

# 超灵敏小型回旋加速器质谱计 分析其它放射性核素的可能性探讨

卢相顺

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

**摘要** 探讨了 SMCAMS 除分析  $^{14}\text{C}$  外, 还可能分析的放射性核素主要有:  $^3\text{H}$ 、 $^{26}\text{Al}$ 、 $^{40}\text{K}$ 、 $^{14}\text{Tl}$  等。

**关键词** 放射性核素, 匹配

**中图分类号** TL 542

由于  $^{14}\text{C}$  分析是目前应用最多、最广的核素, 所以我们的超灵敏小型回旋 AMS 的目标首先是分析  $^{14}\text{C}$ 。但在我们的小回旋 AMS 上, 除了分析  $^{14}\text{C}$  以外, 仍有可能分析其它的放射性同位素。从理论上而言, 只要其分辨率能达到分辨某种放射性同位素及其相应的同量异位素 (Isobar) 和分子干扰, 就有可能对这些核素进行分析。从粒子的质量差异  $M / \Delta M$  (即所说的质量分辨率) 可以看出, 对质量数越大的核素, 分析时对质谱计的分辨率要求一般也越大。在成熟的串列 AMS 中, 对于不同核素的分析往往采用很不相同的方法和手段。在我们的小回旋 AMS 中, 对于不同核素的分析方法还需摸索, 本文给出初步的可行性分析及其放射性核素探讨<sup>[1,2]</sup>。

## 1 分辨率的限制

目前小回旋 AMS 所能达到的分辨率在 2000 左右, 即使采取某些手段以提高其分辨率 (即提高  $N \cdot h$  的乘积), 但现有的技术限制了其分辨率在很大程度上的提高。因为可允许的倍频次数 ( $h$ ) 跟磁场的等时性精度有着很大的关系,  $h$  越大, 对等时场精度的要求也越高。否则, 粒子在加速器中运行时的相移将很大, 就有可能使粒子进入减速区而无法加速。但由于测磁精度和垫补时机械加工精度的限制, 使等时场无法垫补到很高的精度, 从而也限制了倍频次数的提高。同样, 由于真空度的影响, 粒子在加速器中回旋的圈数越多, 损失的束流也越严重。特别是对质量数较大的核素, 它们的负离子的电离截面很大, 受损束流将更大。对  $nh$  允许值限制就排除了利用调制运行模式 (modulation mode) 提高分辨率的可能性<sup>[2]</sup>。当然, 不管是倍频次数还是回旋圈数, 在一定的程度上都仍有提高的潜力。

目前的等时场, 对于  $^{14}\text{C}$  在 16 次倍频下运行, 其中心粒子的相移计算值在  $\pm 16^\circ$  以内<sup>[3]</sup>, 调束表明接受相宽在  $36^\circ$  范围内。但理论上的加速相区却处于  $\pm 90^\circ$  范围, 因而, 如果把倍频次数提高一倍, 中心粒子的相移将仍有可能处于  $\pm 90^\circ$  以内。考虑到束流具有一定的发射度, 实际粒子的相移将比中心粒子大得多, 但总归有一部分束流被接受, 具有一

国家自然科学基金委员会资助项目

定的接受度。所以, 倍频次数有可能提高一倍。对于真空, 虽然 $^{14}\text{C}$ 在目前的真空下(当时为 $5 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ )损失了近 $1/2$ , 但对于具有较高自然丰度的核素, 虽然圈数增加时损失会更大, 但由于束流中该核素所占的比比较大, 流强较强, 最后剩下的束流仍能被有效地探测, 因而在分析该核素时增加圈数也是可行的。从分辨率角度考虑, 在没有较大的技术革新的条件下, 小回旋 AMS 要分析分辨率较 $^{14}\text{C}$ 大得多的核素, 如 $^{36}\text{Cl}$ 与 $^{36}\text{S}$  ( $M / \Delta M=29000$ )、 $^{129}\text{I}$ 与 $^{129}\text{TeH}$  ( $M / \Delta M=19000$ )等是困难的。

