

固体径迹探测器在科学技术中的应用

郭士伦

(中国科学院原子能研究所)

一、引言

固体径迹探测器是六十年代初发展起来的一种原子核径迹探测器,使用的材料是各种绝缘固体如云母、矿物、玻璃和塑料(聚碳酸酯、硝酸纤维、醋酸纤维等),可探测的粒子为各种重带电粒子如质子、 α 粒子、重离子和裂变碎片等。当具有一定能量的重带电粒子射入固体径迹探测器中时,在它们经过的路径上产生直线形辐射损伤径迹,径迹直径约几十埃。当把带有这种辐射损伤径迹的材料放入强酸或强碱溶液中时,重带电粒子径迹由于优先蚀刻作用而被显影和放大。蚀刻前的辐射损伤径迹可用电子显微镜观察,蚀刻后的径迹用光学显微镜就可看到。固体径迹探测器具有如下特性:(1)存在明确固定的阈值,只有重带电粒子在探测器材料中产生的辐射损伤密度大于该探测器材料所固有的阈值时,粒子径迹才能显示出来。各种材料有不同的阈值,因此,固体径迹探测器具有克服较轻粒子本底的能力,可在强大束流的较轻粒子本底下记录所需要的重带电粒子径迹;(2)能测量重带电粒子的电荷、能量和质量。对重原子核电荷分辨率高;(3)在常温下能记录和保存古代(远至几十亿年前)的重带电粒子径迹;(4)可作成任意形状,位置灵敏,处理方便。由于固体径迹探测器具有以上无可比拟的优点,十几年来,在探测器基本性质研究和应用研究方面都取得了很大发展,其中探测器应用研究受到更多的重视,取得的成果更为卓著。本文拟对固体径迹探测器在基础学科研究如原子核物理、基本粒子物理、天体物理、固体物理、地质学、考古学、分析化学、地球化学、辐射剂量学和生物医学以及工业技术方面应用的情况进行介绍。

二、在原子核物理和基本粒子研究中的应用

1. 在裂变物理研究中的应用

固体径迹探测器已广泛用于研究重离子引起的裂变。把重核或中重核靶物质制成薄膜,放在加速器重离子束上进行照射,在一定角度和一定距离处放置固体径迹探测器,记录重离子引起靶核裂变放出的碎片

径迹,或用含有靶物质的固体径迹探测器直接记录裂变碎片径迹,就可实现重离子引起的裂变研究。用固体径迹探测器研究的内容包括裂变截面、激发函数、三裂变、四裂变、裂变碎片角分布和重离子深部非弹性散射等。在这些反应中,由于入射束的强大带电粒子本底,用其他探测器很不适宜,而用固体径迹探测器,则不受入射束的影响。因此,能测量罕见事件,测量过的最小截面为 3×10^{-11} 靶。首次合成104号元素时,就是用固体径迹探测器鉴别其裂变事件的。固体径迹探测器能显示裂变碎片飞行方向,图1是用云母记录的能量为1750兆电子伏的 $U+U$ 产生四裂变的径迹照片,这一事件可能是深部非弹性散射产生的,即 U 核相互作用到一定程度,受到激发,各自裂变成两个碎片^[1]。

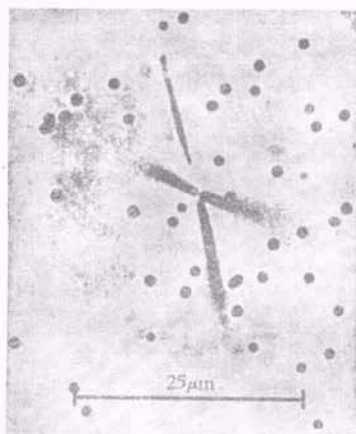


图1 能量为1750兆电子伏的 $U+U$ 产生的四叉径迹照片(由 2π 云母探测器记录)

