

# 利用加速器质谱计测量 $^{10}\text{Be}$ 形成截面\*

刘联璠 程晓伍 周慰因 胡妙君 孙国燕 王纳秀

(中国科学院上海原子核所 上海 201800)

1994-07-26 收稿

## 摘 要

加速器质谱计具有很高的灵敏度,能测量样品中含量极微的杂质同位素。 $^{10}\text{Be}$  是一种宇宙成因核,在地学、环境科学和宇宙学等领域有广泛的应用,它为纯  $\beta$  衰变核,端点能量低且半衰期很长。采用测量剩余核放射性方法确定  $^{10}\text{Be}$  形成截面很困难。本文报道利用加速器质谱计技术测量  $^{10}\text{Be}$  反应总截面的方法和结果,并对应用前景作了讨论。

**关键词**  $^{10}\text{Be}$  形成截面,加速器质谱计,宇宙成因核。

## 1 引 言

$^{10}\text{Be}$  是一种宇宙成因核,半衰期为  $1.5 \times 10^6\text{a}$ 。它是一种反映各种地球化学作用过程的理想示踪剂,在地学、环境科学及宇宙学等领域有广泛的应用。因此  $^{10}\text{Be}$  形成截面的测量深受人们重视。例如在解释陨石和月球样品中  $^{10}\text{Be}$  的深度分布时,必须知道样品中各种组成元素在各种宇宙射线粒子照射下的形成截面。 $^{10}\text{Be}$  发射  $\beta$  离子衰变为  $^{10}\text{B}$ ,端点能量为  $0.556\text{MeV}$ ,且半衰期很长。采用测量剩余核放射性方法确定  $^{10}\text{Be}$  形成总截面很困难。文献中除  $^{10}\text{Be}$  基态和低激发态的微分截面外<sup>[1]</sup>,缺少  $^{10}\text{Be}$  形成总截面的报道<sup>[2]</sup>。我们采用加速器质谱计 (AMS) 技术测量了  $^9\text{Be}(\text{d}, \text{P})^{10}\text{Be}$  反应总截面在  $E_d = 8-16\text{MeV}$  能区的激发函数,一方面填补实验数据的空白,同时也显示 AMS 技术在核反应截面测量中的特有作用。

## 2 实验方法

### 2.1 样品制备

将超纯金属铍片压制成厚度约为  $37\text{mg}/\text{cm}^2$  (厚度均匀性为  $\pm 5\%$ )、直径为  $4\text{cm}$  的圆片,由四块铍片叠成靶堆,用上海原子核所等时性回旋加速器提供的  $15.8 \pm 0.1\text{MeV}$  氘束轰击,累计氘束为  $110 \pm 1\mu\text{Ah}$ 。轰击后冷却三天待短寿命放射性死去,取下靶片。将各靶片分别溶解于  $\text{HCl}$  溶液,然后加  $\text{NaOH}$ ,在  $\text{pH} = 8$  条件下沉淀出  $\text{Be}(\text{OH})_2$ 。将

\* 中国科学院和国家自然科学基金经费资助。

$\text{Be}(\text{OH})_2$  沉淀在  $950^\circ\text{C}$  加热灼烧成  $\text{BeO}$  粉末。在  $\text{BeO}$  粉末中按 1:1 比率加银粉拌匀, 压制成串列加速器离子源的阴极靶头, 供 AMS 测量分析。其中第三块铍片轰击后被用作调试加速器  $^{10}\text{Be}$  束之用, 未作截面测量。

## 2.2 加速器质谱计

测量工作是在上海原子核所 6MeV 串列静电加速器质谱计上进行。该设备的研制和性能特点已报道<sup>[3]</sup>。这里仅介绍与本实验有关的内容。加速器质谱计又称超灵敏度质谱计, 具有灵敏度高 ( $\sim 10^{-15}$ ), 需要的样品量少 ( $\sim \text{mg}$ ) 和测量时间短 (一般每个样品不超过一小时) 等特点。为分析样品中含量极微的杂质同位素含量提供一个优越的手段。

