

HI-13 串列加速器质谱测量中的粒子鉴别技术*

姜 山 蒋崧生 何 明 马铁军 郭 宏 杜舒宾 袁 坚 武绍勇

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 着重介绍中国原子能科学研究院的 HI-13 串列加速器质谱计装置的粒子鉴别技术。该装置于 1989 年建成,到目前可以完成自然界中 ^{10}Be ^{26}Al ^{36}Cl 与 ^{129}I 的测定,测量灵敏度达到 10^{-13} – 10^{-15} (同位素比值),探测限度为 10^5 – 10^7 个原子。

关键词 加速器质谱,粒子鉴别,同量异位素

宇宙射线成因核如 ^{10}Be ^{14}C ^{36}Cl ^{41}Ca ^{129}I 等,它们的半衰期在 10^3 – 10^7a 的范围内。测定这些核素对地球科学、考古学、海洋科学、天体物理、环境科学等许多领域的研究很有意义。

但一些传统的测量方法,如衰变计数法、中子活化法以及一般质谱法等,都因样品的需要量太大或者干扰本底太强等原因难以实现对它们的测量。随着加速器技术和粒子探测技术的发展,70 年代末、80 年代初,加速器质谱 (AMS) 技术以它多方面的优势迅速崛起^[1]。它提供了测定自然界长寿命、微含量的宇宙射线成因核的最佳方法。AMS 是一种高能质谱计,与普通质谱计的区别在于它是用加速器把离子加速到每核子几个 MeV 的能量,而普通质谱计的离子能量仅为 keV 量级。这样,AMS 在高能的情况下就能排除分子干扰,减少散射的干扰,还能够作粒子鉴别以消除同量异位素的干扰。因此它可以极大地提高测量灵敏度 (同位素比值可达 10^{-15} ,探测限度可达 10^5 个原子),同时还有样品用量少、测量时间短等优点。例如,用 AMS 测量地下水中 ^{36}Cl ,只需 1L 左右地下水样品,若 $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ 比值为 10^{-13} ,只需 10–20min 的测量时间。而采用衰变计数法,则需处理数吨重的地下水样品,当达到与 AMS 相同的测量精度时,则需要几十甚至上百小时的测量时间。

粒子鉴别是 AMS 测量中的关键步骤。本文着重介绍 HI-13 串列 AMS 测量中的粒子鉴别技术。

1 HI-13 串列 AMS 装置

图 1 为中国原子能科学研究院 (CIAE) 的 HI-13 串列 AMS 装置简图。

该装置可分为四个部分: (1) 离子源与注入器部分; (2) 加速器部分; (3) 高能磁分析与静电分析部分; (4) 粒子鉴别与探测部分。装置的详细介绍见文献 [2–4]。AMS 测量的程序如下: 首先把待测样品装入离子源,然后从离子源引出负离子流,经过质量分析选择后由注入器将选定质量的粒子注入到加速器进行第一级加速,待负离子进入到头部端电压处,由剥离器 (碳膜)

* 国家自然科学基金、核工业基金以及 CIAE 青年基金资助项目

收稿日期: 1996-01-10, 修回日期: 1996-08-13

剥去外层电子而变为正离子(此时分子被瓦解),随即进行第二级加速而得到数个 MeV 的粒子能量,再经过高能磁分析、静电分析进行动量 ME/q^2 和能量 E/q 的选择,以确定所要测定的离子,排除不需要的离子。

应当指出,束流经过高能磁分析与静电分析后,并不能排除与所要测定离子具有相同电荷态的同量异位素(例如,测量 ^{36}Cl 时不能排除具有相同电荷态的 ^{36}S);在测量重离子时,也不能完全排除与所要测定的离子具有相同电荷态的相邻同位素(例如,测定 ^{129}I 时不能完全排除具有相同电荷态的 ^{127}I)。同量异位素、重粒子相邻同位素与所要测量的粒子一同进入探测器系统,这就必须对粒子进行鉴别,从而排除其干扰,这在 AMS 测量中是十分重要的。

