

我国超灵敏小型回旋加速器质谱计的研制

陈茂柏

(中国科学院上海原子核研究所)

[摘要] 世界上第一台超灵敏小型回旋加速器质谱计的研制是国家自然科学基金“七五”重大项目之一,现已按预定目标完成,其研究水平居国际领先地位。本文系统地介绍了项目的立题意义和研制背景;概述超灵敏小型回旋加速器质谱计的技术特性和设计准则;综述该重大项目所提出的一系列创新学术思想和独特技术路线,列出所取得的学术进展和具体成果;提出进一步研究和商品化任务。

1993年6月中旬,国家自然科学基金会“七五”重大项目“超灵敏小型回旋加速器质谱计研制”在上海通过国家鉴定和验收。由国家自然科学基金会副主任陈佳洱教授签署的验收报告,对本项目的总体评价优秀。以学部委员方守贤和汪昌先为正、副主任的鉴定委员会认为,“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,达到国际领先地位。”“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。”上海市科技成果水平检索证明,该项目在总体上处于国际领先地位。几十年来,我们国家建造了数以百计的大小加速器,而本项目的研制成功开创了我国首建无国际先例的、具有中国特色的加速器。它将是加速器质谱计(AMS)技术的一个重大进展,并将开辟AMS技术的一个新的方向。

本文将系统介绍超灵敏小型回旋加速器质谱计立题的意义和背景;项目研究内容的难度和创新之处;总体调试情况和取得的成果;以及今后研究和商品化任务。

一、立项意义和背景

加速器质谱计(AMS)是离子束分析的一门新技术,是加速器应用的一个新领域,它是天文、地理和考古等一系列与年代学有关学科的重要研究工具,也是城市海港建设、地下水源和盐湖研究以及地震、地基和油田资料收集等的重要手段。自70年代末以来,AMS获得了迅速发展。近年来,AMS的应用领域已扩展到环境科学、材料科学和生物医学。

众所周知,一般常用的质谱计都是让被分析的样品粒子在均匀磁场内回转不到 360° 而被探测,如果被分析粒子能在磁场内回转100圈,那么质谱计的分辨本领就会大大增加。所以利用共振加速原理的回旋加速器照理应是最合适的超灵敏加速器质谱计,它的优点是质谱曲线上本底拖尾小。历史上,AMS确实是于1939年和1977年在一般的大型回旋加速器上首先进行的。但现在的事实情况却是,AMS绝大多数是在串列加速器上进行的。全世界约40家(我

本文于1993年9月6日收到

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。这是为什么呢?首先,AMS所探测的放射性核素(如 ^{14}C)的同量异位素(如 ^{14}N)中有很多是没有稳定的负离子的,通过分析负离子(如 $^{14}\text{C}^-$),就能容易地去除掉相应的同量异位素(如 $^{14}\text{N}^-$),故而能大大降低对AMS的分辨率的要求。但现有的大型回旋加速器都是不能加速负重离子的,而串列加速器恰好是得天独厚可加速负离子的。其次,AMS应用于断代时,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,以测定它们间之比值,如 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 。这在串列加速器中只要交替变换少数电源参数,而在大回旋加速器中还要交替地快速变换磁场,这是很困难的。所以,10多年来,AMS技术在现有的串列加速器上蓬勃发展,逐步臻于完善。现在美国USAMS公司已生产AMS专用的小型串列加速器。但是这种高能质谱计的致命弱点是建造和运行费用昂贵,无法推广应用,以致全世界数以千百计的需要使用AMS技术的单位只能“望器兴叹”。

本重大项目研制的超灵敏小型回旋加速器质谱计(SMCAMS)扬串列AMS的优点,抑大回旋AMS的固有缺点。它同样地加速负的被探测离子,而且可以直接引出负离子,不需要串列加速器中的电荷剥离过程。此外,它还能分析正离子;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,它的结构小、能量低、造价低、运行费省、不需专门土建和防护设备,因而可以安放在任何需要AMS的实验室使用。因此,SMCAMS具有潜在的开发前景,还有可能进入国际市场。