从离子源角度考虑, 由于有些放射性核素不能形成负离子, 这样, 就不能采用负离子进行分析。而采用正离子进行分析, 从原则上说若能把 SMCAMS 的全部电源极性反接就能分析正离子, 但由于其相应核素的同量异位素(Isobar)也大多能形成正离子, 使被测核素与其 Isobar 所要求的分辨率极高。如 $^{10}\text{Be}$ , 它不能形成负离子, 只能采用分子离子 $\text{Be}^{10}\text{-O}$ 和 $\text{B}^{10}\text{-O}$ 或正离子 $\text{Be}^{10+}$ 和 $\text{B}^{10+}$ 进行分析, 其要求分辨率在 17000 以上, 因而对其进行分析是很困难的。其它的这类核素还有:  $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{41}\text{Ca}$ 等。

## 2 注入、引出及频率匹配

在分辨率达到要求的前提下, 由于回旋加速器的技术特性, 要实际分析其它某一种核素, 还存在一些特殊的限制, 才能使粒子能够被顺利地注入、加速和引出加速器, 并被探测器有效地探测。我们小回旋 AMS 的注入半径、引出半径是固定不变的, 磁场虽然在一定的范围内可调, 但等时性精度却随不同的磁场值而有所不同。实际磁场测量和计算表明, 磁场较高时(相对于现磁场,  $I_B=70\text{A}$ ), 等时性精度仍能满足要求; 磁场较低时, 等时性精度略差。粒子要顺利地通过加速器这个分析器, 必需满足三个匹配条件<sup>[4]</sup>:

$$\text{注入匹配为 } (2M \cdot V_{inj} / q)^{1/2} = B \cdot R_{inj};$$

$$\text{引出匹配为 } E_r \sim (B_B \cdot R_{ex})^2 \cdot q^2 / M;$$

$$\text{频率匹配为 } f \sim 1.52 I_B \cdot B \cdot q / M。$$

式中,  $V_{inj}$ 和 $R_{inj}$ 分别为被加速粒子的预加速电压和注入半径,  $I_B$ 和 $R_{ex}$ 分别为磁场励磁电流和粒子引出半径,  $M$ 为分析离子的质量,  $q$ 为电荷。对 $^{14}\text{C}$ 而言,  $V_{inj} = 15\text{keV}$ , 引出能量( $E_r$ )和加速频率分别为 $48\text{keV}$ 和 $4.129\text{MHz}$ 。

由此可以看出, 如果磁场不变, 要求各核素( $q$ 相同)具有相同的注入和引出动量, 但注入和引出能量是不同的。较 $^{14}\text{C}$ 重的核素需要较低的注入能量, 较 $^{14}\text{C}$ 轻的核素则要求较高的注入能量。当然, 由于磁场可调, 使粒子的注入、引出能量也在一定的范围内可调。如果要在现有的设备上分析其它核素, 注入能量不能太高, 否则, 离子源电源及其它电源均需重新购置。另外, 较 $^{14}\text{C}$ 轻的核素要求较高的频率, 较 $^{14}\text{C}$ 重的核素要求较低的频率, 但现有的三角波发生器的频率带也限制在 $3\text{--}6\text{MHz}$ 范围内。对于引出, 较 $^{14}\text{C}$ 重的核素的引出能量较低, 较 $^{14}\text{C}$ 轻的核素的引出能量较高。由于单粒子微通道板探测器对 $50\text{keV}$ 以上的粒子探测效率较高, 如果经加速器引出的粒子能量太低, 探测效率将明显下降。

## 3 目前可以分析的几种放射性核素

在目前的 SMCAMS 状况下, 有下述放射性核素可能被分析, 它们是 $^3\text{H}$ 、 $^{26}\text{Al}$ 、 $^{40}\text{K}$ 和 $^{44}\text{Ti}$ 。

