

超灵敏小型回旋加速器质谱计 交替加速的实验研究

陈茂柏

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘要 系统介绍了在 SMCAMS 中为了精确测量 ^{14}C 而采用过的各种交替加速类型。

关键词 交替加速

中图分类号 TL 542 A

^{14}C 分析必须测量碳同位素之间的比值, 如 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、 $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ 、和 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 。但是 SMCAMS 不可能同时加速或测量这些不同的粒子, 这些不同质量的粒子必须被交替地加速和测量。本文探索 C- 交替加速、S- 交替加速、F- 交替加速、H- 交替加速、A- 交替加速、X- 交替加速 6 种类型^[1]。

1 C(Carbon isotopes)- 交替加速

在 C 类交替加速中, $^{14}\text{C}^-$ 、 $^{13}\text{C}^-$ 和 $^{12}\text{C}^-$ 交替地被加速。但是, 在回旋加速器上进行交替加速要比在串列 AMS 上困难得多。在一般大回旋加速器上进行交替加速必须快速改变磁场, 这是很难实现的。在 SMCAMS 上, 虽然因为粒子能量很低, 相对论效应可以不考虑, 因此可以不改变磁场而进行交替加速, 但是, 按照轨道相似理论, 大多数的电源都要快速改变 15%, 因为 $^{14}\text{C}^-$ 和 $^{12}\text{C}^-$ 的质量差 15%。因而, SMCAMS 装置常常处在电参数快速变化的状态中, 这就正好与 SMCAMS 全部电参数必须保持高度稳定(因为 3 付注入和引出偏转板的形状与位置对束流的输运是非常临界的)的严格要求相矛盾。高频加速电压与它的频率的频繁和迅速地改变, 不可避免地围绕真空室的磁场线圈内引起电磁感应, 它严重地恶化了磁铁电源的稳定度, 使 $\pm 2\text{ppm}$ 稳定度的电源降低到只有 0.01%。这一电磁感应对磁场的影响实际上存在于一切回旋加速器中, 但长期被忽略而未被提及。因为在大回旋加速器中, 闭合的磁场线圈离加速 D 电极较远, 且被加速真空室隔离; 对磁场的稳定度要求也没有像小回旋 SMCAMS 要求的那么高($\pm 5\text{ppm}$); 又没有进行交替加速, 所以从未觉察到固有地存在着的电磁感应对磁场的微弱影响。国产电源在交替变化时, 必须等待 5-10s, 电压才能达到预设置值的 99.7% 范围内, (几台进口电源则只要 10ms 就能达到平稳), 所以目前 SMCAMS 只能进行“慢”交替加速。这就增加了测量样品的时间, 从而影响了测量精度。

上述几点因素大大地增加了 SMCAMS 提高测量精度的难度。一般测得 $^{13}\text{C}^-$ 和 $^{12}\text{C}^-$ 精度在

3%-5%。特别是在某些测量循环内, $^{13}\text{C}^-$ 和 $^{12}\text{C}^-$ 的束流值朝相反变化 (即一个增大而另一个却减少), 这就使两者的比值偏离很大, 许多数据必须去除掉。

2 S(Sample)- 交替加速

SMCAMS 对电参数的高稳定度要求与 C 交替加速时电参数必须快速且频繁的改变之间存在着不可调和的矛盾。于是我们试过一种所谓 S- 交替加速。全部电参数设置到最佳加速 $^{12}\text{C}^-$ 的状态, 先对全部样品反复轮换地进行 $^{12}\text{C}^-$ 测量若干循环, 直到重复性达到要求。后把全部电参数设置到最佳加速 $^{13}\text{C}^-$ 或 $^{14}\text{C}^-$ 的状态, 进行同样的测量。这种交替样品的测量方式是完全不同于普通意义下的交替粒子加速的测量方式。在每个测量循环内所测得的 $^{13}\text{C}^-$ 或 $^{12}\text{C}^-$ 的平均值的精度为 0.5%-1.5%, 二相邻测量间的重复性达到 1%-1.5%, 二相同样品的比值 $^{13}\text{C}^-/^{12}\text{C}^-$ 的平均偏离为 1.6%。问题在于这类交替加速方式延长了总的测量时间, 因为样品轮换次数增加了 2 倍, 所以它不适合于大量样品的同时测量。

