

低能核反应产物 ^{26}Al 的 AMS 测量方法研究

郑元丰^{1,2}, 阮向东^{1,2}, 何明¹, 武绍勇¹, 管永精^{1,2}, 董克君¹, 姜山¹

(1. 中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413;

2. 广西大学物理系, 广西南宁 530004)

摘要: 分别选用 TN 、 Al_2O_3 和 $^{26}\text{Al}^{7+}$ 为靶材料、载体和被测离子, 用加速器质谱计 (AMS) 分别测量了 O、N 重离子低能熔合反应产物和标准样品的 ^{26}Al , 研究结果显示测量方法是准确、可信的。

关键词: 质谱学; ^{26}Al 的加速器质谱计 (AMS) 测量; 低能核反应; 重离子

中图分类号: O 657. 63; O 571. 432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-2997(2003)01-295-03

目前低能区的重离子反应主要能为天体物理特别是恒星演化理论提供数据支持, 天体物理中恒星内部高温下的热核反应实际上对应于核物理学中的低能核反应 ($1\text{ MeV} \sim 1.2 \times 10^{10}\text{ K}$), 而目前实验核物理难以直接进行如此低能核反应的核反应截面测定工作。所以迄今天体物理中采用的核反应率数值几乎都是从高能 (或中高能) 核物理实验测出的数据外推到低能区而获得, 可靠性差。根据天体观测和计算, 天体物理学家发现在星际环境中存在大量的 ^{26}Al ($T_{1/2} = 7.2 \times 10^5\text{ a}$), 同时也提出了新星、超新星等模型来解释星际 ^{26}Al 的来源^[1], 如 SN I 中的 O、N 等重核熔合反应。由于在实验室条件模拟星际中核反应条件产生 ^{26}Al 的反应截面很小, 用现在常用的测量重离子核反应特征 γ 能谱的测量方法很难实现低能区反应截面的测量, 而加速器质谱 (AMS) 测量是粒子加速器技术和粒子探测技术相结合的方法, 主要用于测量长寿命宇宙成因核素与其稳定核素的丰度比, 对样品中长寿命稳定同位素进行直接测量, 有效地排除了各种干扰, 灵敏度高, 因此能对核反应产生的 ^{26}Al 原子数进行直接测量。在实现对较低能核反应截面测量的同时, 可进一步将测量能区向更低方向推进, 为

解决天体中 ^{26}Al 的疑难问题和建立天体模型提供数据。

1 加速器上核反应生成 ^{26}Al 研究

1.1 核靶的制备

在选取产生核反应靶时, 根据靶材料的熔点、导电性、核阻止本领等因素, 本工作选取 TN 作为靶材料, 将粉末状 TN 在高于 1800 K 高温下用真空镀膜机将其蒸到铜衬底上, 靶厚约为 $100\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 将制好的靶装入自行设计的不锈钢靶室中 ($\Phi = 15\text{ mm}$)。靶可分为薄靶和厚靶, 薄靶的优点是 AMS 可以一次完成其产生的 ^{26}Al 原子数的测量, 但需要再次测量厚度。根据 $^{14}\text{N}(p, p_1)^{14}\text{N}$ 反应, 能量为 3.868 MeV 时质子的共振截面为 $36 \pm 3\text{ mb}$, 但制靶比较困难; 对于厚靶, 制靶比较容易, 但需要利用有一定能量间隔的不同能量照射靶, 测量两个能量间隔间 ^{26}Al 的原子数来确定截面。

1.2 在加速器上的核反应过程

(1) 束流的选取

本工作选择 O 离子束流来照射靶发生核反应。加速器为北京 HF-13 串列加速器, 端电压 12 MV , Hiconex 860 型 Cs 溅射源, 离子源样品用

收稿日期: 2002-09-02

作者简介: 郑元丰 (1977~), 男 (汉族), 广西柳州人, 硕士生, 物理专业

Al_2O_3 , 离子源产生的氧负离子注入加速器, 负离子加速后在固体剥离器中剥离成多种电荷态的原子离子再继续加速, 选择最可几的 O^{5+} 进入终端管道, 束流经过聚焦和准直后, 打靶产生核反应。

