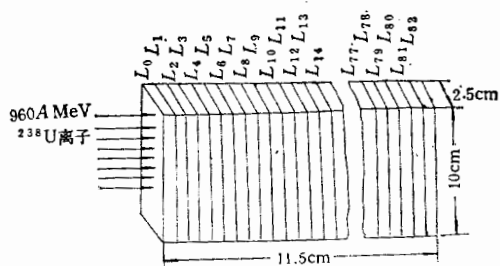


图1 960A MeV ^{238}U 离子垂直射入 CR-39 径迹探测器叠

1. 照射

用美国 Lawrence Berkeley 实验室 Bevalac 加速的 960A MeV ^{238}U 离子照射一叠 CR-39 (见图 1)。CR-39 叠由 82 片 CR-39 膜组成, 每片厚约 0.8—2mm, 面积为 $2.5 \times 10\text{cm}^2$, 叠厚为 11.5cm, 足以使入射的 ^{238}U 离子阻止在其中。 ^{238}U 离子束垂直射入 CR-39 片的表面, 入射离子注量约为 $7 \times 10^4/\text{cm}^2$ 。

2. 蚀刻

将照射过的 CR-39 在 70°C , 6N NaOH 溶液中蚀刻, 蚀刻 1.5 小时间断一次, 然后观测 ^{238}U 弹丸和反应产物形成的径迹数, 蚀刻累计时间在 3.5—8.0 小时之间, 径迹数基本不变。由于注量较高, 为避免径迹界限不易区分, 因而选择使全部径迹都能被观测到而所需的最短蚀刻时间, 由实验得到, 最佳蚀刻时间为 3.5 小时。在此蚀刻条件下, CR-39 径迹探测器的记录阈 $z/\beta \geq 10$ 。因此, $z/\beta \geq 10$ 的质子和更重的反应产物均能被记录。

3. 观测

用 Buehler Omnimet 图象分析系统(放大倍数 1800) 连接能贮存径迹直径和数目的计算机, 测量各片 CR-39 膜上的径迹直径和数目。

三、结果和讨论

1. 图 2 给出了测量得到的第 40 层 CR-39 膜上的径迹直径分布。由图可见, ^{238}U 弹丸和反应产物由三个高斯型分布的径迹峰组成, 其中一个径迹峰为 ^{238}U 弹丸峰, 径迹直径约为 $8.5\text{—}9.5\mu\text{m}$, 另两个径迹峰为反应产物峰, 径迹直径约为 $0.5\text{—}8.5\mu\text{m}$ 。 ^{238}U 和反应产物径迹峰的位置, 随在 CR-39 叠层中距离的增加而稍有增大。将各径迹峰积分, 分别得到 ^{238}U 离子注量和反应产物注量。

将 ^{238}U 离子注量随穿入 CR-39 叠中的距离变化作图 (图 3), 可以看出 ^{238}U 离子注量随穿入叠中距离的增加呈指数减少, 距离从 6.2cm 开始, ^{238}U 注量陡然下降, 由作图法得出 960A MeV ^{238}U 离子在 CR-39 叠中的最大射程为 6.8cm, 为了核对这一数据, 对 ^{238}U 离子在 CR-39 叠中的射程进行了计算。

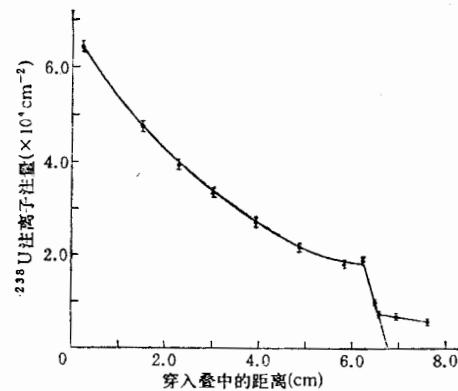
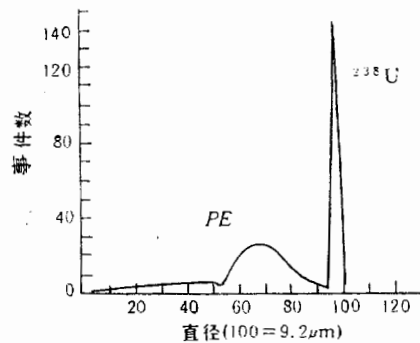