80年代初,美国Bekeley实验室首先报道了研制小型回旋加速器质谱计(Cyclotrino)。1985年底,在获得国内从事 ^{14}C 研究断代的单位对AMS技术迫切需求的信息后,我们就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,我们果断地否定了国外著名实验室的技术方案的可行性,提出了自己的完全崭新的设计思想和独特的技术路线。这一系列技术措施在现有回旋加速器技术中都是无应用先例的,因而,于1988年获得国家自然科学基金会数理科学部主任基金。1989年1月,经过二次论证和评审,“超灵敏小型回旋加速器质谱计研制”课题被正式列为重大项目。经50个月的艰苦奋斗,1993年3月胜利地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。

二、技术特性和设计准则^[1-9]

作为超灵敏质谱计应用的小型回旋加速器,其技术特性和设计准则与普通的大回旋加速器是很不相同的,归纳起来为:1. 超高灵敏度,2. 超低能负重离子分析,3. 高的倍频次数运行,4. 低的能量增益,5. 强的相位聚散效应,6. 弱的电磁聚焦作用,7. 外部平项注入,8. 外部低能单粒子计数,9. 交替加速不同粒子,10. 相继更迭各种样品。

总之,我们研制的是一台高接受度、高分辨率、用高次倍频加速的、小型化(小尺寸、低能量、低磁场、低功耗)的回旋加速器,而它所加速(分析)的是一种丰度极小、能量很低、行程较长和介离截面很大的超低能负重离子。这样一台低能质谱计的固有难度是很大的。

三、创新的技术方案

50年代,国际上曾出现过建造各式各样小型回旋加速器质谱计的热潮。但都以丰度灵敏度只达到 10^{-6} — 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,至今也尚未成功。究其失败原因,是所有这些小型回旋加速器的粒子接受度太小,即 ^{12}C 束

流强度太弱(10^{-15} A),以至无法测出 ^{14}C ,也就谈不上能否把 ^{14}C 和本底粒子分辨开。我们的创造性工作就在于想尽一切方法提高加速器的粒子接受度,即提高 ^{12}C 的粒子流强度。

我们从两个方面来改善加速器的粒子接受度: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。所采用的独创性新技术措施归结起来是:

1. 采用三角波而不是一般的正弦波加速电压,以改善高次倍频运行下的粒子接受度;
2. 设计不对称的“I”和“T”状楔形微分加速电极,而不是一般的D-假D结构,以减弱高次倍频运行时的相位聚散现象;
3. 引入辅助电极和变宽度电极以获得必要的圈间距,从而提高了粒子注入和引出效率;
4. 结合两付球形注入静电偏转板,而不是一般的反射镜或螺旋形偏转电极,使注入效率比现有国际水平提高一倍;
5. 选择磁轭与加速真空室结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,既提供粒子以足够的聚焦力,又尽可能简化结构,节省费用;
6. 调制频率和电参数,而不需调节磁场,实现 ^{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. 附加清除偏转板、测量偏转板和负离子源的多靶位装置,以确保交替加速运行时对本底干扰粒子的清除,以及对不同粒子的测量和传输效率定标,以提高分析正确度;
8. 研制“打拿极-微通道板”探测器,而不是一般的核探测器,用作单粒子 ^{14}C 的计数;
9. 设置本底粒子禁区,以彻底排除干扰粒子;
10. 把被探测的放射性粒子规划在平衡相位附近,以充分发挥三角波电压功能,改善束流品质。

上述技术措施在普通大回旋加速器上都是未采用过的,当然,与美国 Berkeley 实验室的技术方案也是完全不同的。而且,这些新的技术措施又引入了一系列新的技术难度。超灵敏小型回旋加速器质谱计的结构示意图见图1。

四、取得的学术进展和具体成果

1. 建成了世界上第一台用高次倍频三角波电压加速的负重离子回旋加速器。在靶室处测得的 $^{12}\text{C}^-$ 束流已达 3×10^{-7} A;轴向注入效率达到60%,超过国际先进水平一倍;从注入半径到引出半径的加速区传输效率达到20%,相当于在16次高倍频运行时,加速器的粒子接受相宽已达到 36° 以上,即负载因子达到10%。在精细调节和改进后,这些指标还能提高;

