

第四届全国
固体核径迹探测会议
论文集

1990. 11. 7—10 上海



中国原子能科学研究院
核技术应用所

目 录

序号	题 目
1	相对论核反应产生的快中子能量和通量的固体径迹测定
2	核径迹的内径及其内部重孔几率的统计特性
3	核径迹重孔几率的理论计算及蒙特卡罗法模拟
4	核孔膜测定溶液浓度的原理、实验及应用前景
5	裂变径迹大面积铀矿普查实施和效果
6	核孔膜测定液体粘滞系数的各种方法
7	Makrofol核孔膜血球硬度仪
8	固体气泡损伤探测器研制
9	3380MeV $^{238}\text{U} + ^{238}\text{U}$ 产生三、四、五碎片继发裂变截面测量

用固体径迹法测定相对比重离子核反应产生
的中子的能量和通量

郭士伦 郝秀红 王玉兰 沈冠仁

(中国原子能科学研究院)

R. Brandt, P. Vater, M. Heck, H. Barth, G. Hasse

(Kernchemie, University of Marburg
Germany)

摘 要

论

相对比重离子核反应中释放大量快中子是不久前注意到并受到重视的现象。为了研究此类中子的能量、数目和释放机制，以及确定其对实验人员可能造成的危险，我们在杜布纳联合所的同步回旋加速器上用 CR-39 探测片测量了 $4.4 \text{ GeV}^{12}\text{C} + \text{Cu}$ (厚靶) 反应中产生的中子能量和通量，并研究了用 CR-39 测定快中子平均能量和通量的方法。测量表明：反应中放出的中子的平均能量为 $15.8 \pm 2.8 \text{ MeV}$ ，当入射重离子数目为 6×10^{11} 时，与 ^{12}C 束成 $\sim 70^\circ$ 方向，距靶 $\sim 60 \text{ cm}$ 处的快中子积分通量为

$(4.5 \pm 0.3) \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 。这一方法可进一步用来测定反应中放出的中子的角分布，每个入射重离子可产生的平均中子数及每次核反应释放的中子平均数目。

一、引言

在相对^重离子核反应中，偶然发现了实验场所出现大量快中子^[1]。它们可能对实验人员造成不可忽视的辐射危险，也可能提供相对比重离子核反应机制的一些信息。研究此类中子的能量和产额是有意义的。为此，我们在杜布纳的同步回旋加速器上，用靶物质布置CR-39远层的方法测量了44 GeV¹²C+Cu(厚2.1cm)反应中产生的中子的平均能量和通量。本文介绍这一方法和主要测量结果。

二、探测器照射

靶物质用直径为8 cm总厚度为2.1 cm的Cu块组成。束流是总数为 6×10^{11} 的44 GeV的¹²C。CR-39片紧贴组成，外面用厚为1 mm的纯净Al片盖(图1)。Al片的作用在于不便快中子在空气中产生的重带电粒子入射到CR-39表面。远层放在距靶 $\sim 60 \text{ cm}$ ，

与束流方向成 $\sim 70^\circ$ 角外，表面与 70° 角方向垂直。

三、CR-39 中径迹的特征

CR-39 探测片受反应中产生的中子照射后，在 70°C 、 6.5N NaOH 中蚀刻3至16小时，同种批号的未经中子照射的CR-39本底片也在上述蚀刻液中同时蚀刻。图(2)是受照射的CR-39片(左)和本底CR-39片(右)上的径迹的显微照片。图二表明照射过的CR-39片中产生了大量径迹，而未照的本底片上几乎无径迹。用光学显微镜测量了选层中第一个(最接近Cu靶)CR-39片的前后两表面的径迹密度，结果如图三。可得出如下径迹特征：

(1)在蚀刻的第一阶段，前表面的径迹密度随蚀刻时间的增长而线性增加，在第二阶段增加越来越慢；在第三阶段保持不变。当曲线外推到蚀刻时间为零时，密度也为“零”。

(2)在蚀刻的第一阶段，后表面的径迹密度随蚀刻时间的变化与前表面有相同的斜率。曲线外推到“零”蚀刻时间时径迹密度不为“零”而有“正值”。

根据以上特征，可得到有关径迹成因、中子能量和中子积分通量(注量)的信息。^[2]