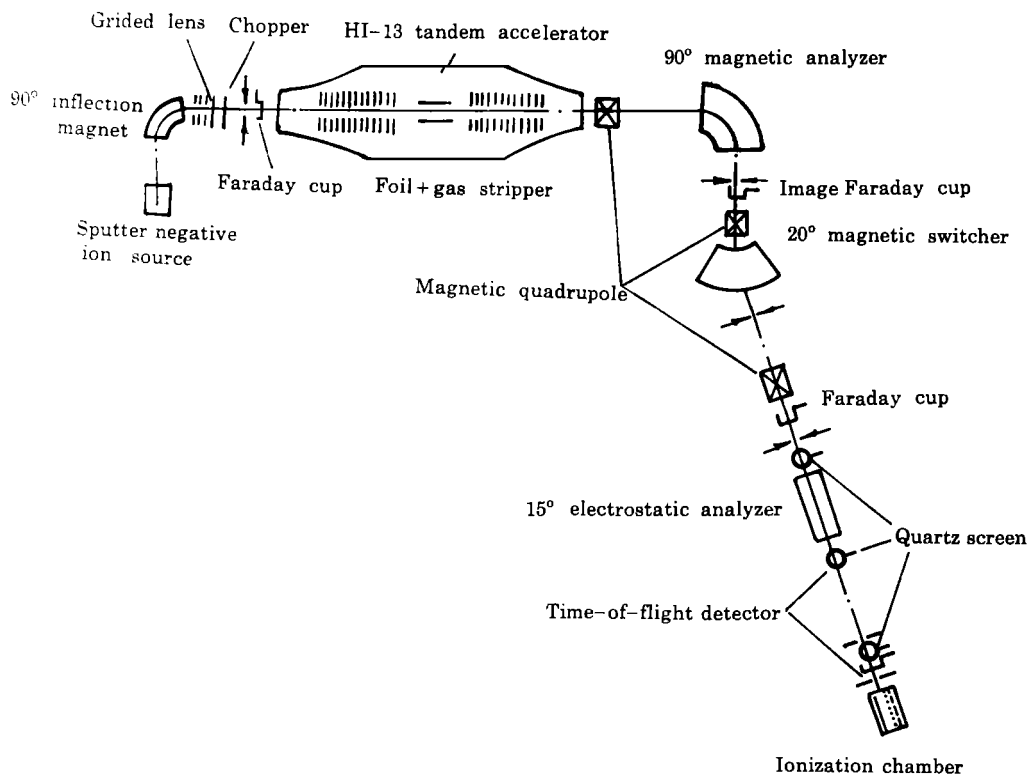


图 1 CIAE 的 HI-13 串列 AMS 装置简图

Fig. 1 Schematic layout of the accelerator mass spectrometry system using CIAE HI-13 tandem accelerator

2 HI-13 串列 AMS 测量中的粒子鉴别

根据离子质量的不同,我们采用三种不同的鉴别方法:对轻离子采用阻止吸收法;对中等重离子采用 $\Delta E-E$ 望远镜方法;对重离子采用飞行时间方法。前两种方法主要排除同量异位素的干扰,第三种方法主要是排除同位素的干扰。

2.1 阻止吸收法

AMS 测量中的轻离子主要是 ^3H ; ^{10}Be , 在测量中主要的干扰是同量异位素,例如, ^3H 测量中的干扰是 ^3He ; ^{10}Be 测量中的干扰是 ^{10}B 。

以 ^{10}Be 测量为例,实验中样品的化学形式为 BeO ,由于样品制备中不能完全排除 ^{10}B ,又因

为加速器的离子源内¹⁰B的存在,再加之在离子源BO⁻的负离子产生效率大于BeO⁻的产生效率,因此与¹⁰Be具有相同能量并与之一起到达探测器的¹⁰B比¹⁰Be的计数要高出10⁶–10⁹倍。这样高的相对数量在粒子探测时有两方面的困难:

