

阿尔法磁谱仪

陈 和 生

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

一 阿尔法磁谱仪简介

阿尔法磁谱仪(Alpha Magnetic Spectrometer, 简称 AMS)是人类送入宇宙空间的第一个大型磁谱仪,于1998年6月2日—12日由美国发现号航天飞机搭载,成功地进行了首次飞行,并将于2003年送到阿尔法国际空间站上运行3到5年。阿尔法磁谱仪是丁肇中教授领导下的一个大型的国际合作科学实验项目。这项雄心勃勃的研究计划的主要目标是寻找太空中的反物质和暗物质,探索天体物理、粒子物理和宇宙论的重大疑难问题。包括美国、中国、俄国、意大利、瑞士、德国、芬兰等10多个国家和地区的37个研究机构的物理学家和工程师参加了这个计划。中国科学院电工研究所、高能物理研究所和中国运载火箭技术研究院等单位参加了这项重大的国际科学研究的合作项目,并在其中发挥了关键的作用。

二 阿尔法磁谱仪的物理目标

阿尔法磁谱仪实验包括三大主要物理目标,它们反映了当今物理学和天体物理学最重要的基础理论之谜。这三大物理目标分别是:寻找宇宙中的反碳核、反氮核及其他更重的反核来确定宇宙中是否存在反物质;寻找宇宙中可能存在的暗物质;精确测量宇宙中各种同位素的丰度和高能 γ ,并探索未知的物理现象。

微观世界的粒子都存在相对应的反粒子,反粒子具有和粒子完全相同的质量和相反的电磁性质。反粒子由狄拉克预言,1932年在实验中首先发现了电子的反粒子——正电子。组成我们周围世界的物质的原子核是由质子和中子组成,带正电。所谓反物质,它的原子核是由反质子和反中子组成,带负电荷。

宇宙中是否存在反物质是科学的一大难题。根据目前公认的大爆炸学说,宇宙是由大

约在150亿年前的大爆炸产生的。大爆炸后,宇宙在不断地膨胀和冷却。大量的天文学观察和天体物理实验结果支持了这个理论。然而根据粒子物理理论,大爆炸理应产生同样数量的物质和反物质。迄今为止,所有的实验都没有在宇宙中观察到反物质的存在。宇宙中究竟是否存在反物质?这是目前粒子物理学家和天体物理学家关注的焦点之一。探测反物质的关键是必须把包括一个强有力的磁铁的探测器送入太空以测量宇宙中的原子核的电荷。几十年来,物理学家提出过各种方案企图将磁谱仪送入太空,但由于无法制造一个可以在太空运行的磁铁而未能如愿。中科院电工所利用多年来在研究核磁共振永磁体方面取得的丰富经验,提出了完全利用钕铁硼永磁材料的独特设计方案。它的磁场强,漏磁非常小,磁二极矩几乎为零,完全能满足AMS实验在空间运行的要求。丁肇中教授采用了电工所的设计方案。中国科学家和工程师研制出了人类送入太空的第一个磁铁,使物理学家几十年来的梦想成为现实。

当今天体物理和宇宙论的另一大难题是寻找暗物质。天文学的观察和研究发现宇宙中90%的物质无法用光学的方法探测到。天文学上把宇宙中用光学方法看不到的物质称做暗物质,暗物质的起源和组成长期以来一直是一个谜。超对称理论支持这样的观点,即暗物质是由弱作用荷粒子(Weakly Interacting Massive Particles, 简称WIMPs)组成的。这一理论可以用直接测量银河系环中的WIMP's的湮灭产物来验证。当暗物质粒子和反粒子湮灭时会产生质子反质子对、正负电子对和 γ 。AMS能精确地测量反质子能谱、正电子能谱以及高能 γ 谱。因此AMS将为解开困扰物理学家数十年的暗物质之谜提供非常重要的信息,进而有可能

