

中国原子能科学研究所的 AMS 研究进展

姜 山, 何 明, 胡跃明, 袁 坚

(中国原子能科学研究所, 北京 102413)

Status of AMS at the China Institute of Atomic Energy

JIANG Shan, HE Ming, HU Yue-ming, YUAN Jian

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The first accelerator mass spectrometer (AMS) system in China was set up at the China Institute of Atomic Energy in 1989. In the following years, long-lived nuclides ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{41}Ca , ^{79}Se and ^{129}I were measured in geology, environment and biology samples. The newly development of the AMS measurements and applications in recent years were introduced. The current projects include upgrading of AMS injection system for increasing mass resolution, new particle identification techniques for separation of isobars, development of the AMS measurement methods for ^{99}Tc , ^{93}Zr , ^{151}Sm and ^{182}Hf analyses, and applications in biology, environment and nuclear astrophysics.

Key words: accelerator mass spectrometer; long-lived nuclides; measurement

中图分类号: O657.63

文献标识码: A

文章编号: 1004-2997 (2007) 增刊-21-03

加速器质谱 (accelerator mass spectrometry, 简称 AMS) 是 20 世纪 70 年代末基于粒子加速器技术和离子探测技术发展起来的一种质谱分析技术^[1-2]。与普通质谱计相比, 它具有排除分子本底和同量异位素本底的能力, 从而极大地提高了同位素丰度测量灵敏度。其同位素丰度灵敏度达到 10^{-15} , 待测核素的最低检测限达到 10^4 原子。AMS 主要用于测量自然界长寿命的宇宙射线成因核素, 如 ^{10}Be 、 ^{14}C 、 ^{26}Al 、 ^{32}Si 、 ^{36}Cl 、 ^{41}Ca 、 ^{129}I 等, 它们的半衰期在 $10^3 \sim 10^8$ 年范围内, 天体和宇宙间许多感兴趣的过程正是在这个时间范围内。作为年代计和示踪剂, 它们可提供自然界许多运动、变化以及相互作用等信息。因此, 对这些核素的测定可以广泛地应用于地球科学、考古学、环境科学、生命科学、海洋科学、核天体物理学等许多领域。

中国原子能科学研究所于 1989 年基于 HI-13 串列加速器, 建成我国第一台 AMS 装置^[3-5], 也是亚洲第一台大型 AMS 装置。相继开展了 ^{10}Be 、 ^{26}Al 、 ^{36}Cl 、 ^{41}Ca 、 ^{79}Se 、 ^{129}I 等核素的测量, 并在地质、环境、生命等方面进行了应用研究^[6-9]。近几年来, 继续在发展 AMS 测量技术和拓宽应用两个方面开展研究工作。

1 技术发展

1.1 新测量方法的研制^[10-13]

近几年, 在 HI-13 串列 AMS 装置上主要开展了 ^{182}Hf 、 ^{93}Zr 、 ^{99}Tc 、 ^{151}Sm 等裂变产物核素和中子活化核素的测量方法研究。研究的重点是排除同量异位素的干扰, 包括实验室标准样品的研制, AMS 测量样品化学形式与离子引出形式的确定, 化学方法排除同量异位素以及离子探测方法的建立等。

基金项目: 国家自然科学基金及部门基金资助

作者简介: 姜山 (1956-), 男 (汉族), 河北青龙人, 研究员, 从事加速器质谱研究。

取得的结果列于表 1。

1.2 新技术的建立^[14-16]

为了满足地质学、环境科学等用户的需求，需要提高 HI-13 串列 AMS 系统的测量灵敏度，重点是在提高束流强度和排除同量异位素与同位素离子干扰等方面开展新技术、新方法的研究。研究内容包括充气飞行时间离子鉴别技术的建立；充气磁谱仪结合飞行时间离子鉴别方法的建立；新的高分辨离子注入器系统的建立；探索发现 AMS 离子源引出 AlO^- 和 SeO_2^- 的形式；研制软件，使其在实验之前就能计算出实验中的干扰离子，为实验设计提供依据等。这些方法有效地提高了对 ^{79}Se 、 ^{26}Al 、 ^{10}Be 等核素的测量灵敏度。其中，对于 $^{79}\text{Se}/^{78}\text{Se}$ 的本底水平从 10^{-9} 降低到 10^{-11} ，对于 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ 的本底水平从 10^{-14} 降低到 10^{-15} 。

