

超灵敏小型回旋加速器质谱计的研制

徐森林 李德明 陈国生 沈立功 陈茂柏

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘要 国家自然科学基金重大项目,超灵敏小型回旋加速器质谱计的研制已按预定目标完成,其研究水平居国际领先地位.本文介绍其研制意义和背景,概述设计思想和总体方案,并就其创新学术思想和独特技术路线、以及进一步研究任务,作了扼要介绍.

关键词 加速器质谱计, ^{14}C 断代分析, 小型回旋加速器.

1 引言

加速器质谱计(AMS)是一门重要的离子束分析技术,是加速器应用的一个新领域.据1993年9月第六届国际加速器质谱会议报导,全世界约40家(我国也有3家)拥有串列加速器的著名实验室几乎都在从事AMS工作.每年分析的样品总数超过1万个. ^{14}C 的探测精确度已达2%.所需样品量降到几十微克.近年来,AMS的应用领域已从天文、考古和地球学科扩展到环境科学、材料科学和生命科学.

起初,AMS工作大都在大型回旋加速器上进行,但现有AMS绝大多数建于串列静电加速器.这是因为:(1)AMS探测宇宙线成因的核素(如 ^{14}C)的同量异位素(如 ^{14}N)大多无稳定负离子,故能大大降低对AMS的分辨率的要求.而现有大型回旋加速器均不能加速负重离子.(2)AMS断代应用时,必须交替加速被测放射性粒子与其相应的稳定同位素粒子,以测定它们的比值,如 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$.这在串列加速器中仅需交替变换少数电参数,而大型回旋加速器则需交替地快速变换磁场,这是很困难的.(3)现有的小型回旋加速器流强非常小,以至无法探测到极微量的被测核.十多年来,串列加速器AMS技术蓬勃发展,逐渐完善.但这种高能质谱计的致命弱点是建造和运行费用昂贵,即便是业已商品化了的2.5 MeV AMS专用小型串列加速器,售价也高

达数百万美元.这在很大程度上限制了AMS技术的更为广泛的应用.

超灵敏小型回旋加速器质谱计应用高次倍频加速技术,其质量分辨本领比普通回旋加速器提高十几倍.同时,它吸取串列AMS的优点,同样加速负离子,而且可以直接引出负离子.它具有一般回旋加速器的共振分析功能而又可以不改变磁场,只改变电参数实现快速交替加速.特别是,它的结构简单、体积小、能量低、造价低、运行费省、不需要专门土建和防护设备,可置于任何需要AMS分析的实验室中.

1985年上海所继美国Berkeley实验室之后也开始了超灵敏小型回旋加速器质谱计的研制.经详细计算和分析,否定了该实验室的技术方案,提出了自己的全新设计思想和独特技术路线.这一系列技术措施在现有回旋加速器上均无应用先例^[1,2].1989年,“超灵敏小型回旋加速器质谱计研制”课题被正式列为国家自然科学基金重大项目.中国科学院也给予该项目以重点支持.1993年3月,本所顺利完成了世界上第一台超灵敏小型回旋加速器质谱计的预定研制任务.

2 设计指导思想

鉴于绝大多数AMS分析的对象为 ^{14}C ,该小型回旋加速器专用于分析负碳离子.作为超灵敏质谱计的新型小回旋加速器,以提

高质量分辨率和探测灵敏度为目的,其技术特性和设计准则与大型回旋加速器有很大不同.我们的设计要求为:(1)超高灵敏度和质量分辨率,丰度灵敏度优于 10^{-12} ,且质量分辨率优于 2000.(2)小型化,最高磁场强度 $\leq 0.5\text{T}$,引出粒子能量 50keV ,整个主机重量 $\leq 5\text{kg}$.(3)应用强流负离子源,平顶传输外部注入.(4)负离子引出,外部低能单粒子计数.

(5)混合注入,交替单一加速不同粒子.

总之,要研制的新型小回旋加速器,要在提高束流强度的前提下,无需其它辅助分析手段,就能把 $^{14}\text{C}^-$ 和 $^{13}\text{CH}^-$ 区分开来.

3 总体方案

总体实施方案如图(1)所示.