固体径迹探测器可以用来测量复合核寿命,测量范围从 10^{-18} 秒到 10^{16} 年。其中利用阻塞效应测量复合核反冲距离,可测距离为0.1—1埃;利用电子显微镜观察复合核反冲径迹长度,测量范围为 ≥ 30 埃;利用环形或扇形固体径迹探测器测量复合核反冲距离,测量范围大于十分之几毫米。只要知道入射粒子能量,就可由复合核反冲速度和反冲距离确定复合核寿命。用以上几种方法,测量的时间范围为 10^{-18} 秒至毫秒量级。利用转动或直线运动的固体径迹探测器,可以测定大于毫秒量级的寿命。把固体径迹探测器贴在样品上进行测量(如用贴在铀片上的云母测量 ^{238}U 自发裂

变),测量的寿命可达 10^{16} 年甚至更长。在形状同质异能素裂变研究中,曾广泛采用以上方法测定它们的寿命(从几微微秒至14毫秒)。

2. 用于在自然界中寻找超重元素和借助于

加速器合成超重元素

固体径迹探测器已用来在陨石、月岩、古代玻璃、海底沉积物、富重元素矿物、云母包体中寻找超重元素。又通过气球、卫星和飞船把大面积塑料迭层送上高空,寻找宇宙射线中可能存在的超重核。

用重离子合成超重核被认为是得到超重核最有希望的途径。格罗斯(A. V. Grosse)预言, $Z = 118$ (类氡)是继周期表的下一个惰性气体元素,它的沸点约为 -10°C 。皮策(K. S. Pitzer)猜测, $Z = 112$ 至117或119的元素,尤其是112和114这两个元素,也可能具有类似或较强的挥发性。据此,奥曼(D. C. Aumann)等人设计了用气体反冲运输方法转移和用聚碳酸酯记录超重核自发裂变径迹的装置,这些工作正在进行中^[2]。

3. 低能带电粒子核反应研究

利用固体径迹探测器对较轻的入射粒子不灵敏,而对核反应产物有分辨电荷和能量的能力的这一特点,可以进行低能带电粒子核反应研究。已经研究过的反应是用质子、氘、氚和 ^3He 等核轰击锂至磷等一系列靶核,并用塑料记录核反应产物径迹。测量的物理量有反应截面、激发函数、分支比、角分布和阻塞寿命等^[3]。

4. 寻找磁单极子

1931年,狄喇克(P. A. M. Dirac)提出存在磁单极子的假设。磁单极子的强度为 $g = n(\hbar c/2e)$ 。这一假设与电荷量子化和天体存在磁场是一致的。

如果磁单极子确实存在,当它运动时,必然产生电场,使介质电离。计算指出,磁单极子对物质的辐射损伤密度与 g 有关,与运动速度无关。测定磁单极子径迹上各点沿径迹方向的蚀刻速度,可以分辨磁单极子和重带电粒子,并可确定磁单极子的 g 值。从1965年起,就开始用固体径迹探测器寻找磁单极子,寻找的方法有下列几种:

(1) 在海底铁磁沉积物中或利用高能加速器轰击过的靶片中寻找。这些物质可能捕获了磁单极子。把这些物质放在强磁场中剥离磁单极子并加速,用聚碳酸酯记录它们的径迹。

(2) 在陨石、月岩和地球矿物中寻找。这些矿物作为固体径迹探测器已工作几十亿年了,它们记录了磁单极子径迹的可能性很大。

(3) 把大面积多层塑料迭铺在地面或用气球或卫

星送上天空,记录宇宙间存在的磁单极子。

1975年,普赖斯(P. B. Price)等人报道,他们用固体径迹探测器、核乳胶和契仑柯夫计数器记录到一个磁单极子^[4]。后来虽对这一径迹提出了其他解释,但它引起了科学界对研究和寻找磁单极子的兴趣。在今后寻找磁单极子的工作中,固体径迹探测器仍是主要探测器之一。

三、在天体物理中的应用

天体物理研究最能发挥固体径迹探测器的优点。与固体径迹探测器的发展有关,近来出现了一个新的研究领域,即是利用重宇宙射线原子核携带的信息,解决元素合成和天体演化问题。

1. 宇宙射线起源和恒星演化

利用气球等装置把大面积塑料片、核乳胶及其他探测器送上天,记录重宇宙射线原子核径迹,分析重宇宙射线原子核成分和能谱,与太阳系物质成分和各种元素合成理论模型计算的结果比较,正在用来解决宇宙射线源位于何处及宇宙射线源的物理状态等问题^[5]。测量宇宙射线中寿命适当的放射性核素如