3 F(Frequency)- 交替加速

为了避免交替地改变 SMCAMS 的电源电压, 我们试验了 F- 交替加速, 即交替地加速 $^{14}\text{C}^-$ 、 $^{13}\text{CH}^-$ 和 $^{12}\text{CH}_2^-$ 。因为它们三者的质量都为 14, 所以 F- 交替加速时, 只要改变高频频率, 而毋须改变其它电源。但是, 这类交替加速的实验做得不多, 因为: 1) $^{12}\text{CH}_2^-$ 束流一直比 $^{13}\text{CH}^-$ 的束流下降得快, 使得两者的比值 $^{12}\text{CH}_2^-/^{13}\text{CH}^-$ 在连续测量一个多小时后还是一直上升 (图 1)。2) 两者的比值 $^{12}\text{CH}_2^-/^{13}\text{CH}^-$ 的重复性差。3) F 交替加速基于这样的假设^[2], 即 ^{12}C 与 H_2 和 ^{13}C 与 H 相结合的机率是各自恒定不变的, 它与样品内部或周围的 H 含量变化无关。这样假设的根据是不确定的。

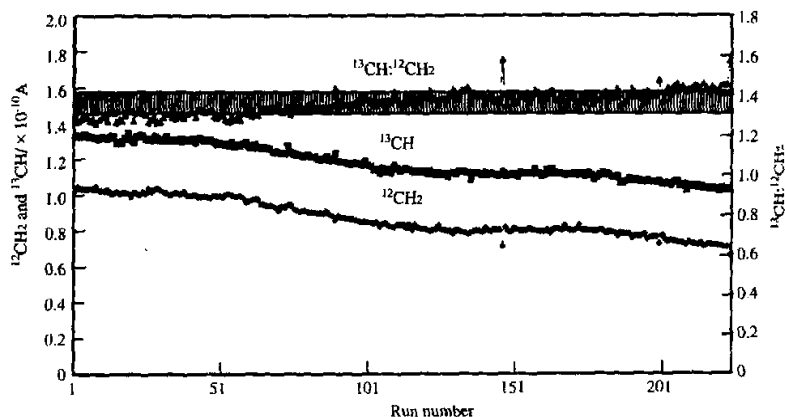


图 1 F- 交替加速时, ^{13}CH 、 $^{12}\text{CH}_2$ 束流和 $^{12}\text{CH}_2/^{13}\text{CH}$ 比值随测量循环次数的变化

Fig.1 ^{13}CH , $^{12}\text{CH}_2$ and $^{12}\text{CH}_2/^{13}\text{CH}$ versus cycle number during F-sequential acceleration

4 H(Hydride)- 交替加速

偶然地, 我们试验了 H 交替加速, 即交替地加速 $^{12}\text{CH}^-$ 和 $^{13}\text{CH}^-$ 。虽然是否比值 $^{13}\text{CH}^-/^{12}\text{CH}^-$ 能

够代表各种样品本身的比值 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 还是一个疑问,但是实验清楚表明,即使 $^{13}\text{CH}^-$ 和 $^{12}\text{CH}^-$ 的束流强度当 H 交替加速时迅速下降,但比值 $^{13}\text{CH}^-/^{12}\text{CH}^-$ 是很稳定的(见图 2),而且对于相同的样品是很一致的。