Be 靶经氦束轰击后, 产生极少量的  $^{10}\text{Be}$  原子。利用 AMS 测量样品中  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  的比值, 即可计算反应中产生的  $^{10}\text{Be}$  原子数及  $^9\text{Be}(d, p)^{10}\text{Be}$  反应总截面, 为反应截面测量提供一个新的手段。图 1 为上海原子核所串列加速器质谱计的示意图。

经压制后的氧化铍样品, 作为溅射离子源的阴极, 氧化铍经氦束溅射、电离和预加速后, 由偏转磁铁交替选择质量数为 25 和 26 的  $^9\text{Be}^{16}\text{O}^-$  和  $^{10}\text{Be}^{16}\text{O}^-$  ( $^9\text{Be}^{16}\text{OH}^-$ ) 分子离子注入加速器, 经加速和分析后, 在终端用探测器分别测量  $^9\text{Be}$  和  $^{10}\text{Be}$  的原子数, 即可得到样品中  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  的比值。但加速器的部分元件对不同质量的同位素的传输效率不完全相同。为了校正同位素分馏效应产生的误差, 我们采用待测样品和标准样品对比的实验方案。

离子源为本所研制的多靶位强流溅射源<sup>[4]</sup>。共有 18 个靶位, 能在不破坏真空条件下, 简单、快速、精确地更换样品, 每次实验使用标准样品 ( $^{10}\text{Be}/^9\text{Be} = 1.03 \times 10^{-10}$ ) 测量加速器的传输效率, 并在实验过程中, 和待测样品、空白样品交替测量, 为加速器的正常运行进行监督、交替注入  $^9\text{Be}^{16}\text{O}^-$  和  $^{10}\text{Be}^{16}\text{O}^-$  (及  $^9\text{Be}^{16}\text{OH}^-$ ), 分子离子加速后在气体剥离器破裂成原子离子, 并被剥离成多种电荷态的正离子继续加速后, 由分析磁铁选择最可几的  $\text{Be}^{3+}$  离子送至终端的粒子鉴别系统。在后传输过程中, 速度选择器、分析磁铁和静电分析器分别按照粒子的速度、动量和能量, 让待测离子通过而排除其它干扰离子, 在偏转磁铁和分析磁铁出口处, 分别设置旁通法拉第筒 F1 和 F2, 当注入  $^{10}\text{Be}^{16}\text{O}^-$  及  $^9\text{Be}^{16}\text{OH}^-$  时, F1 收集  $^9\text{Be}^{16}\text{O}^-$  供归一和监督注入器的正常运行, F2 收集  $^9\text{Be}^{3+}$  离子的电荷, 作为

