

文章编号: 1007-4627(2006)03-0300-04

# $^{26}\text{Al}$ 的加速器质谱测量及其应用\*

鞠志萍<sup>1,2</sup>, 何明<sup>1</sup>, 李世红<sup>1</sup>, 管永精<sup>1</sup>, 罗里熊<sup>2</sup>, 姜山<sup>1</sup>

(1 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413;

2 广西大学物理学院, 广西南宁 530004)

**摘要:**  $^{26}\text{Al}$  是一个在多个学科都非常有意义的放射性核素。主要介绍了国内外在利用加速器质谱技术测量  $^{26}\text{Al}$  时所开展的各种测量方法、各自的优缺点和测量灵敏度, 并介绍了目前利用  $^{26}\text{Al}$  在地球科学、生物医学、核物理以及天体物理等诸多方面的应用研究工作。

**关键词:** 加速器质谱;  $^{26}\text{Al}$  应用; 灵敏度

**中图分类号:** TL92<sup>+</sup>2      **文献标识码:** A

## 1 引言

$^{26}\text{Al}$  是一种宇宙成因核素, 其半衰期为  $7.2 \times 10^5$  a。由于它在多个学科研究中都有很广泛的应用, 因此目前国际上对高灵敏的  $^{26}\text{Al}$  探测进行了多方面的尝试和研究, 以提高其测量灵敏度。本文介绍了国内外加速器质谱(AMS)技术中的测量  $^{26}\text{Al}$  时所用到的各种方法及各自的优缺点。对目前  $^{26}\text{Al}$  在地球科学、生物医学、核物理以及天体物理等研究过程中应用方面所开展的工作、当前的研究状况以及今后所能开展的工作进行了讨论。

实 现  
对  $^{26}\text{Al}$  的测量。由于端电压小于 6 MV 的小加速器

## 2 AMS 测量 $^{26}\text{Al}$ 的各种方法

在 AMS 测量中, 可能对被测核素形成干扰的是其同位素和同量异位素, 其中同量异位素的干扰是关键问题。在  $^{26}\text{Al}$  的 AMS 测量中, 其同量异位素是  $^{26}\text{Mg}$ 。针对  $^{26}\text{Al}$  的测量, 国际上一些 AMS 实验室根据自身 AMS 装置的特点采取了一些相关的方法。

### 2.1 引出原子离子的方法

由于  $^{26}\text{Mg}$  的电子亲合势小于零, 不易形成负离子, 因此国际上最通用的测量方法是引出  $\text{Al}^-$ 。这种方法可以排除  $^{26}\text{Mg}$  的干扰, 因此可以很容易

\* 收稿日期: 2005-12-30; 修改日期: 2006-03-23

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10105017)

作者简介: 鞠志萍(1979-), 女(满族), 辽宁凤城人, 硕士研究生, 从事加速器质谱研究; E-mail: jzp2004@tom.com

不能将 $^{26}\text{Al}$ 的能量加速到很高,不能很好地对同量异位素 $^{26}\text{Al}$ 和 $^{26}\text{Mg}$ 进行鉴别,只有引出 $\text{Al}^-$ 。这种类型的 AMS 装置的探测限为 $^{26}\text{Al}/\text{Al}\approx 10^{-14}$ 左右。目前许多实验室都利用这种方法,如英国曼彻斯特大学<sup>[1]</sup>、以色列威兹曼科学研究院<sup>[2]</sup>和奥地利维也纳环境研究加速器中心<sup>[3]</sup>。国内北京大学重离子物理研究所和中国科学院上海应用物理研究所也是采用引出 $\text{Al}^-$ 的方法,进行了一些实验。但是 $\text{Al}^-$ 的电离效率很低,引出 $\text{Al}^-$ 束流是引出 $\text{AlO}^-$ 的 $1/10$ 左右,极大地限制了 AMS 测量的灵敏度。

## 2.2 二次剥离的方法

此方法是利用二次剥离后 $^{26}\text{Mg}^{13+}$ 离子不存在,从而很好地将 $^{26}\text{Al}^{13+}$ 和 $^{26}\text{Mg}^{12+}$ 分离。这种方法虽可有效地排除 $^{26}\text{Mg}$ 的干扰,但是由于经二次剥离损失了很多 $^{26}\text{Al}$ 。1990年,德国一家 AMS 实验室采用引出 $\text{AlO}^-$ ,再利用二次碳膜剥离将 $^{26}\text{Al}$ 进行全剥离,可以很容易地将 $^{26}\text{Al}^{13+}$ 和 $^{26}\text{Mg}^{12+}$ 分离<sup>[4]</sup>。2004年,日本筑波大学在端电压为 $12\text{ MV}$ 的加速器上也采用了这样的方法,总的探测效率是引出 $\text{Al}^-$ 的4倍,给出的探测极限是 $^{26}\text{Al}/\text{Al}\approx 5\times 10^{-15}$ 。