^{10}Be (1.6×10^6 年)、 ^{237}Np (2×10^6 年)、

^{244}Pu (8.2×10^7 年)和 ^{247}Cm (2.5×10^7 年)

等,用以推算宇宙射线年龄或已传播的距离。把塑料片测量的现代宇宙射线成分和能谱与用陨石和月岩测量的古代宇宙射线成分和能谱进行比较,可以求得几千万年(甚至更长时间)内宇宙射线成分和能谱的变化。此外,在宇宙射线中,可能更容易找到超重核。因为宇宙射线从发射源飞到地球附近需要的时间,比太阳系的年龄短得多,寿命较短的超重核可以到达地球附近。

到目前为止,对宇宙射线成分和能谱的研究结果,可初步总结为如下几点:(1)地球大气层上空,宇宙射线核成分与太阳系物质成分大致相同;(2)宇宙射线核能量比太阳粒子能量高得多;(3)在宇宙射线中,在 $Z = 36, 52$ 和 78 处出现峰值,而太阳系物质的峰值在 $Z = 40, 56$ 和 82 处;(4)在宇宙射线中, $Z > 90$ 的原子核有明显丰度;(5)还没有记录到 $Z \approx 100$ 以上的原子核和超重核。由以上初步结果可作出如下判断:重宇宙射线核发源于银河系,最可能是超新星。超新星爆发时,把外层物质冲开,超新星核心部分是胚胎中的高密度中子星,核心之外进行着原子核迅速俘获中子的快过程,宇宙射线是超新星爆发时从这一区域发射出来的。 $Z = 36, 52$ 和 78 出现峰值, $Z > 90$ 丰度明显,与元素合成的快过程一致。

2. 太阳系元素合成与行星演化

利用陨石中已死亡的 ^{244}Pu 自发裂变和 ^{238}U 自发

裂变径迹和其他资料,可以推测太阳系元素合成终了时同位素的原始比值、从元素合成终了到行星凝聚并冷却到可记录径迹之间的时间间隔、行星冷却速度、从能记录径迹到现在的时间(裂变径迹年龄)、陨石母体分裂的时间(宇宙暴露年龄)。利用陨石中宇宙射线径迹密度分布和角分布,可以计算陨石坠入大气层时的熔蚀厚度,还可以有助于把爆裂的陨石恢复原状。

3. 太阳粒子的成分和能谱

利用月球表层几毫米深的岩石或土壤中太阳粒子的径迹,或在太阳色球爆发时,发射带有塑料薄膜的火箭,可以研究太阳粒子的成分和能谱,了解太阳的物质成分和核反应过程。利用这些径迹,还可以求得宇宙尘撞击月球表面产生的侵蚀速度。

由于固体径迹探测器应用于天体物理,已经开始形成新的研究领域。但到目前为止,积累的数据还不多,还不能作出可靠的推测。为了说明天体核反应过程和宇宙射线与星际物质的核反应过程,很多高能核反应需要研究。这些,都需要固体径迹探测器发挥更大作用。

四、在固体物理中的应用

固体径迹探测器是一种位置灵敏探测器,在固体物理中,已用来记录重带电粒子通过单晶体的阻塞图样^[6]。单晶体由规则排列的原子点阵组成,如果重带电粒子在晶格点位置产生,并沿接近晶轴(或晶面)方向发射,重带电粒子将受到晶轴原子(或晶面原子)的卢瑟福散射而离开原来方向,使这一方向探测到的重带电粒子数目减少。这就是轴向(或面向)阻塞效应。如果重带电粒子产生地点不在晶格原子位置,而在距晶轴(或晶面)一定距离处,则阻塞效应减小。根据阻塞效应的减小程度可以确定重带电粒子在晶格中产生的位置。在单晶体中,重带电粒子可有三种产生方法:(1)原子核衰变,如用离子注入技术把 α 放射性原子如 ^{222}Rn 等注入单晶体;(2)原子核反应,由入射粒子与晶格原子产生核反应,放出重带电粒子;(3)卢瑟福散射,加速器产生的重带电粒子如质子、 α 粒子和重离子被晶体原子散射后,可以看成新产生的粒子。通过固体径迹探测器记录的重带电粒子径迹组成的阻塞图样,可以用来确定各种单晶体的晶轴、晶面和晶体结构;研究晶体热力学性质(如测定晶格原子热振动均方振幅);研究晶格缺陷或位错;测定离子注入工艺中掺杂原子在晶格中的位置、深度和浓度分布;测定由离子注入产生的辐射损伤程度等。