### 3.1 $^3\text{H}$

$^3\text{H}$ 的稳定同位素有 $^1\text{H}$ 和 $^2\text{H}$ ， $T_{1/2}=12.3\text{a}$ ，自然丰度极低( $10^{-17}$ )，其同量异位素为 $^3\text{He}$ ，不能形成负离子，因而可以容易地排除。主要的分子干扰是 $\text{HD}$ 和 $\text{H}_3$ ，要求的分辨率分别为510和400，为 $^{14}\text{C}$ 分析时的1/4，是一个较为容易分析的核素。但由于其自然丰度太低，给样品分析增加了一定的难度。小回旋AMS如果磁场不变，由匹配条件可知，其注入能量需70keV，远远超出了目前离子源及注入电源的量程，而且其加速频率和引出能量分别要达到19MHz及224keV，是三角波发生器和其它电源所不能允许的。从注入匹配还可以看出，如果磁场下降，那么，可以降低注入能量。但磁场的降低将导致等时场精度的降低，好在分析 $^3\text{H}$ 及其相应的分子干扰时的分辨率要求较低。如果我们把倍频次数 $h$ 减少到 $^{14}\text{C}$ 分析时的四分之一( $h=4$ )，那么，既能满足分辨率的要求，又减缓了对等时场精度的要求，使降低磁场变得实际可行。这样，在4次倍频下，假设 $^3\text{H}$ 的注入能量仍保持在15keV左右，此时的磁场将减少为32A左右，三角波发生器的频率为 $^{14}\text{C}$ 的0.5倍，即为2.2MHz，引出能量为 $^{14}\text{C}$ 的0.97倍，也即48keV左右。如果三角波发生器的频率嫌太低，可以取8次倍频，此时频率将变为 $^{14}\text{C}$ 的1.07倍，即4.418MHz。这样，不管是注入、引出还是频率都跟 $^{14}\text{C}$ 分析几乎一样，只是减少了倍频次数( $h=8$ )及降低了磁场，所有的电源及探测器等都可以在现有的设备上直接进行分析。同时， $^3\text{H}$ 质量低，在真空中的损失相对较少，这克服了由于其自然丰度低所引起的麻烦。因而，在小回旋上分析 $^3\text{H}$ 是可行的。我们曾用 $\text{TiH}_2$ 制成样品，测得了 $\text{H}_1$ 和 $\text{H}_2$ ，虽然未能测得 $\text{H}_3$ ，但已证明SMCAMS能分析 $^3\text{H}$ 。

### 3.2 $^{26}\text{Al}$

$^{26}\text{Al}$ 的稳定同位素为 $^{27}\text{Al}$ ，半衰期 $T_{1/2}=7.05\times 10^5\text{a}$ ，自然丰度为 $10^{-14}$ (比 $^{14}\text{C}$ 低两个数量级)，其同量异位素是 $^{26}\text{Mg}$ 。由于 $^{27}\text{Mg}$ 不能形成负离子，因而也可以用负离子加速的办法加以克服。其主要的分子干扰是 $^{25}\text{MgH}$ 及 $^{13}\text{C}_2$ ，所要求的分辨率分别为3700和1300。因而，要分析 $^{26}\text{Al}$ 核素，SMCAMS的分辨率稍提高就可以了。

提高分辨率只能增加回旋圈数或提高倍频次数。由于 $^{26}\text{Al}$ 质量较大，在目前的真空条件下，如果运行圈数再提高一倍，束流在运行过程中的损失将更大，同时使粒子的累积相移也增大，有可能使粒子进入减速相区。但不管怎样，圈数仍是在一定范围内增加的。如果倍频次数增加一倍可行的话(如前所述)，那么，分辨率就可以提高一倍。即使倍频次数增加不到一倍，但如果在倍频次数增加的前提下，同时适当地增加圈数，两者的结合也完全有可能使小回旋AMS的分辨率提高一倍。

