

固体核径迹探测器的发现和发展

— 朱 天 成 —

1. 晶体中的裂片径迹

1958年,英国哈威尔原子能科学研究中心化学部的D.A. 杨博士用中子诱发的 $U-235$ 裂变碎片辐照氯化锂,研究晶体的热力学潜能和晶格损伤,发现在裂片入射晶面的损伤区域有潜能增加和晶格位移现象。他用氢氟酸、冰醋酸和氯化铁饱和溶液蚀刻氯化锂,然后在一般光学显微镜下观察晶面的变化,发现裂片路径损伤区域随蚀刻时间增加而不断扩大,并拍摄下裂片径迹的显微照片。大家知道,在云室和核乳胶探测器中曾观测过裂片径迹,但在晶体中发现裂片径迹还属第一次。1959年,西尔克和巴尼斯也在哈威尔用初始能量为100 MeV的中子诱发裂片辐照白云母片,旨在研究晶体中辐照诱发的原子位移效应。他们不经过任何化学处理直接在电子显微镜下观察白云母片,发现晶格损伤区域的直径小于 300 \AA ,长度大于 $4 \mu\text{m}$ 。这种损伤区域极不稳定,能在短时间内迅速消失。西尔克等在一篇题为“用电子显微镜观测裂变径迹”的论文中,详细叙述了裂片径迹的性质,并正确指出:“电子显微镜观测裂片径迹技术,不仅有助于我们了解快速运动粒子在固体中产生的原子位移现象,而且能获得关于粒子本身能量损失率、性质和行为的信息。”可惜,西尔克和巴尼斯的话当时没有引起人们的注意。但是,一种新型的核探测器——固体核径迹探测器已在孕育中。

显然,固体核径迹探测器的发现具有一定的偶然性。饶有趣味的是,这个发现并不是在致力于核辐射探测器研究的实验室,而是在悉心从事固体物理研究

的实验室中获得的。一切偶然性都有自己特定的原因和条件。看来有两种情况促成了这个发现:一是物理学家和化学家们在五十年代已广泛开展研究辐照引起的晶格位移效应;二是电子显微镜技术的发展。在光学显微镜下不可能直接观察到辐射损伤的痕迹。

西尔克等人的开创性工作是有价值的。1981年,他们作为先驱者参加了在英国召开的第11届国际固体核径迹探测器会议,会见了与会代表们。

2. 化学蚀刻

1962年,普赖斯和沃尔克读了西尔克等人的文章,引起这两位美国核物理学家强烈的兴趣。他们继续深入研究,终于在合成云母中首先观察到稳定的裂变碎片径迹,并很快采取化学蚀刻这一关键性步骤。化学处理过程溶解掉了辐射损伤区域(或称潜伏径迹)内被电离的物质,从而使潜伏径迹沿径向扩大数千倍,成为在光学显微镜下可观察到的径迹,即可见径迹。尔后,普赖斯等人用实验方法发现了大量的能够记录原子核径迹的各种各样的固体材料,其中不仅包括各类晶体,还有常见的玻璃和高分子聚合物。例如白云母、金云母、石英、辉石、锆石、榍石、磷灰石、橄榄石、硅酸盐玻璃、磷酸盐玻璃、硝酸纤维素、醋酸纤维素、聚碳酸酯、聚酯以及后来发现的CR-39塑料等,这些能够记录核径迹的灵敏物质,通称固体核径迹探测器。普赖斯等人发现,当重带电粒子或离子射入固体核径迹探测器时,在其内部产生狭窄的原子尺度的剧烈电离损伤区域,直径大约为 $30-50 \text{ \AA}$ 。选择适当的化学蚀剂处理探测器,能使损伤区域扩大到微米量级。化学蚀

刻首先迅速蚀去受过损伤的介质，但不会迅速蚀去粒子通道周围未受损伤的基体，从而形成凹坑或孔洞，一般称做蚀刻径迹。常用的蚀剂有 HF、HCL、H₂SO₄、NaOH、KOH 等。他们的实验还发现，固体核径迹探测器必须是电绝缘介质，以便能够记录或贮存电离损伤。例如上面提到的硅酸盐矿石、绝缘玻璃和高分子聚合物的电阻率范围是 10⁶—10²⁰ Ω·cm，它们都是良绝缘体。少数半导体化合物(例如 V₂O₅ 玻璃，其电阻率下限值为 2000 Ω·cm)也能记录核径迹。但金属材料的电阻率太低，范围在 10⁻⁶—10⁻⁴ Ω·cm 量级，其原子电离后重新中性的时间极短，不能贮存电离损伤。所以，固体核径迹探测器的最低电阻率限值为 2000 Ω·cm。电阻率低于这一限值的任何固体物质不能形成可蚀刻径迹。因此，固体核径迹探测器有时又叫做绝缘核径迹探测器。虽然各种带电粒子都会在探测器材料产生辐射损伤，但有的损伤区域能够蚀刻出径迹，有的则不能蚀刻出径迹，只有辐射损伤足够剧烈，辐射损伤密度大于某一数值时，粒子径迹才能用化学蚀刻方法显示出来。也就是说，固体径迹探测器是一种能鉴别粒子种类和运动速度的探测器。

