

国际空间站上的 AMS 实验

杨 民 陈国明

AMS 实验

阿尔法磁谱仪 (Alpha Magnetic Spectrometer, 简称 AMS) 是国际空间站 (International Space Station, 简称 ISS) 上唯一的大型高能粒子探测器, 也是人类送入太空的第一个大型磁谱仪。AMS 实验是丁肇中教授领导的大型国际合作项目, 其科学目标是寻找宇宙中的反物质、暗物质及精确测量宇宙线的成分和能谱。参加 AMS 实验的科学工作者来自三大洲 (美洲、欧洲、亚洲) 的 16 个国家 (地区), 共有 60 个大学或研究机构, 600 多人。

AMS 实验分为两个阶段——AMS01 和 AMS02。第一阶段的探测器 AMS01 (图 1) 于 1998 年 6 月 2 日至 6 月 12 日搭载美国航天飞机发现号 (Discovery) 在距离地面约 400 千米的太空绕地球飞行了 180 个小时。因为当时国际空间站尚未建成, 而这样一个重达 3 吨的大型仪器搭载航天飞机发射升空是否安全, 在太空中的极端温度 (-65°C 到 $+40^{\circ}\text{C}$) 环境下能否正常工作都没有先例, 因此这次飞行是一次试验飞行。在这次短暂的试验飞行中, 出人意料地取得了一些重要的物理结果, 观测到三个意外的物理现象:

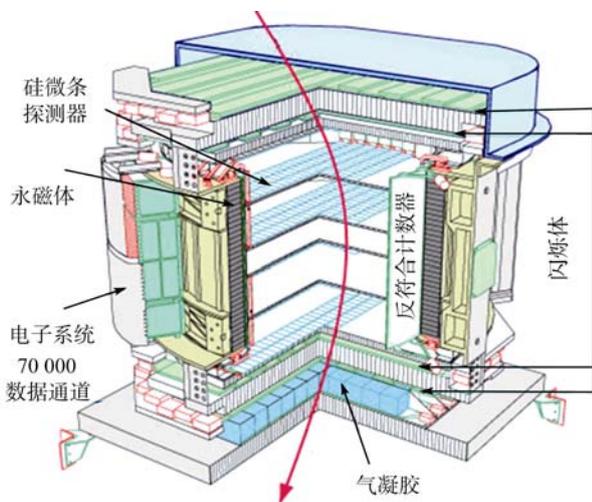


图 1 AMS01 探测器

1. 在赤道附近低纬度地区的 400 千米上空, AMS 探测器观测到大量能量在地磁场截止刚度以

下的低能质子 (图 2)。磁刚度是反映带电粒子运动轨道抗拒磁场影响的物理量, $R=pc/Ze$ (p 为粒子动量, c 为光速, Z 为电荷数, e 为电子电荷)。因为地球是有磁场的, 从宇宙空间来的带电粒子必须大于一定的磁刚度值, 才能沿某一方向入射到地球。这一磁刚度值称为该方向的地磁场截止刚度。图 2 是将几个不同纬度测到的质子能谱画在同一个图上, 其中的 θ_M 是地磁纬度 (数值从 $-\pi/2$ 至 $\pi/2$, 单位是弧度)。在图中的几个低地磁纬度 (θ_M 小于 0.9) 的质子能谱中, 由低能质子构成的第二能谱是出乎意料的, 它们不是来自原初宇宙线, 可能是高能宇宙线在大气中产生的次级粒子。

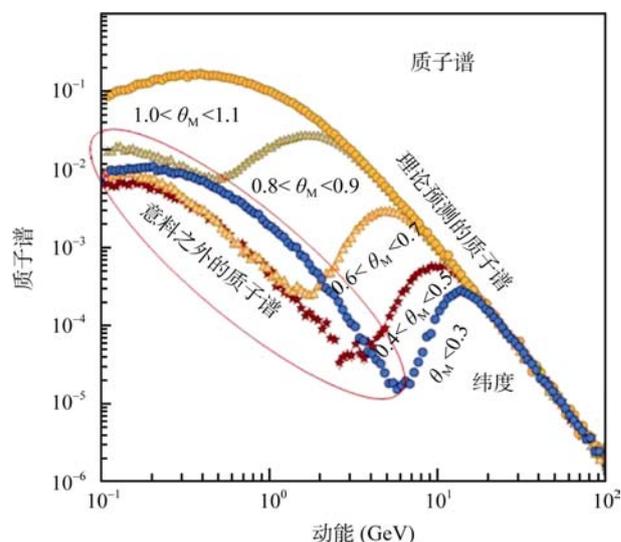


图 2 AMS01 测到的质子能谱
(图片来源: *Physics Letters B* 490, 27)