(1)探测器与数据获取系统不能接受很高的计数(一般要小于10⁴s⁻¹);(2)¹⁰B计数的高峰掩盖¹⁰Be计数的低峰。实验中,利用¹⁰B离子在介质中的能量损失率大于¹⁰Be的特性,选用一种介质放在探测器的前面,该介质的厚度恰好使¹⁰B被阻止而使¹⁰Be穿过。图2(a)为28MeV的¹⁰Be与¹⁰B在氩气(×10⁵Pa)中的射程–能量损失率曲线。

图 2 AMS测量轻离子的粒子鉴别示意图
(a) 28MeV的¹⁰Be与¹⁰B在氩气(×10⁵Pa)中的射程–能量损失率曲线;(b)阻止吸收片与探测器

Fig. 2 Schematic drawing of light ion identification
(a) Energy loss of 28MeV ¹⁰Be and ¹⁰B in Ar gas as function of penetration depth; (b) The absorption film and detector

我们选取Ni膜(13.5mg/cm²)作为吸收片,同时又作为探测器的窗(见图2(b))。实际上由于吸收片的不均匀性,总有一定数量的¹⁰B穿过吸收片与¹⁰Be一起进入探测器。但我们可调节探测器工作气体压强,使进入探测器的¹⁰B大部分都被阻止在ΔE₁的灵敏区内而不被记录。这样绝大部分¹⁰B可被排除,剩下的与¹⁰Be

一起被记录在ΔE₂–E_T双维谱上(见图3)

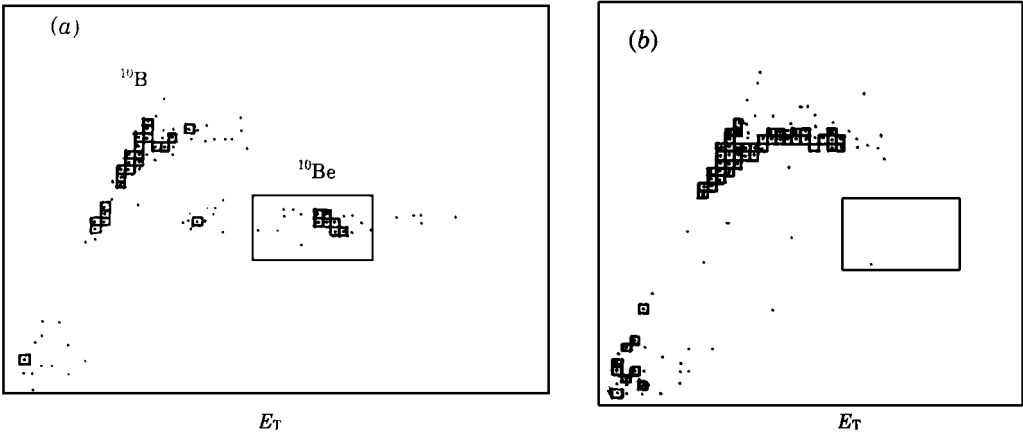


图 3 ¹⁰Be测量的ΔE₂–E_T双维谱
(a) 标准样品谱,¹⁰Be/⁹Be比值为1.5×10⁻¹¹; (b) 空白样品谱

Fig. 3 Two-dimensional plots of ΔE₂ versus E_T for ¹⁰Be measurements
(a) A standard sample with a ¹⁰Be/⁹Be ratio of 1.5×10⁻¹¹; (b) A blank sample

我们已采用这一鉴别方法成功地测定了锰结核中的¹⁰Be分布,并得到了锰结核的生长速率^[5]。

2.2 ΔE–E望远镜法

用AMS测定中等质量核素如³⁶Cl和⁴¹Ca,其干扰本底也来源于同量异位素(分别为³⁶S与⁴¹K)。由于这些同量异位素比待测核素的原子序数小,即在介质中的射程大于待测核素,故不