(2) 粒子熔合反应过程

束流打靶后发生 O 和 N 的熔合反应^[2], 产生的剩余核主要有 $E(^{26}\text{Al} + \alpha)$ (417 keV), $E(^{25}\text{Mg} + \text{p}\alpha)$ (390, 585, 975 keV) 和 $E(^{28}\text{Si} + \text{p}\alpha)$ (1 779 keV), 而本工作需要重点研究出射道 ^{16}O ($^{14}\text{N}, \alpha$) ^{26}Al 反应。为了监测束流变化和计算截面, 需要知道打在靶上的粒子计数, 因此在束流照射靶的同时, 用导线将打在靶上的电流引入 439 数字电流积分器 (Digital current integrator), 然后接入定标器, 记下从开始照射到停止照射时间段里定标器的记数。对于在低能核反应的能量常采取从较高能向低能逐步降低的方法, 在较高能反应时 (如 $E_{\text{c.m.}} = 12 \text{ M eV}$), 由于反应截面相对较大, 所以可用高纯锗 (HPGe)

探测器置于出射角 0° 的位置观测 ^{26}Al 发射的特征 γ 射线 (靶室厚度 1 mm), 以旁证和监测 ^{26}Al 的生成。

(3) 预估算核反应产额方法

根据从高能区向低能区外推出的激发曲线^[2], 可以对核反应的时间和 ^{26}Al 产额做出估算。

在 $E_{\text{c.m.}} = 11 \text{ M eV}$ 时, $\sigma(E) = 110^{-2} \text{ b}$, 束流为 $2 \mu\text{A}$, 取 +4 电荷态, 靶厚为 $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ (0.1075×10^{19} 原子/ cm^2), 可以得出:

$$N_{^{26}\text{Al}} = 0.1075 \times 10^{19} \times 6.25 \times 10^9 \times 2 \times 10^3 \times 1 \times 10^{-2} \times 10^{-24} = 3.4104 \text{ 原子/s}$$

则 4 h 产生的 ^{26}Al 的原子数为 4.9×10^8 , 而 20 mg 的载体 (Al_2O_3) 的原子数是 1.18×10^{20} , 因此加入载体后样品中 $w(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})$ 为 4.15×10^{-12} 。

同理, 根据不同的 $E_{\text{c.m.}}$ 、束流等条件, 得到的结果列于表 1。

表 1 加入载体后样品中 $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ 的比值测量结果

Table 1 Determination results of $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ in samples after adding carrier

$E_{\text{c.m.}}$	$\sigma(E)/\text{b}$	束流/ μA	原子数/s	t/h	$m(\text{Al}_2\text{O}_3)/\text{g}$	$w(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})$
11	1×10^{-2}	2	3.410×10^4	4	20	2.08×10^{-12}
10	8×10^{-3}	2	2.7×10^4	4	20	1.65×10^{-12}
9	2.5×10^{-3}	2	0.9×10^4	4	20	5.50×10^{-12}
8	5×10^{-4}	2	1.7×10^3	4	10	2.07×10^{-13}
7	4×10^{-5}	2	1.4×10^2	20	10	8.54×10^{-13}
6	1×10^{-6}	5	0.9×10^1	100	10	2.75×10^{-14}

2 测量样品制备

测量样品制备步骤如下:

- (1) 加入氧化铝载体 5~20 mg;
- (2) 以化学的方法将靶和载体一起溶解, 离心沉淀, 分离, 烘干, 高温灼烧;
- (3) 最后得到以含微量 TN 的固态 Al_2O_3 形式样品, 其中微量的 TN 并不影响 AMS 对 ^{26}Al 的测量;
- (4) 将样品装入靶锥, 密封保存在玻璃称量瓶中, 以备 AMS 测量用。