表 1 在 HI-13 串列 AMS 上已测量的核素情况表

核素/干扰	样品形式	引出离子	束流/ μA	端电压/MV	电荷态	探测方法	本底水平（丰度比）
$^{10}\text{Be}/^{10}\text{B}$	BeO	BeO^-	0.12	8.40	3^+	阻止吸收 $+\Delta E-E$	5×10^{-15}
$^{26}\text{Al}/^{26}\text{Mg}$ $^{36}\text{Cl}/^{36}\text{S}$	Al_2O_3	Al^-	0.08			$\Delta E-E$	1×10^{-14}
	Al_2O_3	AlO^-	2.00	7.00	7^+	二次剥离	$\sim 10^{-15}$
	AgCl	Cl^-	2.50	8.05	8^+	$\Delta E-E$	3×10^{-15}
$^{41}\text{Ca}/^{41}\text{K}$	CaH_2	CaH_3^-	0.20	7.80	8^+	$\Delta E-E$	1×10^{-14}
	CaF_2	CaF_3^-	0.08	8.50	7^+	$\Delta E-E$	5×10^{-14}
	CdSe	Se^-	0.50	8.05	9^+	PXD	2×10^{-9}
$^{79}\text{Se}/^{79}\text{Br}$	SeO	SeO_2^-	1.50	8.05	9^+	Bragg	$\sim 10^{-11}$
$^{93}\text{Zr}/^{93}\text{Nb}$	ZrO_2	ZrO^-	0.13	8.00	9^+	$\Delta E-E$ Bragg	$\sim 10^{-10}$
$^{99}\text{Tc}/^{99}\text{Ru}$	TcO	TcO^-	—	7.80	10^+	$\Delta E-E$	$\sim 10^8$ 原子
$^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$	AgI	I^-	3.00	8.05	11^+	TOF	1×10^{-13}
$^{151}\text{Sm}/^{151}\text{Eu}$	Sm_2O_3	SmO^-	0.10	8.00	10^+	TOF	1×10^{-8}
$^{182}\text{Hf}/^{182}\text{W}$	HfF_4	HfF_5^-	0.15	8.00	9^+	TOF	4×10^{-11}

2 应用研究

2.1 ^{41}Ca 在生物医学中的应用^[17-18]

^{41}Ca 的衰变方式为轨道电子俘获，只发射 3.3 keV 的 X 射线，半衰期长($T_{1/2}=1.0\times 10^5$ 年)^[5]。其所需示踪剂量可以更少，对生物体辐射损伤极其微弱，比正常饮食中的天然放射性剂量要小 1 000 倍，因此， ^{41}Ca 是一种理想的生物医学示踪剂。由于 AMS 具有排除 ^{41}K 等干扰的能力，成为 ^{41}Ca 测量的最有效方法。目前开展了两个方面课题的研究：第一，通过 ^{41}Ca 示踪研究细胞内 Ca^{2+} 作为细胞信使对细胞功能的影响，目前已经初步建立了示踪方法；第二，通过 ^{41}Ca 示踪研究破骨细胞的行为以及药物治疗骨质疏松症的评价方法，取得了很好的进展。

2.2 ^{151}Sm 和 ^{79}Se 的环境毒理学^[19]

稀土和重金属等是典型的环境污染物，其环境毒理研究是目前环境科学的重点内容。在国家自然科学基金重大项目的支持下，作为部分研究内容，开展了 ^{151}Sm 和 ^{79}Se 分别作为稀土和重金属元素示踪剂的 AMS 测量方法研究与生物示踪应用的方法研究。目前，重点开展了 ^{151}Sm 的测量与生物示踪的方法研究。以试验大鼠为研究对象，针对示踪稀土 Sm 是否能够进脑这样一个科学问题进行研究，得到初步的半定量结果，其结果支持稀土能够进脑的假说与实验。

2.3 核物理与核天体物理^[20]

在核物理与核天体物理研究领域，对于长寿命超痕量核素的测定是一个困难的课题。AMS 提供了对其测量的有效方法，主要有两个方面，一是长寿命放射性核素半衰期的测定；二是核反应中，产物为长寿命核素的核反应截面的测定。目前，已经开展了 ^{79}Se 半衰期的测定，在截面方面开展了核天体感兴趣的重离子核反应生成 ^{26}Al ，即 $^{16}\text{O}(^{14}\text{N},\alpha)^{26}\text{Al}$ 的反应截面工作。另外，产物核为长寿命核素的中子核反应数据，如 $(n,2n)$ ， $(n,3n)$ 以及 (n,γ) 的裂变产额是下一步研究的重点。

2.4 ^{10}Be 与深海资源^[21]