四、径迹成因的定性分析

由上特征可得如下结论：CR-39中径迹是由快中子与CR-39中的原子核相互作用产生的重带电粒子造成的。理由如下：(1)第一阶段的线性增加意味着径迹均匀分布于CR-39中，如图四。(2)当蚀刻6~8小时后，CR-39的表面被腐蚀掉6~8 μm ，原先出现的径迹变成浅坑而观察不到，这说明大部分径迹很短，它们一定是由低能重带电粒子形成的。(3)前表面的零截距说明产生径迹的粒子在最大能量时也能在CR-39中产生径迹，这也就表明产生径迹粒子能量不高。(4)在后表面，“正”截距说明，产生径迹的重带电粒子是向前飞行的（背向Cu靶），其中某些粒子穿出后表面并在后表面中形成径迹。向前飞的粒子不会在前表面造成径迹，因此前表面的曲线有“零”截距。

上述产生径迹的粒子是均匀分布、向前飞行，低能量和短射程的粒子，其只能是快中子与CR-39组成元素C、H、O 散射产生的反冲核和核反应产生的重带电粒子。

CR-39的取向指出，产生这些反冲核和重带电粒子的中子是从靶上沿 70° 角方向飞来的。因此CR-39上径迹特征确实说明 $4.4\text{GeV}^{12}\text{C}+\text{Cu}$ （厚靶）核反应中确实产生了快中子。

五、体径迹密度和径迹投影长度

从径迹的均匀分布可计算体径迹密度 D_v

$$D_v = \frac{1}{V_B} \frac{dn}{dt} \dots \dots \dots (1)$$

n 为 CR-39 表面的径迹密度, t 为蚀刻时间, $\frac{dn}{dt}$ 是曲线 (第一阶段) 的斜率。 V_B 是 CR-39 的总体蚀刻速度 ($1.083 \mu\text{m}/\text{hr}$)。

单位质量中径迹数目 (质量径迹密度) D_m 为:

$$D_m = \frac{1}{V_B} \frac{dn}{dt} \dots \dots \dots (2) \quad \text{其中 } \rho \text{ 为 CR-39 的密度}$$

($1.32 \text{ g}/\text{cm}^3$)。

由于重带电粒子向前飞行, 可用下式计算径迹在快中子飞行方向的平均投影长度 P :

$$P = n_{b0} V_B \left(\frac{dn}{dt} \right)^{-1} \dots \dots \dots (3)$$

n_{b0} 为后表面径迹密度曲线在纵轴上的截距。测量结果为:

$$D_v = (5.15 \pm 0.26) \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

$$D_m = (3.90 \pm 0.20) \times 10^3 \text{ 克}^{-1}$$

$$P = 2.58 \pm 0.34 \text{ Hm}$$

六、快中子能量的刻度

据 CR-39 中径迹的反冲性质可导致如下假设：在中子飞行方向上径迹的平均投影长度与中子能量成正比： $\frac{P}{P_s} = \sqrt{E/E_s} \dots (4)$

S 表示已知能量的当标准用的中子。

为了刻度反应中出射的中子能量，用 $T(d, n)^4\text{He}$ 产生的中子作标准中子对 CR-39 进行类似的照射。实验在本院 (CIAE) 高压倍加器上进行。氘核能量为 400 KeV。批号相同的 CR-39 选层放置在距 T 靶 25 cm、与氘束成 135° 方向上照射。此角度出射中子的能量为 13.3 MeV。与前同样蚀刻后，测出前后表面的径迹密度对蚀刻时间的曲线 (图五)。同上计算与 13.3 MeV 中子对应的 D_v 、 D_m 、 D_s ：

$$D_v = (10.15 \pm 0.53) \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$$

$$D_m = (7.69 \pm 0.40) \times 10^3 \text{ 克}^{-1}$$

$$D_s = 2.17 \pm 0.15 \text{ Hm}$$

由此可得 $E = 15.8 \pm 2.8 \text{ MeV}$

这是 $44 \text{ GeV}^{12}\text{C} + \text{Cu}$ (厚靶) 反应中在约 70° 角方向出射的中子平均能量。其误差包括 P 、 P_s 的测量误差 (分别为 3.0%)

和 6.8%), 以及两次照射中 CR-39 定向不准可能造成的误差 (任意给定为 1%) 。我们忽略了快中子产生的少量向后飞行重带电粒子对量 P (P_s) 造成的影响。

七、中子通量测定

在 CR-39 中的 D_m 与入射到 CR-39 片上的快中子积分通量 φ_n 及 CR-39 中 C、H 和 O 核的截面有关。具体关系如下式:

$$\varphi_n = \frac{D_m}{\sum_i N_i \sigma_i} \quad (i=C, H, O) \dots \dots (5)$$