能采用阻止吸收法来排除它们。为此,我们采用 ΔE - E 望远镜法来鉴别同量异位素。

以 ^{36}Cl 测量为例,由于测量中样品形式为 AgCl ,在样品的化学制作中不可能完全排除 S ,离子源及样品靶锥中也不可能完全排除它。这样,经过加速器加速并由高能磁电分析后到达探测器的 ^{36}S 计数要比 ^{36}Cl 计数高出 10^3 - 10^6 倍左右。我们采用三分立阳极的 ΔE - E 气体探测器^[3]进行鉴别。由于相对多的 ^{36}S 计数,测量中 ^{36}S 尾巴”会落在 ^{36}Cl 的峰位上,给测量带来影响。为解决这一问题,我们一方面使探测器的电荷分辨本领达到最佳,具体做法是利用 Cl 和 S 能量相等并且单一的特点,在射程-能量损失率曲线上找到 Cl 与 S 的曲线交叉点(见图 4),当把 ΔE 选在这一交叉点位置上即可得到最佳的电荷分辨;另一方面采用多路探测(ΔE_1 , ΔE_2 , E_R 和 E_T)和多路开窗符合的办法以更有效地排除 ^{36}S 的影响。图 5 为测量得到的能谱。

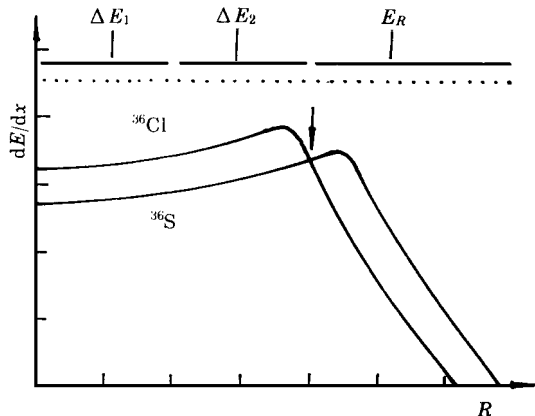


图 4 72 MeV 的 ^{36}Cl 与 ^{36}S 在氩气中的射程-能量损失率曲线以及探测器具有最佳分辨的阳极结构的设置

Fig. 4 Energy loss of 72 MeV ^{36}Cl and ^{36}S in Ar gas as a function of penetration depth and the construction of anodes with the best resolution

实验结果表明,采用如上所述的鉴别方法,

可有效地排除 ^{36}S 的干扰,成功地测量了 ^{36}Cl ,其测量灵敏度达到 10^{-15} 。

2.3 重离子飞行时间 (TOF)法^[6]

在 AMS 测量重核素如 ^{129}I 时虽不存在同量异位素的干扰,但却有相邻同位素 ^{127}I 的干扰,因为经过加速器加速以及高能磁分析器分析后,具有相等磁刚度 EM/q^2 的 ^{129}I 与 ^{127}I 都能进入 AMS 测量系统。由于两者的电荷态相等,因此两者的质能积 EM 也相等,因 ^{129}I 的质量比 ^{127}I 的质量大 1.5%,故 ^{129}I 的能量比 ^{127}I 的能量小 1.5%。由于两者的能量相差太小,仅用 AMS 的静电分析器不能将两者有效地分开,靠各种重离子探测器的能量分辨也不能将它们分辨开。为了排除 ^{127}I 的干扰,我们建立了飞行时间法,就可成功地测量 ^{129}I 。

我们研制了一套由微通道板 (MCP) 作为起始探测器,由半导体探测器作为停止探测器的 TOF 系统^[7],飞行路径为 2.0 m。用 ^{241}Am 的 α 粒子对该系统进行了测试,得到的最佳时间分辨

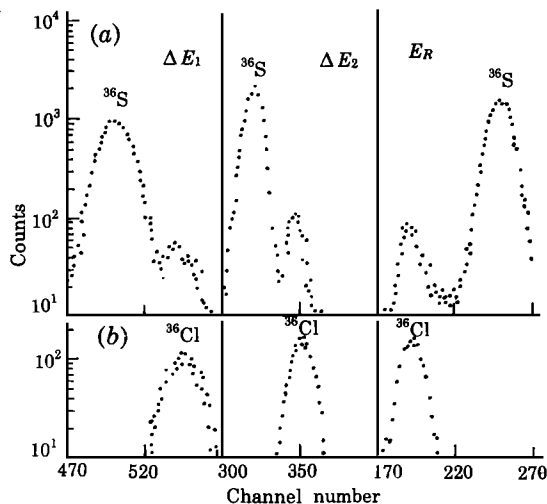


图 5 探测器 ΔE_1 , ΔE_2 , ΔE_R 测量到的 ^{36}Cl 与 ^{36}S 的能量损失谱

a) 未经过开窗的复合能谱; b) 经过开窗后的复合能谱

Fig. 5 Energy spectra of ^{36}Cl and ^{36}S using electrodes ΔE_1 , ΔE_2 and ΔE_R for a standard sample