从匹配条件看出，为了使 $^{26}\text{Al}$ 的注入能量不至于太低，我们可以抬高磁场。假设其注入能量仍保持在15keV左右，那么，此时的等时场应为95A，这对于稳流电源来说是可行的(最大可调到110A)，而且磁场的等时性精度也不会由于磁场的抬高而变化很大。如果我们采用倍频次数提高一倍的方法(即 $h=32$ )，此时三角波发生器的频率为 $^{14}\text{C}$ 分析时的1.5倍，即6MHz左右，这对三角波发生器而言是切实可行的。如果倍频次数降低一些，频率也将降低，将更切近于目前的工作频率。同时，引出能量为47keV，几乎跟 $^{14}\text{C}$ 分析时一样，将不至于影响探测器的正常工作。当然，倍频次数、回旋圈数( $D$ 电极电压)及等时场大小等都必需选择在一恰当的值，根据实际情况进行调节。这样，跟 $^{14}\text{C}$ 分析时一样，几乎不需作任何设备上的改进，就可以在现有的小回旋AMS上分析 $^{26}\text{Al}$ ，这对于样品的断代分析，使

小回旋 AMS 应用于生物科学领域, 如研究老年性痴呆症等, 具有相当广阔的应用前景。

### 3.3 $^{40}\text{K}$

$^{40}\text{K}$  的稳定同位素为  $^{39}\text{K}$ ,  $T_{1/2} = 1.25 \times 10^9 \text{a}$ , 自然丰度极高 ( $10^{-4}$ ), 其同量异位素  $^{40}\text{Ca}$  和  $^{40}\text{Ar}$  均不能形成负离子, 主要的分子干扰是  $^{39}\text{KH}$ , 要求的分辨率为 5700 (为  $^{14}\text{C}$  的三倍左右)。由于  $^{40}\text{K}$  的自然丰度高 (比  $^{14}\text{C}$  高出 8 个数量级), 因而运行中的损失相对而言是可以容忍的。这样, 使我们有可能较大幅度地降低  $D$  电压, 从而增加回旋圈数以提高分辨率。比如圈数可以增加至 150 圈 (为  $^{14}\text{C}$  圈数的  $3/2$  倍), 在此基础上, 如果倍频次数仍增加一倍, 这样, 整个小回旋 AMS 的分辨率就有可能达到增加 3 倍的目的, 从而使  $^{40}\text{K}$  的分析成为可能。从匹配条件得出, 如果我们把磁场提到最大 ( $I_B = 110 \text{A}$ ), 则其注入能量也可达到最大, 这有利于减少束流在运行中的损失。此时, 其注入能量约为 13keV, 频率约为 4.5MHz, 引出能量约为 41keV。因而, 只要束流在运行中的损失不是太大, 在现在的小回旋 AMS 上分析  $^{40}\text{K}$  是完全可行的。

### 3.4 $^{44}\text{Ti}$

$^{44}\text{Ti}$  的稳定同位素是  $^{48}\text{Ti}$ ,  $T_{1/2} = 47 \text{a}$ , 其同量异位素  $^{44}\text{Ca}$  不能形成负离子, 主要的分子干扰是  $^{43}\text{CaH}$ , 所要求的分辨率为 4900, 对其分析类同于  $^{40}\text{K}$ , 仍用 150 圈加速, 磁场值取 110A, 注入能量为 12keV, 三角波发生器的频率为 4.129MHz, 引出能量为 38keV, 也是较为可能分析的核素。

SMCAMS 由于分辨率的限制, 对于分辨率要求提高至目前 3 倍以上的核素, 就显得较为困难。如果采取一些有效的措施, 如分析正离子并采用调制加速的办法, 就可以较大幅度地提高其分辨率, 但由于真空的影响太大以及对等时场精度要求太高而很难实现。因而, 为实现在小回旋 AMS 上对更多核素的分析, 有待于对其进行有效的技术革新。

## 参 考 文 献

- 1 卢相顺, 陈茂柏, 李德明, 等, 核技术, 1998, 21(7):403  
LU Xiangshun, CHEN Maobai, LI Deming, *et al.* Nucl Tech, 1998, 21(7):403
- 2 CHEN Maobai, LU Xiangshun, LI Deming, *et al.* Nucl Instr Meth. 2000, B172:193

## Discussion of possibilities of analysing other radio nuclei in SMCAMS

LU Xiangshun

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

### Abstract

The possibility of analysing other radio nuclei, such as  $^3\text{H}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{44}\text{Ti}$ , in SMCAMS is discussed.

Key words Radio nuclei, Match

CLC TL 542