N_i 为单位质量 CR-39 中 C、H、O 核原子数目, σ_i 为中子与 C、H、O 核相互作用产生向前飞行的重带电粒子的平均截面。

ϵ_i 为 CR-39 对反冲 C、H、O 核和核反应产生的重带电粒子的探测效率。

N_i 可由 CR-39 的分子组成 $[C_6H_8O_7]_n$ 和 CR-39 的密度计算出。为计算 φ_n , 我们可用 C、H、O 核对 15.8MeV 快中子的全截面 $[\sigma]$ 代替 σ_i 。原因是: 在快中子引起的每一个反应和散射中, 总有一个反冲靶核或一个反应产物 (少数情况下有 2 3 个) 是向前飞行的, 且能在 CR-39 中产生径迹。 ϵ_i 与向前飞行的粒子的能量和角度有关, 或者说与 CR-39 的探测阈能和临

界角有关。CR-39很灵敏，可近似假定 $i = 1$ 。至此，可计算出 f_n ，结果为： $f_n = (4.5 \pm 0.3) \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 。

其误差只考虑了 D_m 的误差。探测器阈能和临界角对 Q_n 的影响未被考虑。由于约 4 的径迹是由反冲 C 和 O 核造成，它们受阈能和临界角的影响很小，且大部分反冲 H 核处于可记录范围，假定 $i = 1$ 不会对 f_n 数值有很大影响。 f_n 值是可靠的。如考虑进各种因素，则真正的中子平均能量和积分通量将略高于上面给出的值。

八、结 论

杜布纳所和原子能院的实验表明，可用 CR-39 记录快中子并通过对径迹密度和径迹平均投影长度可求出相对比重离子反应中产生的中子的能量和积分通量。由上分析可得出如下结论：

1、在相对论重离子核反应中确实产生大量快中子。在本实验中，入射束流注量为 6×10^{11} ，在距靶 $\sim 60 \text{ cm}$ ，与束成 $\sim 70^\circ$ 方向上中子积分通量为 $(4.5 \pm 0.3) \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 。如注意到 CR-39 与靶的距离是较长的，我们就会想到这一反应中产生的中子数目是很大的。

2、如不信以足够防护，这些快中子会造成辐射危险。发射快中子的现象应在相对论重离子反应机制研究中加以考虑。

3、本实验通过CR—39探测器中使径迹密度和径迹平均投影长度求得求得快中子的平均能量和积分通量。这一方法值得进一步研究。这种方法工作量较少，易取得数据。因CR—39片本身很小，不会对其他实验产生影响。

4、采用这一方法进行角皮测量可以求得中子角分布和中子总产额。用厚靶可以求得每个重离子产生的中子数，用薄靶可求得每次核反应产生的中子数。

5、需要确切研究CR—39记录不同重带电粒子的阈能和临界角，以便较确切地用这一方法测定中子能量和通量。

总

谢

这一工作是根据中国——西德固体径迹探测器研究合作协议进行的。作者对杜布纳联合核子所和中国原子能院加速器运行人员的帮助表示感谢。

参 考 文 献

[1] R.Brandt. 私人通讯

[2] 郭士伦、用塑料径迹探测器直接测量快中子的初步探讨，射线物理测量方法专业会议资料汇编，原子能出版社，

1975, PP. 130—139

[3] D.I.Garbr and R.R.Kinfey, Neutron Cross

Sections. BNL 325, Third Edition, Vol. 4

1976.