(a) Ungated, (b) Gated for ^{36}Cl

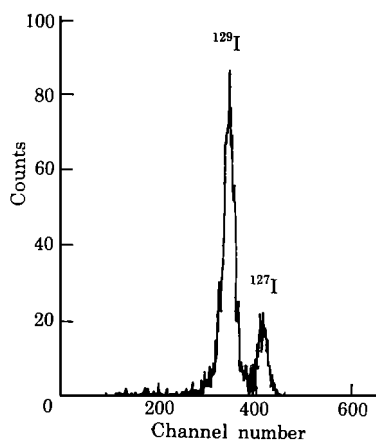


图 6 TOF谱仪测量到的 ^{129}I 与本底 ^{127}I 的飞行时间谱

Fig. 6 Time- of- flight spectra of ^{129}I and the background ^{127}I

为 220ps(FW HM)

用这套 TOF系统对标准样品和实际样品中的 ^{129}I 进行了测量,实际样品为欧洲某海域中的海藻样品,测量的同位素比值 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 为 1.2×10^{-9} ,与其它实验测定的结果相符合^[8]。图 6为 ^{129}I 标准样品的飞行时间谱,同位素比 $^{129}\text{I}/^{127}\text{I}$ 为 6.4×10^{-9} 。

3 小 结

利用 CIAE的 HI- 13串列 AMS装置,采用上述的粒子鉴别技术,可以完成 ^3H ^{10}Be ^{14}C ^{26}Al ^{36}Cl 和 ^{129}I 等多种宇宙线成因核的测量。近几年通过对 ^{10}Be ^{36}Cl 和 ^{129}I 的测量,已在许多领域开展了应用研究。对 ^{129}I 的测量,其灵敏度为 10^{-12} ,还没有达到最好水平。问题是现用作停止探测器的半导体探

测器在探测重离子时其性能变差,故下一步我们准备再用一套 MCP探测器作为停止时间探测器,预计可以将 ^{129}I 的测量灵敏度提高到 10^{-14} 。

参 考 文 献

- 1 蒋崧生. 物理, 1985, 14(8): 481
- 2 Tian Yamin, Guan Xialing, Qin Juchang, *et al.* Nucl Instr Meth, 1986, A244 39
- 3 姜山, 蒋崧生, 马铁军, 等. 原子能科学技术, 1991; 25(3): 40
- 4 蒋崧生, 马铁军, 姜山, 等. 原子能科学技术, 1991; 25(4): 29
- 5 Jiang Songsheng, Jiang Shan, Ma Tiejun, *et al.* Chin Sci Bul, 1992, 22 1873
- 6 Bow mun J D, Heffner R H. Nucl Instr Meth, 1978, 148 503
- 7 何明. 加速器质谱学中鉴别重离子质量的飞行时间法建立. 硕士研究生论文, 中国原子能科学研究院, 1995
- 8 Yiou F, Raisbeck G M, Zhou Z M, *et al.* Nucl Instr Meth, 1994, B92 436

Particle identification for HI- 13 tandem AMS measurements

Jiang Shan Jiang Songsheng He Ming Ma Tiejun
Guo Hong Du Shubin Yuan Jian Wu Shaoyong

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract

The particle identification techniques used in the accelerator mass spectrometry (AMS) system based on the HI- 13 tandem accelerator at China Institute of Atomic Energy have been introduced. With this system, ^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl and ^{129}I in natural samples were measured with a sensitivity of 10^{-13} — 10^{-15} (isotope ratio) and a detection limit of 10^5 — 10^7 atoms.

Key words Accelerator mass spectrometry, Particle identification, Isobars