图 2 ^{238}U 和反应产物在 CR-39 中的直径分布 图 3 ^{238}U 离子注量随穿入 CR-39 叠中距离的变化
带电粒子在物质中的射程^[4,5]

$$R(\beta) = MZ^{-2}[\lambda(\beta) + B_z(\beta)],$$

式中 M ——粒子的质量(以质子质量为单位);

Z ——粒子的电荷(以质子电荷为单位);

$\lambda(\beta)$ ——速度为 β 的理想质子射程;

$B_z(\beta)$ ——射程的伸长。

理想射程 $\lambda(\beta)$ 的对数

$$\ln \lambda(\beta) = \ln(A/Z) + \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M a_{nm} (\ln I_{adj})^m (\ln \tau)^n,$$

射程伸长

$$B_z(\beta) = (31.8 + 3.86I^{5/8})(A/Z)10^{-6}Z^{8/3}C_z(137\beta/Z),$$

式中 $\beta^2 = 1 - [1 + (E/931.14A)]^{-2}$;

$$C_z(\chi) = -0.00185 + 0.07355\chi + 0.07172\chi^2 - 0.02723\chi^3;$$

其中 $\chi = 137\beta/Z$ 。

用上述方程式计算 960A MeV ^{238}U 离子在 CR-39 叠层中的射程。已知 CR-39 实验式为 $\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_{17}$, 式量为 274, 密度为 1.32g/cm^3 , $\tau = 960\text{A MeV}$; $I_{adj} = 70.18\text{eV}$; a_{nm} 见文献[5]。计算得到的射程 $R(\beta) = 6.89\text{cm}$, 和实验值 6.8cm 很接近。

2. 图 3 所示的 ^{238}U 注量随穿入 CR-39 叠距离的指数变化, 可用以下方程式表示:

$$\rho_{UX} = \rho_{U0} e^{-\frac{x}{\lambda}},$$

式中 ρ_{UX} —— ^{238}U 随穿入叠中距离(x)而变化的注量;

ρ_{U0} ——入射的 ^{238}U 离子注量;

x ——穿入 CR-39 叠中的距离;

λ ——电荷变化的 mfp。

用最小二乘法计算图 4 中直线的截距和斜率, 得到 $\rho_{U0} = (6.69 \pm 0.21) \times 10^4\text{cm}^{-2}$; $\lambda = 4.33 \pm 0.13\text{cm}$ 。已知截面 $\sigma = 1/\lambda N$, 单位体积中的靶核数 $N = 1.07 \times 10^{23}\text{cm}^{-3}$, 由此计算出电荷变化截面为 $2160 \pm 65\text{mb}$ 。

叠
为
[射

后
基
本
所
径
表、

目的

J 弹
直径
反应
分别

子注
图法
对

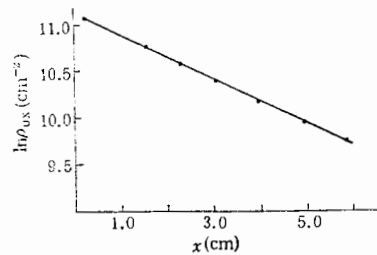


图4 ^{238}U 注量的对数随穿入 CR-39 叠中距离的变化

根据 Bradt-Peters^[6] 方程式, 平均自由程

$$\lambda' = \frac{1}{N} \left[\frac{1}{n_C \sigma_C + n_H \sigma_H + n_O \sigma_O} \right],$$

式中 $\sigma_C = \pi \gamma_0^2 (A_p^{1/3} + A_C^{1/3} - \delta_r)^2$;

$\sigma_H = \pi \gamma_0^2 (A_p^{1/3} + A_H^{1/3} - \delta_r)^2$;

$\sigma_O = \pi \gamma_0^2 (A_p^{1/3} + A_O^{1/3} - \delta_r)^2$,

A_p —— ^{238}U 的质量数;

A_H 、 A_C 、 A_O 分别为 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{16}O 的质量数;

n_H 、 n_C 、 n_O 分别为 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{16}O 的摩尔分数;

$\gamma_0 = 1.35 \times 10^{-13} \text{cm}$; $\delta_r = 0.83$ ^[7].