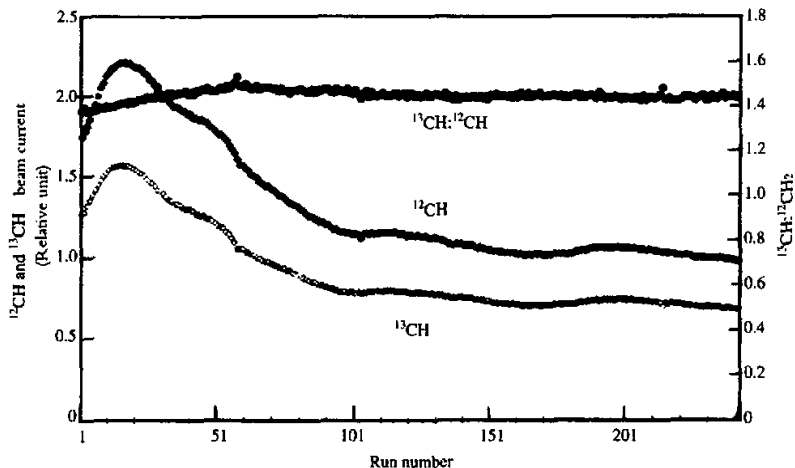


图 2 H-交替加速时, ^{13}CH 、 $^{12}\text{CH}_2$ 束流和 $^{13}\text{CH}/^{12}\text{CH}_2$ 比值随测量循环次数的变化

Fig. 2 ^{13}CH , ^{12}CH and $^{13}\text{CH}/^{12}\text{CH}$ versus cycle number during H-sequential acceleration

这些实验启发了我们,即如果粒子的束流强度非常弱,那测得的比值将是十分稳定的。这些实验也使我们记起了这样的事实,即,在 SMCAMS 加速器上的 $^{12}\text{C}^-$ 的束流强度从未能超过 750nA,即使 $^{13}\text{C}^-$ 的束流强度已达到 30nA(照理,相应的 $^{12}\text{C}^-$ 的束流强度应为 3000nA)。所以一些尚未清楚的因素,如强的 $^{12}\text{C}^-$ 的束流引起的大发射度,差的真空度或强的空间电荷效应^[3]必定已经限制和恶化了 $^{12}\text{C}^-$ 的束流强度。由于 $^{12}\text{C}^-$ 的这类分馏效应,导致所测得的比值 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的波动和不重复。

5 A(Adopted)-交替加速

我们试验了 A-交替加速,它只测量束流强度很弱的 $^{13}\text{C}^-$ 和 $^{14}\text{C}^-$ 。果然,这种交替加速得到了较为满意的结果(图 3)。这种 A-交替加速现被用来测量实际的样品。

为了进一步提高测量的正确度,我们觉得应把 $^{13}\text{CH}^-$ 中的 $^{13}\text{C}^-$ 也计算到测

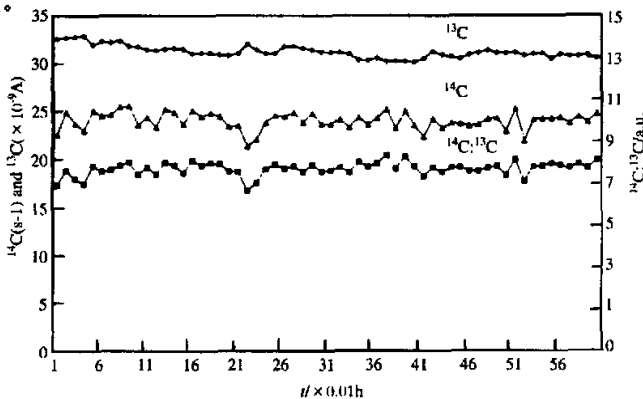


图 3 A-交替加速时, ^{13}H 、 ^{14}C 束流和 $^{14}\text{C}/^{13}\text{CH}$ 比值随测量循环次数的变化
Fig. 3 ^{14}C , ^{14}C and $^{14}\text{C}/^{13}\text{CH}$ versus cycle number during A-sequential acceleration where the maximum ^{14}C counting rate reached is about 25 cps measured in 60 cycles with each 40 s by consecutively rotating samples three times