给出这一极富挑战性的重大疑难问题的答案。

阿尔法磁谱仪能对宇宙线进行非常精确的测量并由此产生许多新的有意义的物理信息。宇宙线即来自太空的高能粒子，它们在大气层顶部产生簇射并击中地球。这些高能原子核已由无数的地面实验和大气实验进行了长期的研究。与这些实验不同，AMS 将运行在离地面三百多公里的太空中，从而能够探测到未和大气原子发生碰撞的原始的宇宙线。AMS 将测量不同同位素的比例，如铍-10 和铍-9 丰度比。由于铍-10 的半衰期约为 100 万年，如果丰度比高则说明绝大部分宇宙线很年轻，小于 100 万年，如果丰度比低则说明铍-10 在宇宙中飞行过程中大部分已发生衰变。AMS 能够对铍-10 和铍-9 丰度比进行高统计量高精度的分析，从而高精度地确定宇宙线在银河系中的禁闭时间，确定宇宙线穿过的天体物质的平均密度，从而确定宇宙线在银河系环中滞留的时间。

阿尔法磁谱仪还能对宇宙中其他各种同位素的相对丰度进行精确的测量。这些测量结果将会回答宇宙论和天体物理学中的许多重大问题。作为人类送入太空的第一个磁谱仪，这个实验很可能会有意外的重大发现。因此，阿尔法磁谱仪引起了世界各国科学家的极大兴趣。

它是目前在阿尔法空间站上计划的唯一的大型科学实验。

三 阿尔法磁谱仪的结构

阿尔法磁谱仪由永磁体和一组精密探测器两部分组成。图 1 显示阿尔法磁谱仪的内部结构。在永磁体产生的磁场中，带正电的粒子(正物质)向一个方向偏转，而带负电的粒子(反物质)向另一个方向偏转。永磁体内部的精密探测器测量粒子的动量、速度、电荷及粒子穿过探测器时的位置，从而鉴别出粒子的类型。实现 AMS 科学目标的关键是一个能在宇宙空间条件下运行的强磁体，以区分带电粒子的电荷的符号，精确测量它们的动量，并配合其他测量，识别粒子种类。能在空间条件下运行的大型磁体必须满足以下基本条件：

- 功率消耗低，不能高于数百瓦。
- 漏磁必须非常小，不影响航天飞机和空间站上各种仪器设备的正常运行。
- 磁二极矩必须非常小，不致于在地球磁场下产生转动。
- 能经受航天飞机起飞和着陆时的剧烈振动和巨大的加速度。

过去数十年来，物理学家一直期望能将磁谱仪送入宇宙空间，提出多种方案，但由于无法造

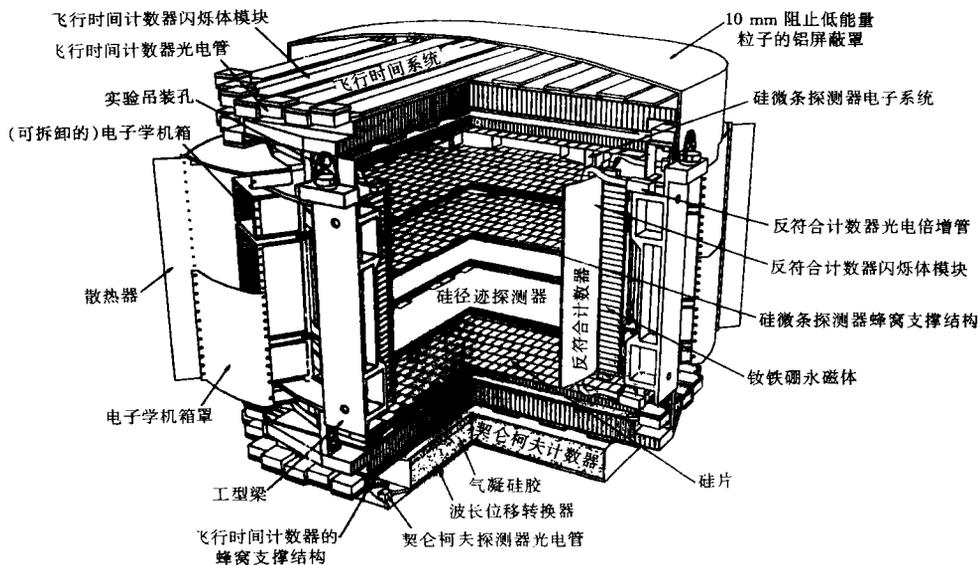


图 1

出满足上述条件的磁铁而无法实现。中国科学院电工研究所、高能物理研究所和中国运载火箭技术研究院设计和研制了 AMS 永磁体系统,并成功地进行了各项空间环境模拟试验,成功地研制出了人类送入宇宙空间地第一个大型磁体系统,完全符合美国宇航局的各项要求。这个大型磁体系统包括永磁体和机械结构两大部分。永磁体为圆柱形,内径 1114mm 高 800mm,中心磁场强度为 1370 高斯。机械结构支撑总重量为 3.2 吨的 AMS 磁铁和所有探测仪器。