21 世纪初, 海洋地质研究发现, 在深海 1 000~2 500 m 海底, 生长着一种多金属结壳, 称为富钴结壳, 富含 Co、Mn、Ni、Cu、Au、Pt 等多种贵金属元素, 金属总含量可以达到 70%。储量大, 水深相对较浅, 较易开采, 是一种经济价值巨大的公海海底资源。通过富钴结壳生长速率等高线的测定, 可以圈出厚度较大、具有开采价值的富钴结壳矿区。2004 年, 通过与厦门大学等有关单位合作, 用 AMS 精确测定富钴结壳中宇宙成因核素 ^{10}Be 剖面分布, 推断出富钴结壳年龄和生长速率, 为海底富钴结壳矿产资源赋存规律的研究提供了重要依据。

参考文献:

- [1] MULLER R A. Radioisotope dating with a cyclotron[J]. Science, 1977, 196 (4289): 489-494.
- [2] PURSER K H, LIEBERT R B, LITHERLAND A E, et al. Attempt to detect stable N-ions from a sputter ion-source and some implications of results for design of tandems for ultra-sensitive carbon analysis[J]. Rev Phys App, 1977, 12: 1 487.
- [3] JIANG S H, JIANG S, MA T J, et al. Nucl Instr and Meth, 1990, B52: 285-288.
- [4] 姜 山, 蒋崧生, 王 旬, 等. 一台用于 AMS 的鉴别同量异位素的气体电离室[J]. 原子能科学技术, 1991, 25(3): 40-44.
- [5] 蒋崧生, 马铁军, 姜 山, 等. 一台 AMS 的静电偏转器[J]. 原子能科学技术, 1991, 25(4): 29-32.
- [6] JIANG S, HE M, JIANG S S, et al. AMS measurements and applications at the China Institute of Atomic Energy[J]. Nucl Instr and Meth, 2000, B172: 87-91.
- [7] HE M, JIANG S, JIANG S S, et al. The measurements of ^{79}Se and ^{64}Cu with PXAMS[J]. Nucl Instr and Meth, 2000, B 172: 177-181.
- [8] 姜 山, 何 明, 蒋崧生, 等. 加速器质谱测量中的离子鉴别技术[J]. 核技术, 2000, 23(10): 718-720.
- [9] JIANG S, HE M, DONG K J, et al. The measurement of ^{41}Ca and its application for the cellular Ca^{2+} concentration fluctuation caused by carcinogenic substances[J]. Nucl Instr and Meth, 2004, B223/224: 750-753.
- [10] QIU J Z, JIANG S, HE M, et al. Measurement of ^{182}Hf with HI-13 AMS system[J]. Nucl Instr and Meth, 2007, B259: 246-249.
- [11] HE M, JIANG S, PENG B, et al. ^{99}Tc measurements with accelerator mass spectrometry at CIAE[J]. Nucl Instr and Meth, 2007, B259: 708-713.
- [12] 寅新艺, 姜 山, 何 明, 等. 用于 AMS 测量的 ^{182}Hf 标准样品的制备[J]. 核技术, 2006, 29(1): 15-18.
- [13] 周 舵. AMS 测量 ^{93}Zr 的方法研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2007.
- [14] RUAN X D, GUAN Y J, HE M, et al. A method for isobaric identification with gas-filled TOF detector system[J]. Nucl Instr and Meth, 2004, B223-224: 172-175.
- [15] WANG H J, GUAN Y J, JIANG S, et al. A method for optimizing experimental conditions and simulating spectra in the measurement of heavy nuclides in AMS[J]. Nucl Instr and Meth, 2007, B259: 277-281.
- [16] 王 伟, 何 明, 姜 山, 等. 加速器质谱测量 ^{79}Se 的新方法研究进展[C]. 中国核物理大会, 兰州, 2007.
- [17] 李世红. $^{41}\text{CaF}_2$ 的 AMS 分析方法和骨代谢的 ^{41}Ca 的示踪研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2006.
- [18] 袁 媛, 李世红, 何 明等. 用 ^{41}Ca -AMS 法测定谷氨酸毒性对 PC12 细胞外钙内流的影响[J]. 核技术, 2006, 29(17): 821-825.
- [19] 寅新艺. AMS 测量 ^{151}Sm 的方法研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2007.
- [20] HE M, JIANG S, NAGASHIMA Y, et al. AMS measurement of ^{26}Al cross section for the reaction $^{14}\text{N}(^{16}\text{O}, \alpha)^{26}\text{Al}^g$ [J]. Nucl Instr And Meth, 2007, B259: 629-631.
- [21] 黄奕普, 邢 娜, 何 明, 等. 太平洋富钴结壳的生长速率与生成年代[C]// 同位素海洋学研究文集: 海洋放射年代学, 2006.