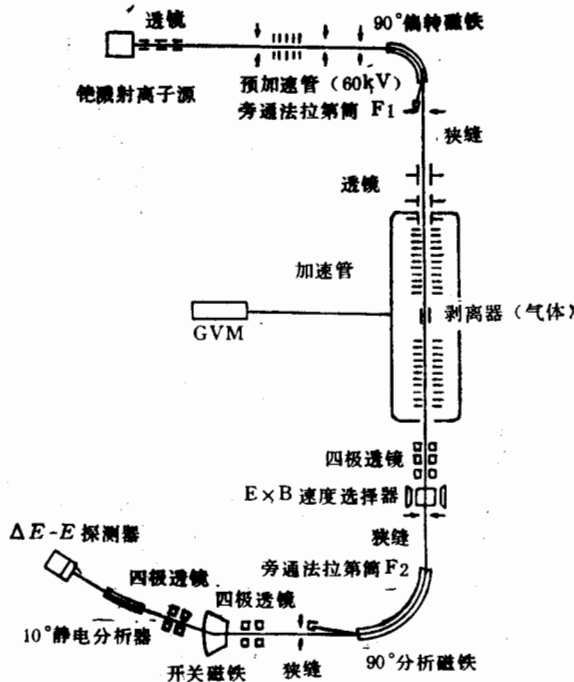


图 1 上海原子核研究所 AMS 系统示意图

隙缝稳压信号保持加速器端电压的稳定性。

### 2.3 粒子鉴别系统

测量  $^{10}\text{Be}$  时主要干扰元素为  $^{10}\text{B}$ ，两者质量仅差  $6 \times 10^{-5}$ ，一般电磁元件的分辨率难以区别  $^{10}\text{Be}$  和  $^{10}\text{B}$  离子，两者都能形成负离子，不能在离子源处抑制  $^{10}\text{B}$ 。在样品制备过程中，虽然采用高纯试剂，使用塑料器皿以降低样品中的硼杂质，束流中的  $^{10}\text{B}$  仍远远超过待测的  $^{10}\text{Be}$  原子数，因此必须采用特殊设计的粒子鉴别系统。实验使用的探测器由平行板电离室、正比计数器和金硅面垒半导体探测器组成(见图2)，电离室和正比计数器的工作气体是 90% Ar + 10% N<sub>2</sub>，气压用 BaLzers 公司的 PVG040 和 APG010 控制和测量(见图3)，气压稳定性好于 133 Pa/8h，气压的稳定性对有效地鉴别粒子非常重要。调节电离室的气压，使恰好能吸收  $^{10}\text{B}^{3+}$  离子，而能量相等的  $^{10}\text{Be}^{3+}$  离子有较长的过程，能穿过电离室和正比计数器到达半导体探测器，电离室的信号被用来监督后传输部件的稳定性，正比计数器和半导体探测器分别提供  $\Delta E$  和  $E'$  信号，信号由 ND620 两维数据获取系统记录和处理。

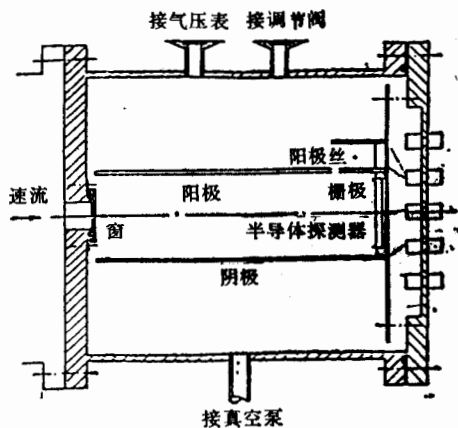


图2  $\Delta E-E$  探测器示意图

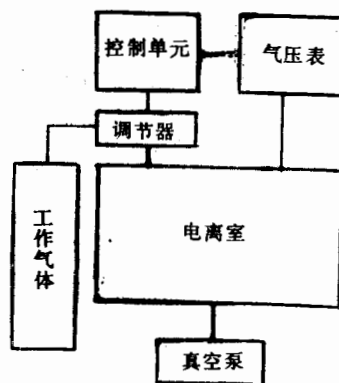


图3 稳压系统框图

## 3 实验结果和讨论

加速器端电压工作在 4MV。先测标准样品，注入  $^{10}\text{Be}^{16}\text{O}^-$  及  $^9\text{Be}^{16}\text{OH}^-$  离子，在 F1 旁通法拉第筒收集和记录  $^9\text{Be}^{16}\text{O}^-$  离子。在粒子鉴别系统记录  $^{10}\text{Be}^{3+}$  粒子。两者比值和标准样品的传输效率  $\eta$ 。然后对待测样品进行同样的测量。利用测定的传输效率计算待测样品的  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  比值。交替测量标准和待测样品，对多次结果求平均以补偿加速器的不稳定性，在测量过程中穿插测定空白样品以监督加速器的正常运行。 $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  测量误差的主要来源为  $^{10}\text{Be}$  传输效率随时间的变化及  $^{10}\text{Be}$  记数的统计涨落。根据多次标准样品的测量结果，在测量过程中，传输效率偏离平均值的幅度在  $\pm 5\%$  以内。图 4(a)和(b)分别为标准样品和空白样品  $^{10}\text{Be}$  的两维能谱图。 $^{10}\text{Be}$  在两维能谱中位置的确定，主要根据