2. 世界上第一台超灵敏小型回旋加速器质谱计的研制取得了实质性重大突破,已成功地测定了糖碳样品的 ^{14}C 的频谱曲线,计数率为100个/分; ^{13}CH 本底被抑制在 10^8 以上,峰谷比达到3;用石墨样品的测量结果表明了其机器的本底水平相当于 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值为 10^{-15} ;此外,还测得了分辨率要求为3000左右的 ^{12}CH 和 ^{13}C 谱线及 $^{12}\text{CH}_2$ 和 ^{13}CH 谱线;

3. 系统地阐明了超灵敏小型回旋加速器质谱计的技术特性和设计准则,并以此为依据,提出了一系列行之有效的创新的技术路线;

4. 其它方面的成果:(a)改进了国际上经典的理论等时性磁场的计算方法,使精度提高了二个数量级;(b)揭示了高次倍频运行中的各种相位聚散现象和机制;(c)掌握了适合16次高倍频的等时性磁场的非电垫补方法;(d)摸索了一套在小型回旋加速器上调试 ^{14}C 的方法。

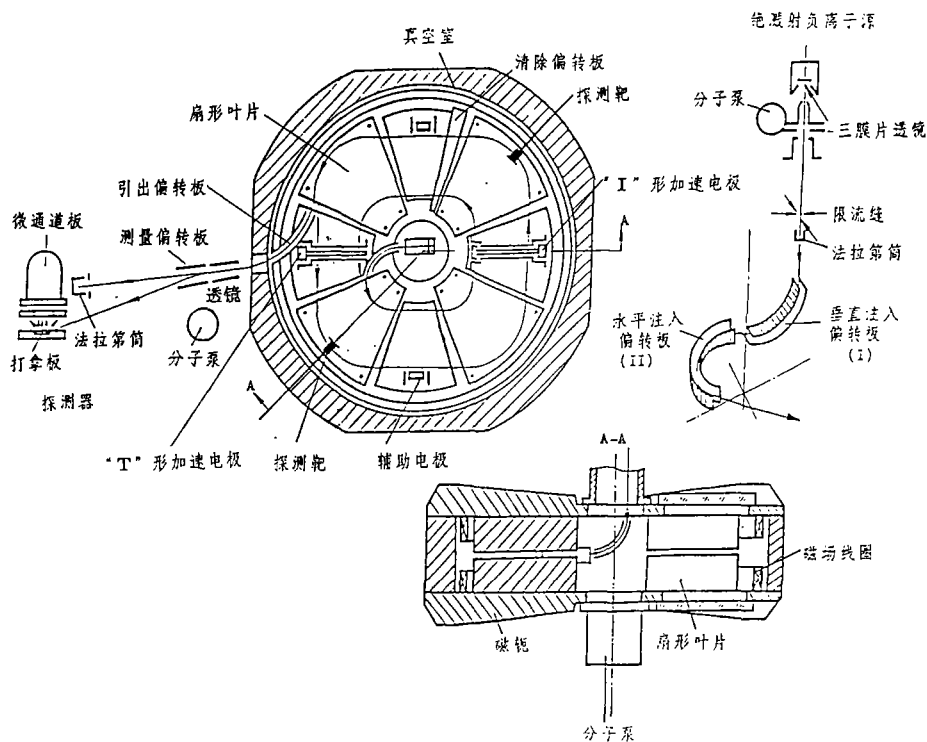


图1 结构示意图

5. 建成的设备和仪器:(a)建成了回旋加速器上第一个磁体与真空室结合一体的高调变度镀镍磁铁结构;(b)研制成一台高频率(6MC)、高幅度($V_{P.P}=1kV$)三角波发生器;(c)研制成“打拿板-微通道板”构成的单粒子探测器。