## 2.3 充气磁谱的方法

如图1所示,利用离子进入充气磁谱以后不同元素离子的平均电荷态不同,飞行的路径不同,从而不同元素的原子将落在焦平面的不同位置上,这样利用位置灵敏探测器可鉴别出离子。2004年,Arazi等<sup>[5]</sup>采用离心沉淀的方法排除 $^{26}\text{Mg}$ 的干扰后,引出 $\text{AlO}^-$ ,最后用充气磁谱法进行 $^{26}\text{Al}$ 和 $^{26}\text{Mg}$ 的分离。他们用此方法测量了 $^{25}\text{Mg}(p,\gamma)^{26}\text{Al}$ 反应截面。经过化学流程处理后样品中 $^{26}\text{Mg}$ 的含量低于 $5\times 10^{-6}$ ,测量数据表明此种方法的总效率大约为 $4\times 10^{-5}$ ,测量灵敏度为 $^{26}\text{Al}/\text{Al}\approx 10^{-14}$ 左右。

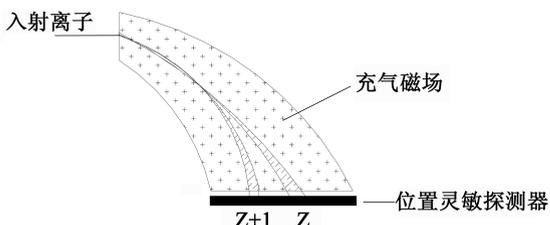


图1 充气磁谱仪

## 2.4 高效高灵敏方法

中国原子能科学研究所的 AMS 小组目前正在结合物理探测手段和化学分离方法开展 $^{26}\text{Al}$ 的 AMS 高效率、高灵敏测量方法的探索工作。采用离子交换方法压低样品中的 $^{26}\text{Mg}$ ,目前可以使样品中 $^{26}\text{Mg}$ 的含量小于 $1\times 10^{-6}$ 。同时选用纯靶锥,使靶锥中 $^{26}\text{Mg}$ 的含量尽可能得低。从样品中引出 $\text{AlO}^-$ ,选择 $7+$ 电荷态。然后采用多阳极气体电离室对 $^{26}\text{Al}$ 和 $^{26}\text{Mg}$ 进行鉴别,从而可实现对 $^{26}\text{Al}$ 的测量。如果能使样品中 $^{26}\text{Mg}$ 的本底小于 $0.1\times 10^{-6}$ ,由于离子源引出形式的不同,可以将 $^{26}\text{Mg}$ 的本底压低50倍,此时 $^{26}\text{Mg}$ 的本底为 $2\times 10^{-9}$ 。由于我们探测器的分辨能力为 $1\times 10^6$ ( $\text{Mg}$ 和 $\text{Al}$ 的原子个数比),预计 $^{26}\text{Al}$ 的测量灵敏度达到 $1\times 10^{-15}$ 个原子。这种方法的优势就是在传输过程中没有效率的损失,并能够很好地鉴别 $^{26}\text{Mg}$ 和 $^{26}\text{Al}$ 。

综上所述, $^{26}\text{Al}$ 的 AMS 测量中采用 $\text{AlO}^-$ 的引出形式后,总效率和测量灵敏度将得到提高,测量时间得以大幅降低,使用样品的量也可以相应地降低。这些迹象表明,要使 $^{26}\text{Al}$ 的应用更广泛,离子源的引出形式采用 $\text{AlO}^-$ 将是实现 $^{26}\text{Al}$ 更高灵敏度的有效手段。

## 3 $^{26}\text{Al}$ 的应用

### 3.1 $^{26}\text{Al}$ 在地球科学中的应用

从20世纪80年代中期开始,就地生成宇宙成因核素研究发展十分迅速。迄今为止,经 AMS 测量的就地生成宇宙核素已达9种<sup>[6]</sup>,其中以 $^{10}\text{Be}$ 和 $^{26}\text{Al}$ (半衰期分别为 $1.5$ 和 $0.7\text{ Ma}$ )的研究程度最为深入,应用范围最广。自从80年代中期 Nishizumi等<sup>[7]</sup>和 Klein等<sup>[8]</sup>首先尝试利用 AMS 测量就地产生的宇宙成因核素 $^{10}\text{Be}$ 和 $^{26}\text{Al}$ 研究利比亚沙漠玻璃的暴露-掩埋历史以来,就地产生的宇宙成因核素的 AMS 测量及其应用研究取得了巨大的进步。这不仅在于目前对宇宙核素的就地产生率的变化规律有了更深入系统的了解,而且还表现为它们的应用领域在不断扩大。目前,就地产生的 $^{10}\text{Be}$