AMS 内部探测器由以下部分组成:

1. 飞行时间计数器

飞行时间计数器由闪烁体和光电倍增管组成,在 AMS 的顶部和底部分别安装有两个平面,时间测量精度达一百亿分之一(10^{-10})秒。当粒子穿过谱仪时,飞行时间计数器记录粒子飞行的时间、距离和动量,从而确定粒子的质量。飞行时间计数器的作用为:

- 当粒子穿过谱仪时提供一级触发信号;
- 测量粒子的飞行速度,排斥上行(albedo)

原子核;

- 测量粒子的电荷量;
- 提供反符合信号。

2. 硅微条径迹探测器

AMS 的硅微条径迹探测器由 L3 实验的硅微条顶点探测器发展而来,共由六层圆形双面硅微条探测器组成,放在磁场中。硅微条顶点探测器用于精确测量带电粒子的动量矢量和粒子的电荷。由于 AMS 是通过测量带电粒子在磁场中的偏转来确定粒子的动量的,因此要求硅微条径迹探测器对带电粒子的位置测量有很高的精度。AMS 的硅微条径迹探测器的位置测量精度在偏转方向为 10 微米,在非偏转方向为 30 微米。这样的精度是前所未有的。

3. 切仑可夫计数器

切仑可夫计数器的主要作用是用来区分反质子和电子,正电子和质子。AMS 的切仑可夫计数器所用的介质为气凝硅胶。由于气凝硅胶的光折射率正好使高能电子在其中产生切仑可夫辐射而同时质子和反质子不会在其中发生切

仑可夫辐射,原因是电子的质量轻,质子和反质子的质量很重,因此,切仑可夫计数器可以很好地将同样带负电的电子和反质子区分开。

切仑可夫计数器由两层共 168 块气凝硅胶组成,每块气凝硅胶为 $11 \times 10\text{cm}^2$,分别和两个光电倍增管相联用于测量切仑可夫光。切仑可夫计数器安装在 AMS 探测器的最底部。

4. 反符合计数器

反符合计数器是由 16 个塑料闪烁体模块组成的桶状探测器,包围在硅微条探测器的外面。反符合计数器和飞行时间计数器配合用来排斥从 AMS 侧面进入或在探测器内产生的粒子造成的本底信号,这些本底粒子可能会在事例重建时造成混淆而将正原子核误判成反原子核。反符合计数器同时还排斥从探测器内部直接穿出 AMS 侧壁的粒子。反符合计数器的失效率必须小于 10^{-4} 。中国科学院高能物理研究所承担了反符合计数器初样的设计、研制、测试和空间环境模拟试验工作,并参加了它的设计、研制和测试。

5. 触发及数据采集系统

当 AMS 在太空中飞行时,进入探测器的粒子多达 10kHz。穿过 AMS 有效体积的粒子也将达到 500Hz。触发系统即为了从中选出这些粒子,根据粒子的电荷作初步的分类。根据这样的分类再尽可能高效率地选出我们感兴趣的粒子并排除掉本底粒子。AMS 采用了三级触发判选:

- 一级触发判选利用飞行时间选择仅有一个带电粒子穿过探测器灵敏区的事例;
- 二级触发判选通过检验硅微条探测器中的径迹击中点来排斥穿过带负电粒子径迹的带正电的粒子;
- 三级触发判选根据电荷符号和电荷量完成事例的分类并选择需要记录下来事例。