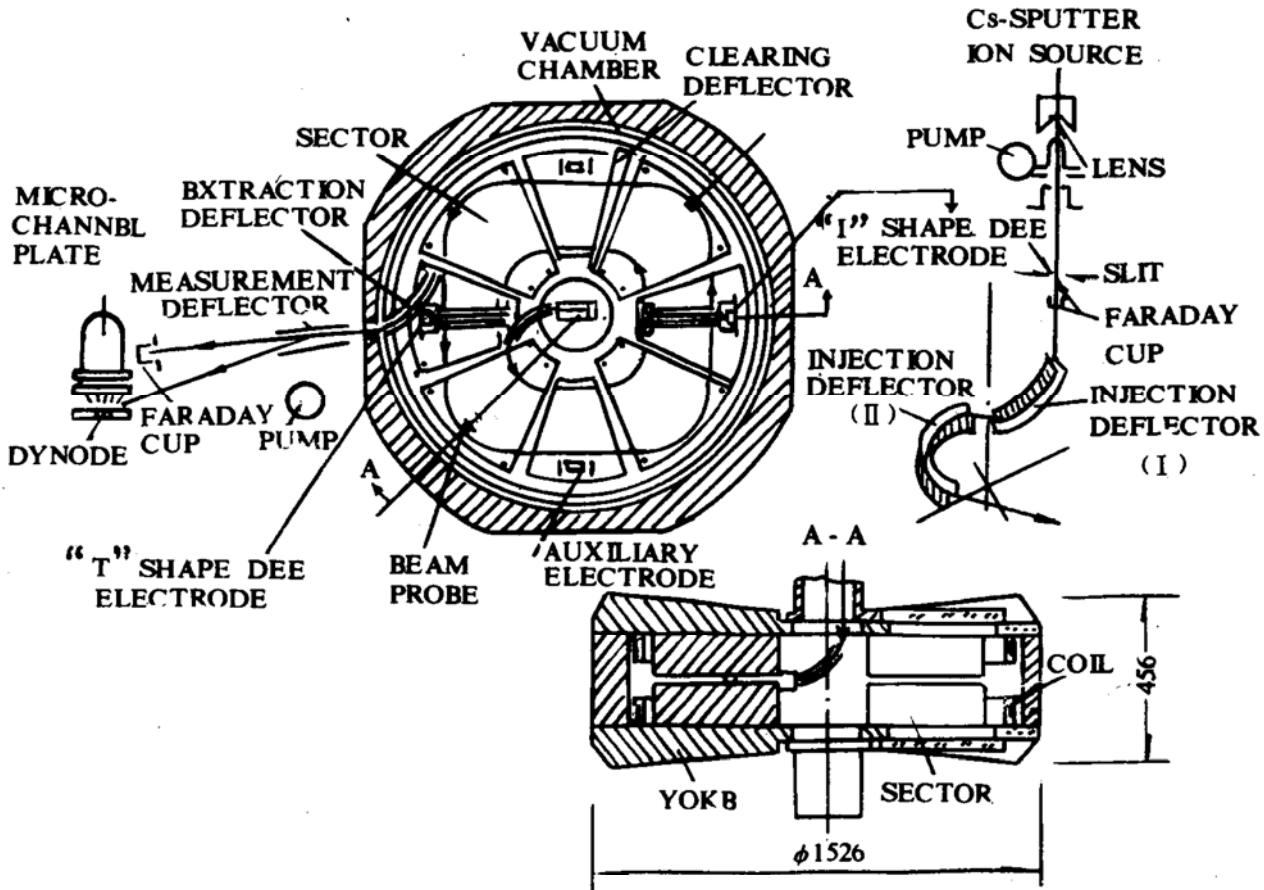


图1

3.1 外注入系统

负碳离子由 Middleton 型强流负离子源产生.由于小型化要求,省去了预分析磁铁.通常, ^{12}C 、 ^{13}C 和 ^{14}C 经过三膜片不等位透镜预加速和聚焦后,由两付球面静电偏转板将束流直接注入加速器.考虑到束流的轨道对中要求,在三膜片透镜和垂直静电偏转板之间配置了静电导向装置.

3.2 磁铁和加速系统

为了缩小主机体积和简化结构,在回旋

加速器中首次采用磁轭和真空室合为一体的结构,并使整个磁铁内外面镀镍.由于被加速粒子磁聚焦的要求,采用高调变度非均匀扇形磁铁结构.工作场强为峰区 0.37T ,谷区约 0.4T ,平均场强 0.23T ,磁铁高 40cm ,磁轭外径 1.58m .