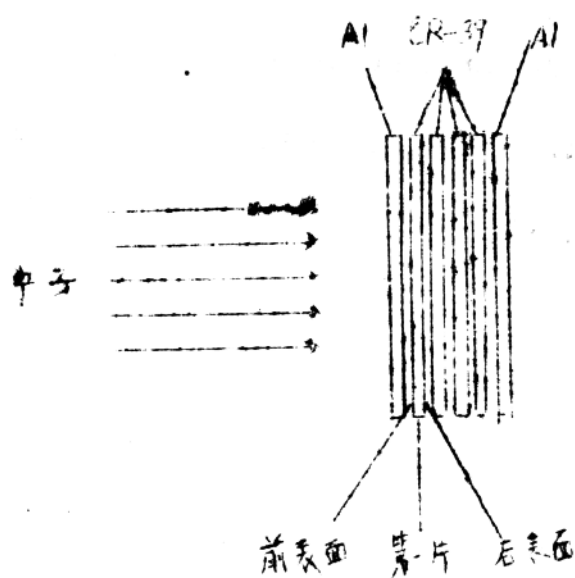


图 1、CR-39 多层探测器的结构

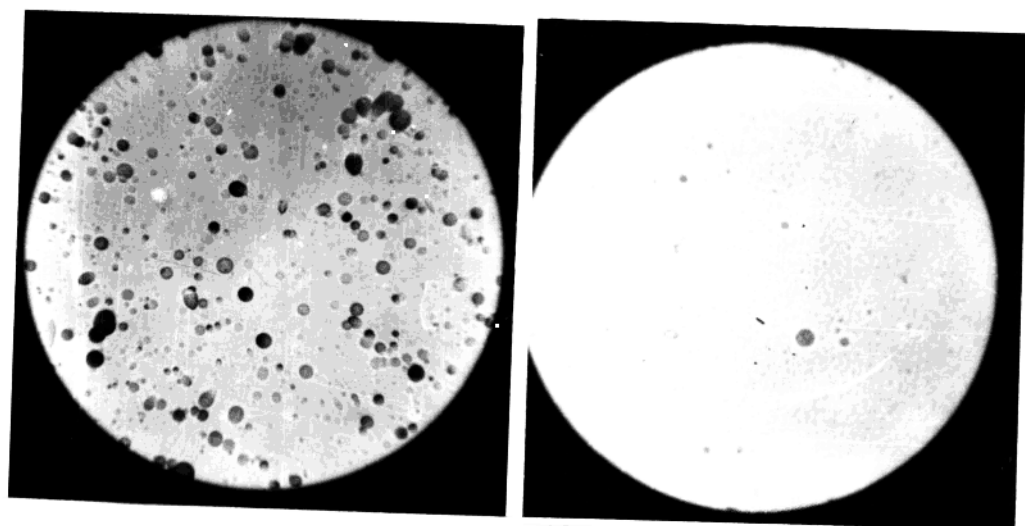


图 2、经杜布纳中子照射(左)和未经中子照射(右)的 CR-39 片上的径迹照片。在 $44\text{GeV}^2 \text{ C}+\text{Cu}$ (厚靶) 产生的中子照射过的 CR-39 (左), 产生了大量径迹, 而未照射的 CR-39 中, 几乎没有径迹。

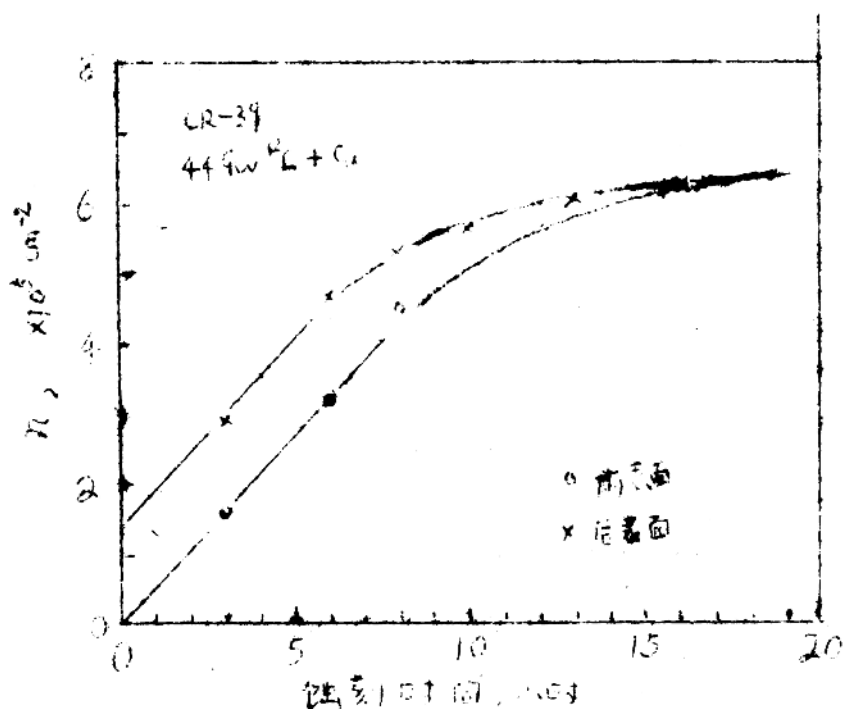


图3、第一片CR-39前、后表面径迹密度与蚀刻时间的关系，44GeV¹²e+Cu(厚靶)核反应产生的中子在CR-39中产生反冲核和核反应产物，它们在CR-39中形成径迹。径迹密度的变化可分为三个阶段：