和 $^{26}\text{Al}$ 除了用于研究地表岩石的暴露历史<sup>[7-9]</sup>和侵蚀速率<sup>[10, 11]</sup>外,还被广泛地用于研究冰碛物的暴露年龄<sup>[12]</sup>和第四纪冰川活动历史<sup>[13, 14]</sup>、陨击坑年龄<sup>[15]</sup>、断层活动频率<sup>[16]</sup>和河流下切与基岩抬升速率<sup>[17]</sup>等。

随着 AMS 技术的不断改善和测量数据的积累,就地生成宇宙核素的研究将不断深入,其应用范围也将进一步扩大。可以预料,在不远的将来,就地生成宇宙核素的 AMS 测量将成为新近系——第四系地表地球物理作用和地形地貌演变研究的一种重要工具。

### 3.2 $^{26}\text{Al}$ 在生物学中的应用

Al 是一种有毒的元素,它在人体内的沉积将会导致肾衰竭、贫血、骨瘤、骨营养不良和脑瘤等疾病。另外,Al 在人脑中大量沉积会导致老年痴呆症。Al 能直接损害成骨细胞的活性,从而抑制骨的基质合成。同时,消化系统对 Al 的吸收,导致尿钙排泄量的增加及人体内含钙量的不足。Al 不仅对人体毒害严重,对生物也有毒害作用。通常当溶解的 Al 达到  $10 \times 10^{-6}$ — $20 \times 10^{-6}$  以上时,植物就会出现 Al 毒症兆。 $^{26}\text{Al}$  在生物学中的应用主要是用做示踪剂。自然界存在的 Al 都是 $^{27}\text{Al}$  (100%)。Al 元素中只有一种长寿命的放射性同位素 $^{26}\text{Al}$  (半衰期为  $7.2 \times 10^5$  a)。因此, $^{26}\text{Al}$  非常适合做示踪剂。利用 $^{26}\text{Al}$  开展的生物方面的应用在动物和人体中都进行过。例如,日本东京大学的 AMS 实验室将含有 $^{26}\text{Al}$  的盐溶液注入到哺乳期的大鼠体内,然后考察铝盐在幼鼠体内各个组织的分布情况<sup>[18]</sup>。实验用 AMS 技术精确探测 $^{26}\text{Al}$  在幼鼠体内的含量。结果表明,大鼠是通过乳汁将 $^{26}\text{Al}$  传到幼鼠体内的, $^{26}\text{Al}$  在幼鼠大脑中的含量在其哺乳后的 140 d 以后基本稳定了。所以,婴儿可以通过母乳吸收到铝,将会削弱脑神经细胞的发展,这也为老年痴呆症的研究提供一条新的线索。人们在日常生活中可以接触到许多铝<sup>[19]</sup>,如在食品添加剂、牙膏、防臭剂和抗酸剂中都含有铝。1 个人每天吸收的 Al 中 $^{26}\text{Al}$  约占 0.1%—1% ( $^{26}\text{Al}$  离子或是被溶

解在人体中)<sup>[20]</sup>。婴儿更易受 Al 的毒害,因为他的胃、肠和肾功能还没有发育完全。因此,利用 Al 做示踪剂开展此方面的工作将非常有意义。

### 3.3 $^{26}\text{Al}$ 在天体物理及核物理中的应用

$^{26}\text{Al}$  在核物理方面的重要应用主要是核反应截面的测量,可以为天体物理的研究提供重要的数据。AMS 方法测量核反应截面是用该方法测量核反应产物核素的原子数,再根据已知的人射离子和靶原子数就可以得到核反应截面。

应用于核天体物理的一个典型例子是在 20 世纪 80 年代空间探测器的测量结果表明,在宇宙空间存在着大量的 $^{26}\text{Al}$ ,可是基于有关核物理实验数据,人们迄今所建立的所有有关天体(包括新星和超新星)模型几乎全都无法解决星际 $^{26}\text{Al}$  来源的问题,即空间产生的 $^{26}\text{Al}$  的数目远大于理论模型计算所得的结果。一种观点认为超新星爆炸时一些重核(如: $^{16}\text{O}$  与 $^{14}\text{N}$ )通过熔合反应可能也是星际 $^{26}\text{Al}$  的一个重要来源<sup>[21]</sup>。中国原子能科学研究所的 AMS 实验室目前正在开展测量 $^{14}\text{N}({}^{16}\text{O}, \alpha){}^{26}\text{Al}$  反应截面的工作<sup>[22]</sup>,利用 AMS 灵敏度高的特点尽可能将反应能区向低能方向推进,以接近超新星爆发时的温度。德国的 Munich AMS 实验室测量了 $^{25}\text{Mg}(p, \gamma){}^{26}\text{Al}$  的反应截面<sup>[5]</sup>,这个过程也是天体中合成 $^{26}\text{Al}$  的重要反应。另一个开展反应截面测量工作的是奥地利维也纳环境研究加速器中心的 AMS 实验室,他们精确测量了 $^{27}\text{Al}(n, 2n){}^{26}\text{Al}$  的反应截面。这个反应的阈值( $E_{\text{th}} = 13.54$  MeV)可以扩展到 DT 等离子体产生中子的能量范围,并用来测量等离子体的温度<sup>[23]</sup>。