扇形磁铁中存在体积较大的谷区空间,为 D 盒和注入引出偏转板的安装提供了方便.谷区低磁场降低了束流注入和引出的难度,提高了注入和引出效率.

3.3 引出和测量系统

经 100 圈加速后,到达引出半径的束流由一付 76° 的静电引出偏转板引出加速器,进入测量管道.引出束流经三单元四极透镜会聚后, $^{12}\text{C}^-$ 和 $^{13}\text{C}^-$ 束流由法拉第筒测量,微弱的 $^{14}\text{C}^-$ 则由随后的测量偏转板偏转 9°,引至微通道板电子倍增单粒子探测器进行计数.

4 创新的技术措施

50 年代,一些国家曾建造各类小型回旋加速器质谱计,但都以丰度灵敏度只达到 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ 而告失败.近几年来,美国 Berkeley 实验室的小型回旋加速器三改技术方案,至今尚未成功.究其失败的原因,是所有这些小型回旋加速器的粒子接受度太小.

我们从两个方面来改善加速器的粒子接受度^[3,4]:一是提高粒子在加速(分析)区的传输效率;另一是提高粒子的注入和引出效率.采用的独创性技术措施主要有:(1)采用三角波加速电压;(2)设计不对称的“I”和“T”状楔形微分加速电极;(3)引入辅助电极和变宽度电极以获得满意的圈间距;(4)结合两付球面形注入静电偏转板,而不是一般的反射镜或螺旋形偏转板,使注入效率比现在国际水平提高一倍;(5)选择磁轭与加速真空室合为一体的高调变度非电垫补的镀镍磁铁,而不是均匀磁铁,以提供粒子足够的聚焦力,又尽可能简化结构,节省费用;(6) ^{12}C 、 ^{13}C 和 ^{14}C 的同时混合注入和交替单一加速,以满足质谱计研究断代的要求;(7)研制“打拿极-微通道板”探测器,用作 ^{14}C 单粒子计数;(8)设置本底粒子禁区,以彻底排除干扰粒子.

5 研究进展与成果

1993 年 3 月 5 日,我们成功地在探测靶上测定了 ^{14}C ,这意味着世界上第一台超灵敏小型回旋加速器质谱计已基本研制成功.1993 年 6 月中旬,这一项目在上海通过了国

家自然科学基金委组织的鉴定和验收.国家自然科学基金委对本项目的总体评价优秀.鉴定委员会认为“项目组已建成了世界上第一台用高次倍频三角波电压加速负重离子的小型回旋加速器”,从已测得的初步数据表明,“世界上第一台用于 ^{14}C 断代研究的超灵敏小型回旋加速器质谱计研制工作在我国已经取得了重大突破,达到国际领先水平.”“项目组提出的一系列新颖物理设计思想和创新技术路线,均是我国在这一领域内的成功尝试.”1993 年 9 月在澳大利亚召开的第六届国际 AMS 会议的闭幕词上,把小型回旋 AMS 作为 AMS 第一条发展方向,并称为“回旋加速器 AMS 的复苏”.

上海所取得的学术进展和研究成果可归纳如下:

1) 建成一台世界上最小(小尺寸、低能量、低磁场、低功耗)、倍频次数最高(16 次倍频)、用三角波加速的回旋加速器.这是世界首台能加速负重离子的回旋加速器.在靶室处测得的 $^{12}\text{C}^-$ 束流已达 3×10^{-7} ;糖碳样品 ^{14}C 的频谱曲线见图 2, ^{14}C 计数率每分钟 100 个;本底 ^{13}CH 被抑制至 10^{-8} 以下,峰谷比达 4;用石墨样品的测量结果表明其本底水平为 10^{-15} ($^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$),质量分辨率约 3000(据测得的 ^{12}CH 和 ^{13}C 谱线及 $^{12}\text{CH}_2$ 和 ^{13}CH 谱线).

2) 改进了经典的回旋加速器等时性磁场的计算方法,使精度提高了两个数量级;揭示了高次倍频运行中的各种相位聚散现象和机制;掌握了适合于 16 次高倍频的等时性磁场的非电垫补方法;摸索了一套在小型回旋加速器上调试 ^{14}C 的方法.

3) 建成第一个磁铁与真空室合为一体的高调变度镀镍磁铁结构;研制成一台高频率(6Mc)、高幅度($V_{p-p} = 1\text{kV}$)三角波发生器;研制成“打拿极-微通道板”式单粒子探测器.