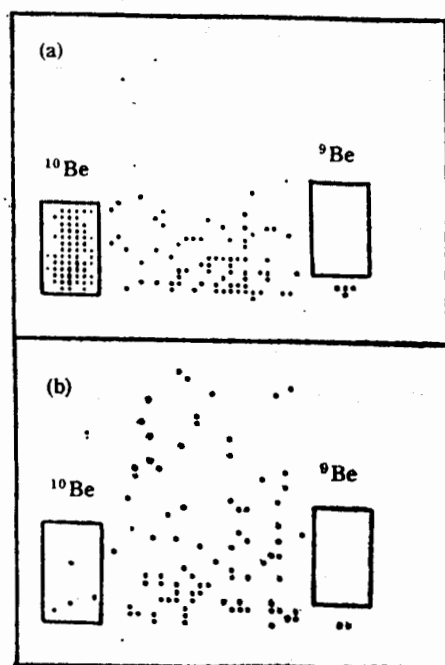


图 4 二维能谱图

(a) 标准样品 ( $^{10}\text{Be}/^9\text{Be} = 1.03 \times 10^{-10}$ ), (b) 空白样品.

标准样品的测量结果以及利用回旋加速器和串列静电加速器提供的重粒子对粒子鉴别系统的刻度结果。根据空白样品测量结果,这台 AMS 装置测量  $^{10}\text{Be}$  的灵敏度为:  $2.7 \times 10^{-13}$ 。能有效地排除  $^{10}\text{B}$  和  $^9\text{Be}$  等同位素的干扰,从测定的  $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$  比值,按照截面公式即可推算  $^9\text{Be}(d,p)^{10}\text{Be}$  反应总截面。结果列于表 1。

表 1  $^9\text{Be}(d,p)^{10}\text{Be}$  反应总截面

氘束积分通量 ( $\mu\text{Ah}$ )	样品号	样品厚度 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	氘束能量 ( $\text{MeV}$ )	$^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ ( $10^{-9}$ )	截面 ( $\text{mb}$ )
$110 \pm 1$	1	37.0	$8.5 \pm 0.3$	37.4	$189 \pm 6\%$
	2	37.4	$11.0 \pm 0.2$	22.3	$113 \pm 6\%$
	4	36.9	$15.0 \pm 0.1$	9.19	$47 \pm 6\%$

根据加速器质谱计的优越性能,对探测高能物理和核物理中发生的长寿命稀有事件有很大的潜力,我们计划对这台装置进行改进:在注入器增添快速交替注入稳定和放射性同位素的装置,并对有关部件和数据获取系统作相应的改动,以便更好的补偿因加速器不稳定造成的传输效率变化,提高实验精度,拓宽应用范围。

衷心感谢加速器室运行组全体同志给予的大力支持。

## 参 考 文 献

- [1] E. Friedland et al., *Z. Physic*, **267**(1974)97; Darden, Murillo and Sen, *Nucl. Phys.*, **A266**(1976)29.  
[2] F. Ajzenbery-Selove, *Nucl. Phys.*, **A490**(1988)1.  
[3] L. F. Liu, et al., *Nucl. Inst. Meth.*, **B52**(1990)298; X. W. Cheng et al., *Nucl. Inst. Meth.*, **B92**(1994)51.  
[4] Si Houzhi et al., *Nucl. Inst. Meth.*, **A328**(1993)207.

## Formation Cross Section of $^{10}\text{Be}$ Measured by Accelerator Mass Spectrometry Technique

Liu Lianfan    Cheng Xiaowu    Zhou Weinan

Hu Miaojun    Sun Guoyan    Wang Naxiu

(*Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

Received 26 July 1994

### Abstract

Accelerator mass spectrometry has ultra-high sensitivity and can be used to detect extremely low impurity contents in samples.  $^{10}\text{Be}$  is a cosmogenic nuclide. As a tracker, it has been widely applied to earth, environmental and cosmographic sciences.  $^{10}\text{Be}$  is a pure  $\beta$  emitter with low end-point energy and long half-life. Therefore  $^{10}\text{Be}$  formation cross section can hardly be determined by the method of measuring the radioactivity of the product nucleus. This article describes a method to determine  $^{10}\text{Be}$  formation cross section by AMS technique and discusses the possible applications of AMS to other rare event measurements in nuclear physics.

**Key words**  $^{10}\text{Be}$  formation cross section, accelerator mass spectrometry, cosmogenic nuclide.