五、在地质学和考古学中的应用

固体径迹探测器的发展,为地质学和考古学建立物理

了一种测定地质年代和考古年代的新方法——裂变径迹法。在任何矿物或岩石中,都含有微量铀杂质, ^{238}U 不断以一定速度产生自发裂变,每次裂变在矿物中留下一条连续的辐射损伤径迹,测定矿物中的径迹密度和铀含量,可以计算矿物生成或冷却以来经过的时间(年代或年龄)。古人烧火或制造陶器时,被火加热的矿物中原有的辐射损伤径迹会全部退火和消失,高温过后,矿物中新发生的 ^{238}U 自发裂变继续留下径迹。利用后来记录的自发裂变径迹,可以测定考古年代。裂变径迹法的特点是:(1)测量的年代范围宽,从几年直至几十亿年。其中,从几万年直到几百万年,用其他年代学方法很难得到数据;(2)可采用的矿物种类多(能较易测量年代的矿物有十几种),样品用量小,有时用直径十分之几毫米的几个小颗粒就能得到年代。利用测定地质年代的裂变径迹法,还可研究地质热历史、地层断裂运动、山脉上升速度和大陆漂移等^[7]。

六、其他方面的应用

在分析化学和地球化学中,由于固体径迹探测器的发展,出现了径迹活化分析技术^[8]。用入射粒子在物质中与某种待测成分产生核反应,放出重带电粒子,用固体径迹探测器记录这些粒子的径迹,可以测定某些元素(或同位素)的含量。分析过的元素有U, Th, Pu, B, Li, Pb, Bi, N和O等。测定过的物质有核燃料生产各阶段的产品、海水、超导合金、不锈钢、硼钢、铝合金、塑料、玻璃、陨石、月岩、地球岩石、矿物、洞穴结核、海底沉积物、煤、血、植物叶子、骨骼和脑组织等。最常用的人射粒子是中子和质子,分析最多的是铀。这种方法可以分析各种状态(固体、液体和粉末)的物体,分析灵敏度高,分析水中铀的灵敏度可达 10^{-13} 克/克,分析云母和石英的铀含量,灵敏度可达 10^{-14} 克/克以上。能反映元素的空间分布,空间分辨率可达10微米。在冶金工业上,已用来研究钢中硼的位置对钢性能的影响。

固体径迹探测器在测量中子通量、中子能谱和剂量方面,使用也很广泛。最常用的方法是用固体径迹探测器与 ^6Li , ^{10}B , ^{233}U , ^{237}Np , ^{238}U , ^{232}Th , Bi, Au和Ta等组合,记录 (n, α) 和 (n, f) 反应产生的 α 粒子和裂变碎片径迹,或用中子在聚碳酸酯薄膜中产生的反冲核和 (n, α) 反应的粒子径迹。在反应堆研究中,除测量中子通量和能谱外,还可测量裂变分布、中子温度、快热裂变比等参数。塑料可用来测量铀矿中氢的浓度、氦子体的 α 放射性剂量、宇宙飞行和高空飞机上乘客受到的宇宙射线剂量。

固体径迹探测器应用于铀矿普查是卓有成效的。每隔5米左右挖一个30至40厘米深的小坑,坑底扣一装有塑料片的小杯,用土埋藏15至20天。如果小

坑下方地层中有铀矿体, 铀衰变的子体 ^{222}Rn (气体) 在岩石或土层中扩散, 进入小杯, ^{222}Rn 衰变放出的 α 粒子打在杯中的塑料片上产生径迹。如果塑料片上的径迹数目异常增多, 反映下方有铀矿体存在。这一方法可以感知地表以下 200 至 300 米内的铀矿体, 探测深度比以前采用的 γ 射线测量(探测深度几米)和射气测量(探测深度 20 至 30 米)大得多。