计算得到 $\lambda' = 3.23 \text{cm}$;

$$\sigma = 2890 \text{mb.}$$

用 Tincknell 等人^[8] 由重离子弹丸实验数据所得的经验式计算平均自由程

$$\lambda_Z = \Lambda Z^{-b},$$

式中 $\Lambda = 52.25$, 为刻度的平均自由程;

$$b = 0.58.$$

计算得到 $\lambda_Z = 3.79 \text{cm}$;

$$\sigma = 2470 \text{mb.}$$

实验得到的平均自由程和截面值与用 Tincknell 的经验式计算的结果较接近, 但和 Bradt-Peters 公式计算结果相差较大, 其原因是由于 Bradt-Peters 公式计算的是总截面, 总截面是电荷变化截面与非电荷变化截面之和, 而实验测定的是电荷变化截面, 所以比计算值低。

3. 图 5 给出反应产物注量随穿入 CR-39 叠中距离的变化, 可以看出, 反应产物的注量随距离而增加, 当达到 ^{238}U 弹丸射程时, 注量增加缓慢, 然后减少。

相对论性 ^{238}U 离子和 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{16}O 核相互作用发生碎裂反应, 作用后, 一个 ^{238}U 弹丸产生反应产物的平均多重数

$$\bar{\nu} = \frac{\rho_{\text{FPX}}}{\rho_{\text{UO}} - \rho_{\text{UX}}},$$

式中 ρ_{FPX} ——随 CR-39 叠中距离变化的反应产物注量。

ρ_{FPX} 和 $(\rho_{\text{UO}} - \rho_{\text{UX}})$ 呈直线关系, 用最小二乘法计算直线斜率, 得出 $\bar{\nu} = 2.03 \pm 0.16$ 。因

此是峰随度产

的丸

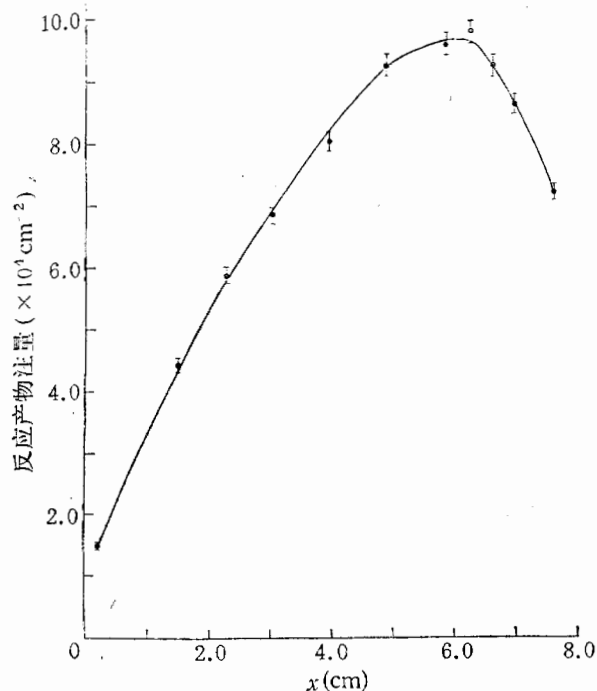
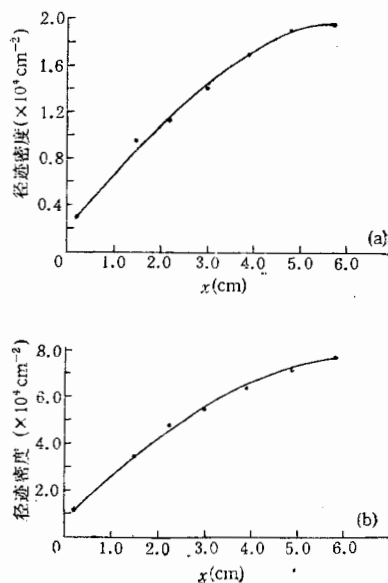