得的 $^{13}\text{C}^-$ 中去, 因为由测量可知, $^{13}\text{CH}^-$ 约是 $^{13}\text{C}^-$ 的1%。虽然 $^{13}\text{CH}^-$ 和 $^{13}\text{C}^-$ 的传输效率不一样, 但通过标准样器的归一化, 这个误差非常小。所以我们准备修改程序, 把A-交替加速改为交替加速 $^{13}\text{CH}^-$ 、 $^{13}\text{C}^-$ 和 $^{14}\text{C}^-$ 3种粒子。

6 X(X ray)-交替加速

我们曾经试验过所谓X-交替加速, 即X射线引起的本底参与 ^{13}C 和 ^{14}C 一起交替加速。通过从测得的 ^{14}C (加X)谱线中减去测得的纯X谱线就得到纯 ^{14}C 的计数(图4)。这类交替加速不仅延长了约一倍的总测量时间, 而且还引进了较大的测量误差, 因为X谱本身的波动达到10%。所以这类交替加速特别不适合 ^{14}C 含量极低的古代样品。

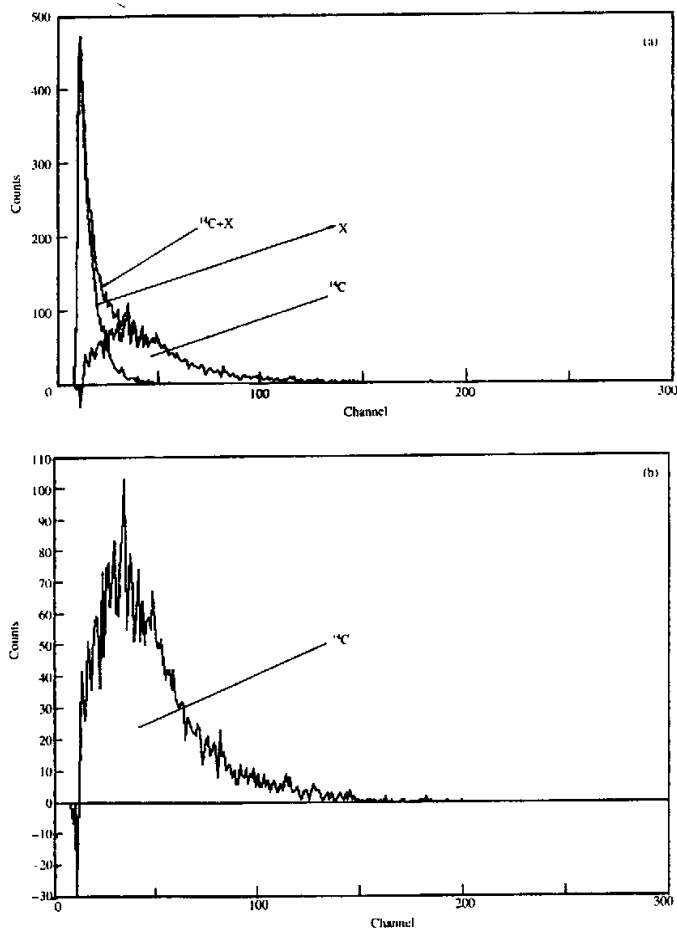


图4 X交替加速测得的($^{14}\text{C}+\text{X}$)谱线和纯X谱线(a), 两者相减得到的纯 ^{14}C 谱线(b)

Fig.4 The pure ^{14}C spectrum obtained from the subtract of both spectra(b). The $^{14}\text{C}+\text{X}$ spectrum and the pure X spectrum measured from X-sequential acceleration(a)

参 考 文 献

- 1 CHEN Maobai, LU Xiangshun, LI Deming, et al. Nucl Instr Meth. 2000, B172:193-200
- 2 张家骅先生私人通信
ZHANG Jiahua. Private communication
- 3 刘永好, 博士论文(1999)
LIU Yonghao, Thesis for Doctor (1999)

Experimental study of the sequential acceleration on SMCAMS

CHEN Maobai

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

Abstract

The various modes of the sequential acceleration on SMCAMS for precise measurement of ^{14}C particle are introduced.

Key words Sequential acceleration

CLC TL 542