通过触发判选后的事例数据记录到计算机硬盘上,同时通过卫星的 Ku-波段传回地面上的 AMS 控制中心。

四 阿尔法磁谱仪电子学软件及地面系统

为了保证 AMS 能够可靠地采集、传送和分

析数据, AMS 设计开发了一整套复杂的电子学、软件、地面支持系统。这一系统是 AMS 的生命线, 担负监测控制探测器各部分的运行状态、从各个探测器采集数据并将数据传回地面等工作。

AMS 的电子学系统用来对探测器进行监视控制、数据采集和传输。这一系统由高能物理实验技术发展而来, 同时又要适应太空环境要求。对其进行了严格的加速度、振动、温度变化、真空、抗辐射以及电磁干扰等试验。为了保证数据采集的可靠性, 电子学系统采用了足够的冗余度。

AMS 的软件系统包括三部分, 分别是控制软件 (Onboard Software), 在线软件 (Online Software) 和离线软件 (Offline Software)。控制软件由监测和控制软件、数据采集软件和飞行控制软件组成。在线软件接收来自探测器各监控单元的慢数据流和探测器采集的物理数据流 (快数据流)。这些数据被用来进行事例分类分析并记录下来。在线软件同时还接收来自美国宇航中心的有关飞行器位置、速度等信息的数据, 这些数据将传送给控制系统对探测器进行控制调整。离线软件对从探测器采集到的物理数据进行分析处理以获得有趣的物理结果。另外, 离线软件还用来对探测器进行模拟并和实验数据作比较。

AMS 采集的数据首先通过 Ku-波段传送给数据通讯卫星, 再送回地面控制中心。地面控制中心对数据进行分析处理并对 AMS 进行操作。地面控制中心还和宇航控制中心保持联系。

五 阿尔法磁谱仪的首次飞行

阿尔法磁谱仪搭乘美国发现号航天飞机于 1998 年 6 月 2 日下午 6 时 8 分 (美国东部夏令时) 升空, 经过 10 天的成功飞行, 于 6 月 12 日下午安全返回肯尼迪空间中心。本期封底是从和平号空间站上拍摄的发现号航天飞机, AMS 在飞机的尾部。AMS 在首次飞行中工作正常, 探测器在升空后 3 小时开始正常工作。分析表

明 AMS 数据质量很好, 能正确区分各种粒子, 测量精度也达到了预期要求。AMS 观测到了原初宇宙线粒子, 包括质子, 各种原子核, 也看到了反质子。观察到的反质子并不等于观察到了反物质。反物质是指反氦核, 反碳核等。反质子可能是通常宇宙线粒子碰撞产生的次级粒子。

发现号航天飞机于 6 月 4 日下午 1 点与和平号空间站对接, 6 月 8 日中午 12 点与和平号空间站分离。此期间 AMS 继续采集数据, 没有任何影响。AMS 在整个飞行过程中共获取了超过 200 小时的数据, 约获得 3 亿个事例, 80% 左右为质子, 20% 左右为各种原子核。

通过对 10% 的数据进行的初步分析, 丁肇中教授 6 月 10 日在休斯顿的记者招待会上公布了一些初步的结果, 苏黎士联邦工学院的霍夫教授 6 月 12 日也在日内瓦欧洲核子中心作了 AMS 首次飞行的报告, 公布了一些初步结果, 引起物理学家的极大兴趣。中国研制的永磁体和机械结构经受了起飞和着陆的考验, 工作正常, 受到各国科学家的高度赞扬。

日前, AMS 已从美国运回欧洲进行全面的测试。AMS 的全部数据也已同四台大型计算机一起运回日内瓦的欧洲核子中心进行深入的分析。中国科学院高能物理所早已建立了分析 AMS 数据的环境, 并通过计算机网络获得数据进行分析, 相信会获得重要的物理结果。

六 阿尔法磁谱仪的未来

为了准备在阿尔法空间站上长期工作, AMS 将进一步改进性能, 增加新的探测器。改进后的探测器预计将于 2003 年用航天飞机送到阿尔法国际空间站, 运行 3 到 5 年, 实现其寻找宇宙中的反物质和暗物质的目标, 以及多项有关天体物理和宇宙论的重大物理问题的测量工作。中国科学院高能物理所的物理学家将承担如电磁量能器的研制等重要的工作以及后续的大量研究工作, 为 AMS 物理及高能天体物理的发展作出贡献。