图 5 反应产物注量随穿入 CR-39 叠中距离的变化

图 6 反应产物峰的径迹密度随穿入 CR-39 叠中距离的变化
(a) 轻峰 (b) 重峰

此, 960A MeV ^{238}U 弹丸和 C、H、O 核的碎裂反应中, 主要分成两块, 即主要作用形式是二裂变反应。

由图 2 可以看出, 反应产物由两个峰形不对称的峰(轻峰和重峰)组成, 分别将这两个峰的径迹密度随 CR-39 叠中距离的变化作图(见图 6, (a)、(b)), 可以看出, 径迹密度随 CR-39 叠层中的距离而增加, 靠近 ^{238}U 弹丸射程时, 增加缓慢。轻峰或重峰的径迹密度与反应产物总径迹密度之比不随 CR-39 叠层中的距离而变化。轻峰径迹密度占反应产物总径迹密度的 20%, 重峰占 80%。

四、结 论

1. 960A MeV ^{238}U 离子在 CR-39 探测器中的射程为 6.8cm。
2. 相对论重离子 ^{238}U 的注量随穿入 CR-39 叠中的距离呈指数减少。960A MeV ^{238}U 的电荷变化平均自由程为 $4.33 \pm 0.13\text{cm}$, 电荷变化截面为 $2160 \pm 65\text{mb}$ 。
3. 960A MeV ^{238}U 弹丸和轻核碎裂反应的平均多重数 $\bar{\nu} = 2.03 \pm 0.16$, 说明 ^{238}U 弹丸和 C、H、O 核相互作用主要是二裂变形式。

样品照射由 Dr. Jamil 等人完成, 作者在此向他们表示感谢。

参 考 文 献

- [1] S. P. Ahlen et al., *Science*, **217**(1982), 1139.
 [2] K. Jamil et al., *Nucl. Instr. Meth.* to be published.
 [3] M. H. Salamon et al., *Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res.*, **B6**(1985), 504.
 [4] E. V. Benton U. S. Naval Radiological Defence Laboratory TR-68-14 (1968).
 [5] W. H. Barkas et al., National Academy of Science-National Research Council Publication-1133, 103 (1964).
 [6] H. L. Bradt et al., *Phys. Rev.*, **77**(1950), 54.
 [7] G. D. Westfall et al., *Phys. Rev.*, **C19**(1979), 1309.
 [8] M. L. Tincknell et al., *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983), 1948.

STUDY ON THE INTERACTION OF 960A MeV ^{238}U IONS WITH LIGHT NUCLEI

CUI HUANHUA KE WEI ZHOU JIAN

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica Beijing*)

LU WEICHUN

(*Tsinghua University, Beijing*)

R. BRANDT

(*Philipps Universitat, W. Germany*)

ABSTRACT

A CR-39 track detector was used both as a target and a detector to study the interaction of 960 A MeV ^{238}U ions with light nuclei (^1H , ^{12}C , ^{16}O). The range mean free path and cross section of 960 A MeV ^{238}U ions in CR-39 have been found to be 6.8 cm, 4.33 cm and 2160 mb respectively. The average multiplicity due to fragmentation of ^{238}U projectiles with light nuclei has been found to be 2.03. It is shown that the most common mode of interaction is binary fission. The reaction products consist of two track peaks according to track diameter distribution. The ratio of track density of each peak to track density of reaction products comes out to be 20% and 80% respectively.