目前,上海所正在对这一台超灵敏小型回旋加速器质谱计作改进、完善.其束流传输效率和 ^{14}C 计数率还需进一步提高,需研制微

机 STD 控制系统,以实现¹²C、¹³C 和¹⁴C 的交替加速,还要研制光导控制的多样品离子源.此外,如何在小型回旋加速器质谱计上正确实现¹⁴C 分析,还需进一步摸索.总之,本所将

尽一切努力,使这一科研成果更好更早地投入实际应用,以促进生命科学、环境科学、地球科学、考古研究等领域的更大发展.

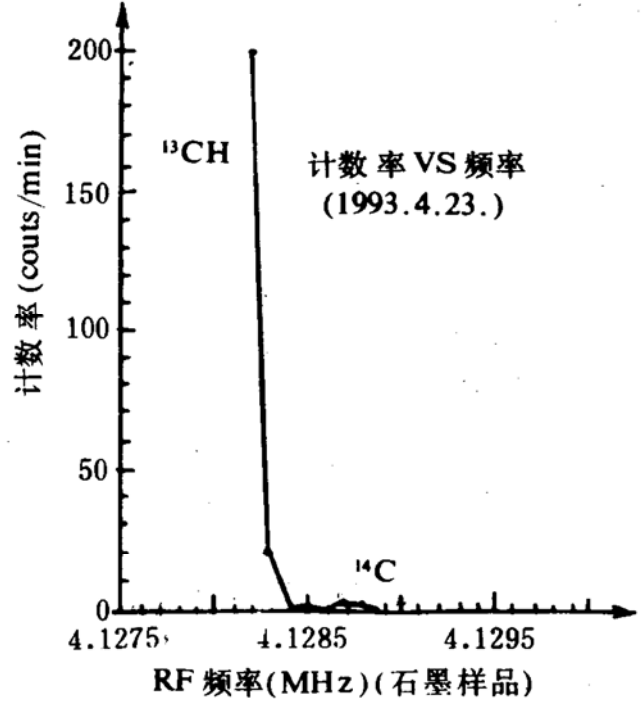
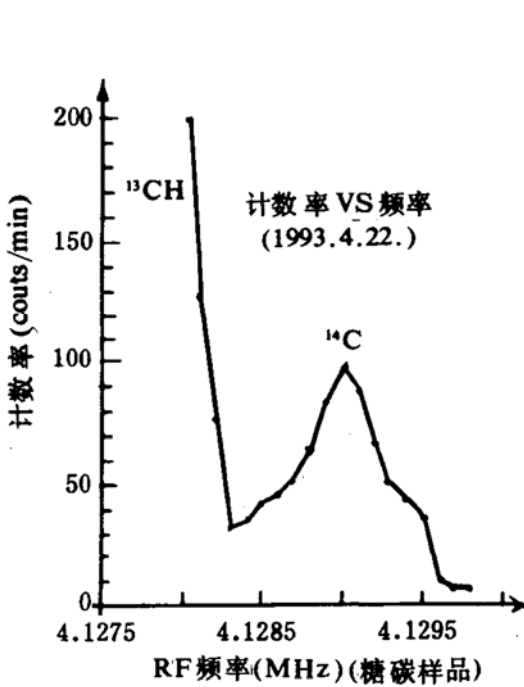


图 2

参 考 文 献

1 CHen Maobai, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1989, A278 : 402
 2 CHen Maobai, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1989, A278 : 409

3 CHen Maobai, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1990, A297 : 47
 4 Chen Maobai, et al. Proc. of 4th Sino-Japanese Conference on Accelerators, 1990
 5 Zhang Yingji, et al. Nucl. Instr. and Meth., 1991, A302 : 76

Super Sensitive Mini-cyclotron AMS Developed at SINR

Xu Senlin Li Deming Chen Guoshe Shen Ligong Chen Maobai

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

Abstract The paper reviews the recent achievement of developing a mini-cyclotron mass spectrometer (AMS) for ¹⁴C dating, a key project supported by National Natural Science Foundation of China and Chinese Academy of Sciences. The background and significance of the project are briefed. Features of the novel machine, the criteria of its design, the new ideas and unique technical approaches in developing the system are described. Further efforts are being made to improve the mini-cyclotron AMS.

Key Words AMS, ¹⁴C dating, mini-cyclotron.