五、进一步研究方向

可以认为,世界上第一台超灵敏小型回旋加速器质谱计已在我国基本研制成功。必须指出,它只是完成该重大项目规定的基础研究任务,即建立设备、验证我们提出的创新的学术思想和独特的技术路线,而这台 SMCAMS 现在还不能很好实用^[10]。一台实用的小型回旋 AMS 至少要达到 1—2% 的测量正确度,这就需要研究微机 STD 控制系统,以实现 ^{12}C , ^{13}C 和 ^{14}C 的交替加速;还要添置一台用光导控制的离子源多样品装置,以实现标准样品和待测样品的轮换测量;此外,对这台样机中目前存在的问题和不足,特别是传输效率和计数效率,还需进一步改进和技术准备。这样,方可使之更好地投入实际应用,加速其商品化进程。

参考文献

- [1] Mao-Bai Chen et al., Proc. of 11th Int. Conf. on Cyclotrons (1987), 660.
- [2] Mao-Bai Chen et al., Nucl. Instr. and Meth., A278(1989) 402.
- [3] Mao-Bai Chen et al., Nucl. Instr. and Meth., A278(1989) 409.

- [4] 卢相顺,中国科学院上海原子核研究所硕士论文(1992.6).
 [5] 龚培荣,中国科学院上海原子核研究所硕士论文(1991.6).
 [6] Mao-Bai Chen et al., Proc. of 4th Sino-Japanese Conference on Accelerators (1990).
 [7] 李德明,中国科学院上海原子核研究所硕士论文(1991.6).
 [8] Zhang Yingji et al., Nucl. Instr. and Meth., A302(1991) 76.
 [9] Mao-Bai Chen et al., Nucl. Instr. and Meth., A297(1990) 47.
 [10] Mao-Bai Chen et al., Collected Oceanic Works, Vol. 16 No. 1 (1993,4) 25.

THE MINI CYCLOTRON AS SUPER SENSITIVE MASS SPECTROMETER FOR ^{14}C DATING

Maobai Chen

(Shanghai Institute of Nuclear Research, Academia Sinica)

Abstract

The stipulated object of the project "The Mini Cyclotron as Super Sensitive Mass Spectrometer for ^{14}C Dating" has been completed. The facility (SMCAMS) is the first successful mini cyclotron AMS in the world. The peculiar features and criteria of the design of the mini cyclotron as AMS are listed. A series of new ideas and unique technical measures developed in this project are systematically described; the background and significance of the project are introduced; the academic achievement and the newly built devices are presented, and the further development is pointed out.

1993 年国家自然科学基金资助的前 20 所科研院所

金额单位:万元

单 位 名 称	资 助		获 准 率	
	项 数	金 额	项数(%)	金额(%)
中国科学院地质研究所	17	163.00	43.6	36.9
中国科学院物理研究所	22	156.60	62.9	25.2
中国医学科学院基础医学研究所	20	130.00	44.4	31.4
中国科学院广州地质新技术研究所	15	118.50	28.8	22.7
中国科学院地球化学研究所	15	117.50	26.8	19.9
中国科学院化学研究所	18	112.00	34.0	19.0
中国科学院力学研究所	14	103.50	50.0	23.4
中国科学院金属研究所	14	101.00	31.1	23.9
中国科学院地球物理研究所	9	100.50	34.6	29.8
中国科学院上海有机化学研究所	15	98.50	48.4	33.5
中国科学院空间科学与应用研究中心	11	88.50	30.6	24.9
中国科学院动物研究所	13	87.00	37.1	25.5
中国科学院长春应用化学研究所	14	86.50	30.4	20.9
中国科学院上海植物生理研究所	13	83.50	50.0	33.8
中国科学院高能物理研究所	15	83.00	65.2	19.9
中国科学院上海光学精密机械研究所	11	80.70	22.9	16.7
国家地震局地质研究所	8	79.80	28.6	22.7
中国科学院上海生物化学研究所	10	76.00	50.0	30.3
中国科学院生物物理研究所	11	74.50	39.3	29.7
中国科学院遗传研究所	9	73.40	36.0	27.3

(不含重点项目经费,统计数据截止至 1993 年 11 月底)

(综合计划局供稿)