3. 核径迹形成的理论模型与实验

后来，普赖斯、弗伦德尔和沃尔克根据他们的实验和计算，提出一个核径迹形成的理论模型。该理论认为：(1) 大部分绝缘固体都具备记录和贮存核径迹的能力，每种物质各具有其记录核辐射的响应特性；(2) 核辐射潜伏径迹能够通过化学蚀刻而被扩大，可以在一般光学显微镜下观测。这一理论为固体核径迹探测器的发展奠定了基础。在固体核径迹探测器发展的初期，只限于用它们测量重带电粒子的数目，或对粒子进行粗略的鉴别。人们非常希望固体核

表 1 几种主要探测器材料的记录阈值

探测器材料	dE/dx , MeV/mg/cm ²	可探测的最轻粒子
硝酸纤维素	1.1	H
醋酸纤维素	2.0	He
聚碳酸酯	3.3	He
聚酯	4.5	C
聚芳基酯	4.5	C
聚酰亚胺酯	5.0	O
氟塑料	11	Ne
云母	11	Ne

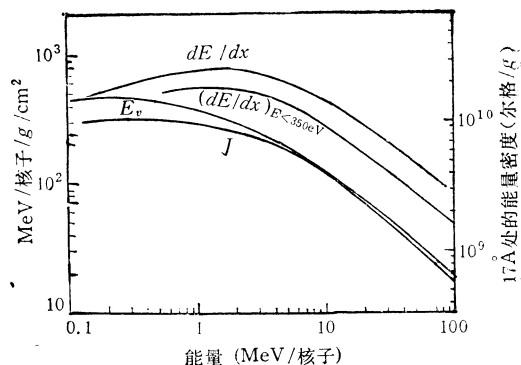


图 1 ⁵⁶Fe 原子核入射到 Lexan 型聚碳酸酯内，各种辐射损伤量同粒子能量的函数关系

径迹探测器也能象核乳胶那样，能有效地鉴别入射粒子的电荷和能量。1967 年，普赖斯等人发现，沿粒子

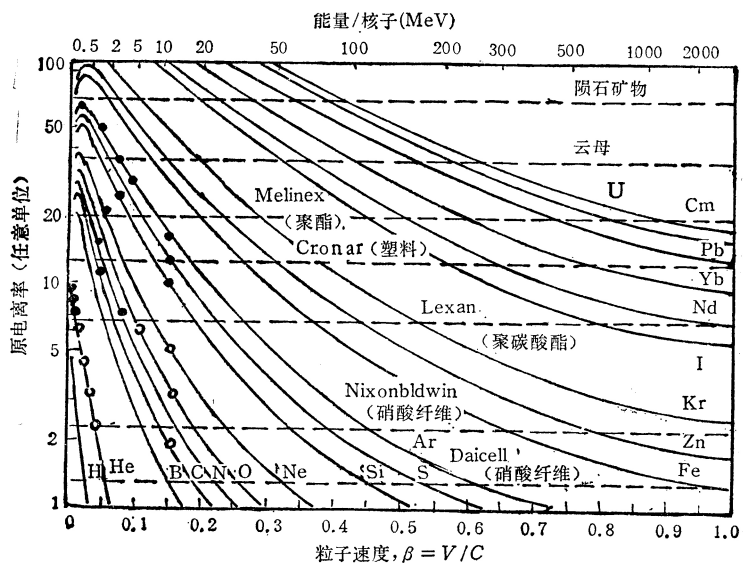


图 2 各种带电粒子的电离损伤能力与其速度的关系。实验点为用聚碳酸酯在加速器离子束上做的实验结果：黑点表示 100% 记录到，圆圈点表示没有记录到。

入射方向的径迹蚀刻率随入射粒子的电离损伤密度改变。这一研究成果把径迹蚀刻率同入射粒子的参数——电荷和能量联系起来。也就是说，在运动的带电粒子路径周围的微观区域内，径迹记录固体的分子结构及其化学反应性，都与入射粒子的电荷和速度有关。根据早期的一些实验数据，普赖斯等人提出 dE/dx 判据来说明固体中核径迹的形成。此判据认为，如果带电粒子 A 在单位路径上损失的能量能使某种固体介质记录下来，那么在单位路径上损失同样多或更多能量的带电粒子 B，将同样地能被该种固体所记录。对每种记录物质都有一定的可探测最小粒子质量，质量小于此限值的任何带电粒子都不会在这种物质中形