3 AMS 测量^[5]

采用 HI-13 串列加速器质谱计系统首先

对 ^{26}Al 的标样进行了测量。由于铝产生的束流很弱, 因此采用 200 型强流源, 电压设为 7 M eV, 选择铝的负离子经注入器进入加速器, 负离子加速后在剥离器被剥离成多电荷态的原子离子, 选择 6^+ 作为被测离子时, 与 ^{26}Al 具有相同磁刚度的 3^+ 的 ^{13}C 对其有很大的干扰, 因此选择 7^+ , 干扰排除; ^{26}Al 重要的同量异位素 ^{26}Mg 不能生成负离子, 因而不对 ^{26}Al 产生干扰; $^{26}\text{Al}^{7+}$ 离子经过各种磁分析器和静电分析器选择和排除各种干扰后进入粒子鉴别系统, 用电离室探测器^[6]。实验测量了两个标准样品和一个空白样品, 测量结果列于表 2。

表 2 样品测量结果

Table 2 Measurement results of samples

样品 (Samples)	$w(^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al})$	
	标准值(Certified)	测量值(Measurement)
标样 1 (Standard 1)	1.54×10^{-9}	$(0.76 \pm 0.03) \times 10^{-9}$
标样 2 (Standard 2)	3.65×10^{-12}	$(1.85 \pm 0.12) \times 10^{-12}$
η (标样 1/标样 2)	422	411 ± 28

从表 2 中能看出两个标准样品的确认值和测量值是一致的, 测量值偏小是加速器聚焦和入射窗偏小造成的, 对 AMS 测量影响不大。同时对空白样品的测量证实 AMS 对 ^{26}Al 的灵敏度优于 5×10^{-14} , 这为进一步测量核反应样品提供了可行和可靠的依据。

4 结论与展望

通过对低能核反应产生的 ^{26}Al 的测量建立起利用 AMS 测量低能核反应截面的测量方法。目前本实验室在利用加速器进行重离子核反应, 核反应生成产物 ^{26}Al 的提取, 及 ^{26}Al 的 AMS 测量等方面进行了许多基础工作和测量研究, 基本掌握了实验测量方法。但由于核反应能量在向更低能区推进的时候, 根据理论估算反应截面会大

幅减小, 造成 ^{26}Al 的产额随之变小, 增加了 AMS 测量的难度, 为此需要提高 ^{26}Al 的束流强度。束流强度与测量系统及被测样品自身的化学等性质密切相关, 因此还必须在这些相关课题进行深入的探索。

参考文献:

- [1] 彭秋和. 星际 ^{26}Al 核合成研究面临的困难-核天体物理学的重大难问题[J]. 物理学进展, 1995; 15(1): 79
- [2] Switkowski ZE, Stokstad RG, Wieland RM. ^{14}N Fusion With ^{12}C and ^{16}O at Sub-Barrier Energies [J]. Nucl Phys, 1977, A 279: 507.
- [3] Wallner A, Golser R, Kutschera W, et al. ^{26}Al Measurement With VERA [J]. Nucl Instr Meth, 1998, B 139: 301~ 305
- [4] Hiroyuki Matsuzaki, Masashi Tanikawa, Koichi Kobayashi, et al. Development of a Gas Counter for AMS Measurement of ^{10}Be and ^{26}Al of Cosmic Spherules [J]. Nucl Instr Meth, 2000, B 172: 218
- [5] 何明. 加速器质谱学中的入射离子 X 射线方法及其应用[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2001.
- [6] 姜山, 蒋崧生, 王洵, 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

Study on the Measurement Method of ^{26}Al by AMS

ZHENG Yuan-feng^{1,2}, RUAN Xiang-dong^{2,1}, HEMing¹, WU Shao-yong¹,
GUAN Yong-jing^{1,2}, DONG Ke-jun¹, JIANG Shan¹

(1. Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

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

Abstract: TiN , Al_2O_3 and $^{26}\text{Al}^{7+}$ are selected as target material, carrier and detected ion, respectively. ^{26}Al of the product in low energy fusion reaction ($^{16}\text{O} (^{14}\text{N}, \alpha)^{26}\text{Al}$) and the reference samples are measured by Accelerator Mass Spectrometer (AMS). The study result shows that the measurement method is accurate and confident.

Key words: mass spectrometry; measurement of ^{26}Al by accelerator mass spectrometer (AMS); fusion reaction in low energy; heavy ions