## 4 总结及展望

综上所述, $^{26}\text{Al}$  在各个学科中的应用研究有着非常重要的现实意义。目前国际上利用 AMS 测量 $^{26}\text{Al}$  的技术已经相当成熟,各种方法都想在灵敏度方面进一步地提高。伴随着 $^{26}\text{Al}$  研究的进一步深入,它将在更多的学科里得到应用。

## 参 考 文 献:

[1] King S J, Oldham C, Popplewell J F, *et al.* The Analyst,

1997, 122(10): 1 049.

- [2] Boaretto E, Berkovits D, Hass M, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2000, **B172**: 767.
- [3] Wallner A, Golser R, Kutschera W. Nucl Instr and Meth, 1998, **B139**: 301.
- [4] Barker J, Day J P, Priest N D, *et al.* Nucl Instr and Meth, 1992, **B68**: 319.
- [5] Arazi A, Faestermann T, Fernandez J O, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2004, **B223—224**: 259.
- [6] Cerling T E, Craig H. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1994, **22**: 273.
- [7] Yiou F, Raisbeck G M, Klein J, *et al.* Solids, 1984, **67**: 503.
- [8] Klein M D, Robert S, Oliver A, *et al.* Radiocarbon, 1986, **28**: 547.
- [9] Phillips F M, Leavy B D, Jannik N O, *et al.* Science, 1986, **231**: 41.
- [10] Nishiizumi K, Lal D, Klein J, *et al.* Nature, 1986, **319**: 134.
- [11] Nishiizumi K, Kohl C P, Arnold J R, *et al.* Earth and Planetary Science Letters, 1991, **104**: 440.
- [12] Brown E T, Thomas W, Lal D, *et al.* Geochim Cosmochim Acta, 1991, **55**: 2 269.
- [13] Brook E D, Kurz M D, Ackert R P, *et al.* Earth and Planetary Science Letters, 1995, **131**: 41.
- [14] Gosse J C, Klein J, Evenson E B, *et al.* Science, 1995, **268**: 1 329.
- [15] Nishiizumi K, Kohl C P, Shoemaker E M, *et al.* Arizona Geochemical Cosmochemical Acta, 1991, **53**: 2 699.
- [16] Bierman P R, Gillespie A R, Caffee M W, *et al.* Science, 1994, **270**: 447.
- [17] Burbank D W, Leland J, Fielding E, *et al.* Nature, 1996, **379**: 505.
- [18] Yumoto S, Nagai H, Kobayashi K, *et al.* Nucl Instr and Meth, 2004, **B223—224**: 754.
- [19] Yumoto S. Global Environment and Human Activity. In: Watanuki, Yoshioka, ed. Tokyo: Maruzen Planet, 1996, 41.
- [20] Priest N D, Talbot R T, Austin J G, *et al.* Biometrics, 1996, **9**: 221.
- [21] 彭秋和. 物理学进展, 1995, **15**: 79.
- [22] 何明, 杨耀云, 姜山等. 原子核物理评论, 2004, **21**(4): 404.
- [23] Wallner A, Ikeda Y, Kutschera W. Nucl Instr and Meth, 2000, **B172**: 382.

## Measurement of $^{26}\text{Al}$ by AMS and Its Applications<sup>\*</sup>

JÜ Zhi-ping<sup>1,2</sup>, HE Ming<sup>1</sup>, LI Shi-hong<sup>1</sup>, GUAN Yong-jing<sup>1</sup>, LUO Li-xiong<sup>2</sup>, JIANG Shan<sup>1</sup>

(1 *Department of Nuclear Physics, China Institute of Atom Energy, Beijing 102413, China*;

2 *Department of Physics, Guangxi University, Nanning 530004, China*)

**Abstract:**  $^{26}\text{Al}$  is an important long-lived radionuclide in many research fields. The different measurement method of  $^{26}\text{Al}$  by using Accelerator Mass Spectrometry (AMS) are described, and the characters of these methods are also briefly discussed. The application of  $^{26}\text{Al}$  to geology, biomedicine, nuclear physics and nuclear astrophysics are also introduced in this paper.

**Key words:** accelerator mass spectrometry;  $^{26}\text{Al}$  application; measurement

\* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10105017)