或明晰的径迹。因此，我们可以把每种探测器材料的 dE/dx 限值，看做是它们的探测“阈”值或记录“阈”(见表 1)。固体径迹探测器的“阈”值，是一个早期概念。因为粒子在固体中产生的辐射损伤的程度决定着粒子是否能被探测到，而辐射损伤的过程乃是具有统计性质的，即使说它有阈，这个阈也是没有截然的定值的。而且后来证明， dE/dx 判据并不是一个在理论上完善的，在实验上令人满意的判据。一个明显违背 dE/dx 判据的事实是关于 Fe 原子核的预言。按照 dE/dx 判据，运动速度接近光速的高能 Fe 原子核应当在硝酸纤维素探测器中留下可蚀刻径迹，但实验上却观察不到。很难解释 dE/dx 判据失败的原因。或许，与晶体和玻璃中的电离不同，带电粒子在聚合物中诱发出高能 δ 电子射线对径迹形成更为重要，这些 δ 电子会在半径为 30—50 Å 的针状损伤区周围留下它们大部分能量，而高能 Fe 原子核不能诱发出这种 δ 电子。后来，弗仑谢尔和普赖斯等人修改了 dE/dx 判据，提出原电离-激发判据，本顿和汉克提出总能量-限定能量损失率 (REL) 判据，卡茨提出能量密度判据等，把与辐射损伤有关的量 J 、 dE/dx 、 $(dE/dx)_{E < E_0}$ 、 E_0 同入射粒子的参量——电荷 Z 和能量 E 建立了函数关系(见图 1)。这些核径迹形成机制模型，概括描述了带电粒子损失能量的方式以及有机和无机绝缘固体中原子核径迹的成因。弗仑谢尔等还根据原电离-激发判据，计算了各种带电粒子的原电离率同其电荷、质量和能量的关系，以及某些探测器阈值的位置(见图 2)。每一种探测器都具有一个最低可探测下限(图 2 中虚线)。到了六十年代末和七十年代初，在解决了实验上遇到的一系列问题(例如用能量和电荷已知的加速器离子束刻度探测器等)之后，在实验上相继出现几种鉴别粒子能量和电荷的方法，其中包括测量径迹蚀刻率的 v_T - T 法，测量剩余射程长度的 LR 作图法，测量径迹直径的形状轮廓法，以及最大可蚀刻径迹长度法等，为粒子鉴别研究奠定了理论和实验基础(见图 3)。理论上揭示了，鉴别粒子的响应函数的变量用粒子的有效电荷数与粒子的速度之比，更能反应实际情况。至

(阈值、灵敏度、临界角或厚度、环境效应等)、粒子鉴别方法，以及径迹数目和参数自动测量技术，都进行了深入细致的研究。这些研究表明，固体核径迹探测器具有许多独特的优点，是其它核探测器无法比拟的。首先，这种新型探测器可采用的材料种类非常多，已经实验和使用过的天然和人工合成材料达百余种，它们的记录粒子的响应函数各不相同。如此众多种类的探测器，使它们具有鉴别轻粒子、探测重粒子的非凡能力，可以在强 γ 、 β 、 α 和中子场内无妨碍地直接观察核反应、测量反应产物的方向和射程，鉴定入射粒子、反应产物的电荷、质量和能量。其次，径迹蚀刻法既简单又实用，不仅能把粒子的潜伏径迹扩大成可见径迹，而且还为其在科学技术和工农业中的广泛应用开辟了道路。第三，固体核径迹探测器内的辐射损伤潜伏径迹非常稳定，在常温下能长期贮存而不消失。有的甚至高温下也不衰退。比如，白云母片中的 U-238 自发裂变碎片径迹，即使在 145°C 下仍可保留 45 亿年，比地球的年龄还要长。因此，固体核径迹探测器可以作为重带电粒子的永久记录器。事实上，各种天然存在的地球、月球矿物和陨石，从它们生成之日起，一直为人类记录着远古以来由内部产生或外部进入的重带电粒子的径迹。它们不知疲倦地、无偿地工作了数万年或数亿年，象嘀嗒嘀嗒运行的时钟一样，计数着宇宙间曾经存在过的、其中或许还有至今人类尚未认识的大量重带电粒子衰变径迹，记录着天外来客的行踪。从这样的“径迹库”中，可以挖掘出宝贵的关于地球、月球和其它天体起源和演化的资料，成为人类窥视还未认识的自然领域或事件的一个难得的窗口。

1975—1985 年间，已先后开过 13 次专业性国际会议，促进固体核径迹探测技术的发展。目前，固体核径迹探测技术在我国和世界上已经深入到科学技术和国民经济的各个领域，其中包括核物理、粒子物理、天体物理、宇宙射线研究、固体物理、地质学、考古学、地球化学、分析化学、生物学、医学、辐射剂量学、膜分离技术与科学、冶金学、植物学、环境保护和生命科学、反应堆工程、射线照相和平版印刷术、铀矿勘探、地热地下水资源勘探，以及地震预报等。随着现代科学技术的进展，固体核径迹探测技术必将更臻于完善，其应用范围也将日益广泛。

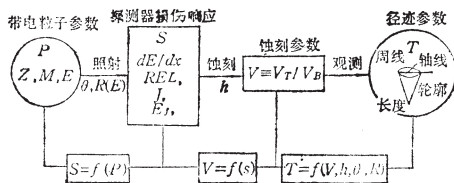


图 3 固体核径迹探测器粒子鉴别原理示意图

此，固体核径迹探测器进入更为成熟的全面发展阶段。

4. 固体核径迹探测器的优点

世界各国对固体核径迹探测器的蚀刻方法、特性