蚀刻的第一阶段：0—6小时，

蚀刻的第二阶段：6—16小时，

蚀刻的第三阶段：16小时以上。

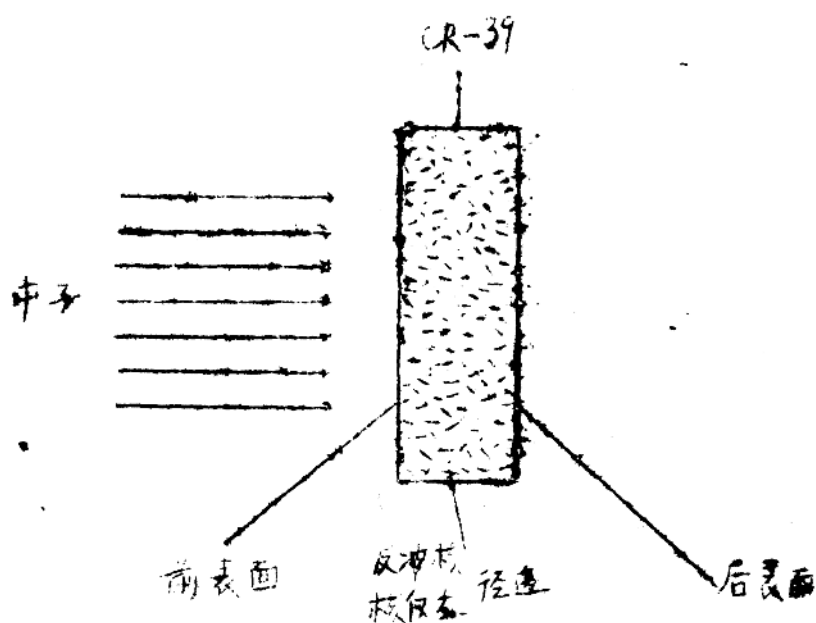


图4、CR-39中径迹的分布和取向特性。由于生成径迹的带电粒子是在CR-39中产生的，它们在CR-39中的分布是均匀的，都沿入射中子方向取向，因此，有些生成径迹的带电粒子穿越后表面，在后表面产生径迹。

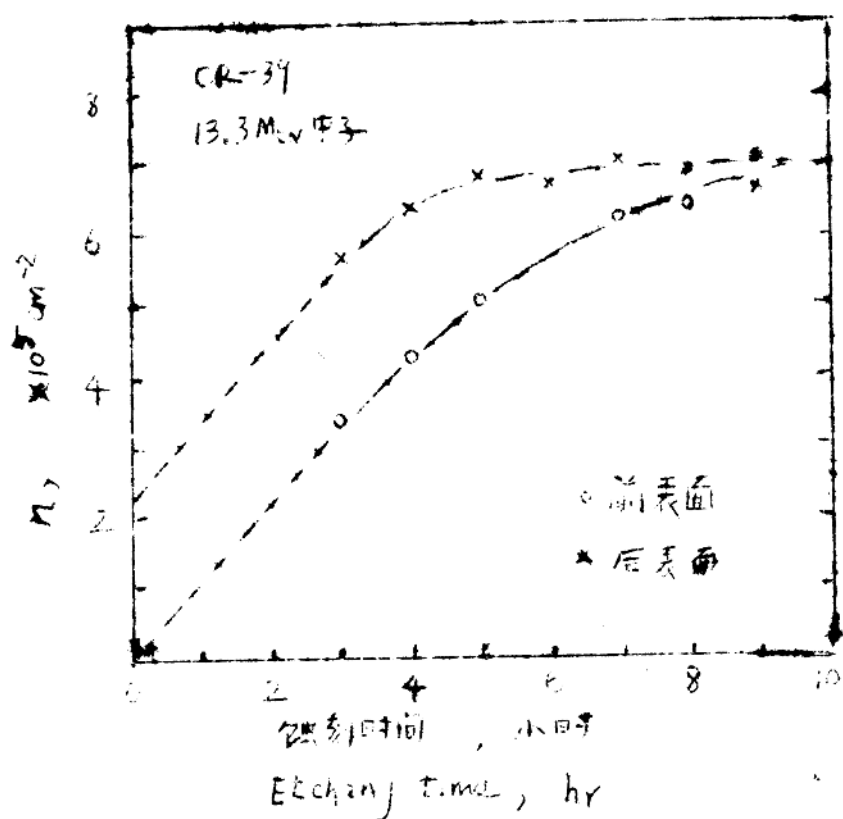


图 5、13.3 MeV 快中子在 CR-39 中产生径迹的蚀刻曲线:

CR-39 前、后表面径迹密度与蚀刻时间的关系:

蚀刻的第一阶段: 0—3 小时,

蚀刻的第二阶段: 3—9 小时,

蚀刻的第三阶段: 9 小时以上。