固体径迹探测器已用作射线照相的底片。用塑料片贴在核燃料元件上, 记录 Pu 和 U 放出的 α 粒子径迹 (α 自动射线照相), 可以检查核燃料元件的缺陷、测定燃耗和钚含量。用中子代替 X 光进行照相(中子照相), 用固体径迹探测器记录透射中子强度, 可以在 β , γ 本底很强的情况下分析 X 照相看不到的结构。用固体径迹探测器作中子照相底片, 已对铀燃料棒的结构和浓缩度、含氢物质的结构等进行了测定。

利用固体径迹探测器的径迹是细孔这一特性, 可以制作筛孔过滤器, 筛孔直径大小从 10^{-6} 至 10^{-3} 厘米, 筛孔密度可预先指定, 已用这种过滤器过滤细菌、癌细胞和酵母菌, 滤除酵母菌的啤酒不必冷藏, 可长期保存。用一个径迹作成的单孔过滤器已实现了有如病毒大小和数目的测量。

七、结束语

固体径迹探测器由于具有能克服本底、分辨粒子和记录古代径迹的能力, 因此在许多科学和技术部门得到了广泛应用, 在某些学科, 甚至形成了新的研究领域, 展现出新的发展前景。在解决这些问题的同时, 固体径迹探测器又将会得到进一步的发展。

参考文献

- [1] P. Vater et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **147** (1977), 271.
- [2] D. C. Aumann et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **150** (1978), 233.
- [3] G. Somogyi et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **147** (1977), 287.
- [4] P. B. Price et al., *Phys. Rev. Letters*, **35** (1975), 487.
- [5] W. Enge, *Nucl. Instrum. Methods*, **147** (1977), 211.
- [6] D. S. Gemmell, *Rev. Mod. Phys.*, **46** (1974), 129.
- [7] R. L. Fleischer et al., *Nucl. Tracks in Solids*, University of California Press, 1975.
- [8] R. L. Fleischer et al., *Nucl. Instrum. Methods*, **147** (1977), 1.

介绍 1979 年度诺贝尔物理奖

李小源

(中国科学院理论物理研究所)

段三孚

(美国夏威夷大学物理系; 中国科学院理论物理研究所及北京大学物理系)

一、引言

去年十月, 为了表彰格拉肖 (Glashow)、温伯格 (Weinberg) 和萨拉姆 (Salam) 在阐明基本粒子的相互作用性质, 特别是在发展电磁力和弱力统一理论方面所作的贡献, 授予他们物理学的最高荣誉。虽然本世纪已经诞生了量子力学和相对论, 而许多人公认, 这两种自然界基本相互作用力的统一, 又是本世纪物理学最光辉的成就之一, 是物理学的“最高点”。和麦克斯韦在上一世纪完成的电和磁早期统一一样, 用同一规律来解释电磁力和弱力同样代表着一种进步。

初看起来, 电磁力和弱力之间似乎很少有共同之处。电磁力是我们日常生活中所熟悉的, 它把原子结合

在一起并产生光, 它还产生电能并引起各种普通气体、液体和固体的物理和化学反应。在技术方面, 十九世纪麦克斯韦的电磁统一理论是二十世纪近代电气工业的基础。而另一方面, 对弱力的了解却很少。很长时间以来, 始终只模糊地知道它是一种和 β 放射性衰变有关的现象。原子粒子间的弱相互作用, 是维持太阳燃烧过程的基本部分, 但是, 它对地球的根本作用仍不很清楚。因而, 丝毫不奇怪, 成功地建立弱力和电磁力的联系, 并不会立即有实际(技术上)的应用。但是, 任何使自然界简化的努力都曾导致科学和技术的巨大进步, 麦克斯韦在十九世纪完成的电磁统一, 就推动了二十世纪的技术发展, 因而我们可以大胆地预期, 格拉肖、温伯格和萨拉姆在本世纪实现的电磁作用和弱作用的成功统一, 将推动下一世纪的技术飞跃。