2. 在赤道附近低纬度地区的 400 千米上空, 观测到大量能量在地磁场截止刚度以下的低能正负电子, 并且正电子的数目约为电子的 4 倍 (图 3)。这个结果也是出乎意料的, 显示次级粒子的成因与宇宙线中正负电子的产生原因完全不同。

3. 在赤道附近低纬度地区的 400 千米上空, 观测到大量能量在地磁场截止刚度以下的低能氦原子核, 但它们几乎全都是氦 3; 而在极区附近, 氦 4 占氦原子核的主要部分, 即氦 3 和氦 4 是完全分开的 (图 4)。图 4 中, 地磁纬度从 -0.4 到

0.4, 能量在 3GeV 以下的区域中只有氦 3, 即在低纬度区有大量低能氦 3。而氦 4 则具有较高能量, 而且在较高纬度地区分布得更多。这是首次发现在赤道上空, 地磁场截止刚度以下有丰富的低能氦 3, 其来源不明。

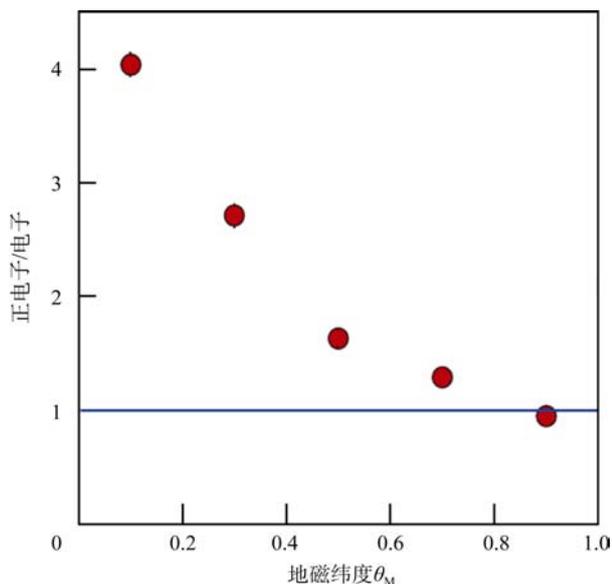


图 3 AMS01 测到的正负电子流量比
(图片来源: *Physics Letters B* 484, 10)

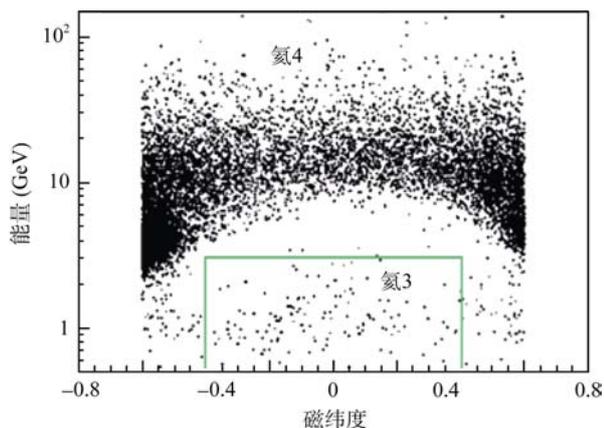


图 4 AMS01 测到的氦 3 氦 4 分布
(图片来源: *Physics Letters B* 494, 193)

AMS 实验的第二阶段——AMS02 探测器原定于 2003 年发射升空, 并在国际空间站上运行三到五年。但是由于哥伦比亚号航天飞机失事, NASA (美国国家航空航天局, National Aeronautics and Space Administration 的简称) 将 AMS 的发射时间一再推迟, 最终于 2011 年 5 月 16 日搭载美国航天飞机奋进号 (Endeavour) 发射升空并安装在国际空间站上

(图 5)。到目前为止, AMS02 探测器的各个部件都工作正常, 并源源不断地将获得的数据传回地面。对于测量数据的处理与分析也正在展开。与 AMS01 相比较, AMS02 具有更强的探测能力以及更长的运行时间。因此, 将会得到更丰富的成果。



图 5 AMS02 安装在国际空间站上

AMS02 探测器

AMS02 探测器 (图 6) 是在 AMS01 探测器的基础上做了重大改进, 增加了几个重要的子探测器。探测器的基本指标如下: 重量 7500 千克, 体积 60 立方米, 功率 2500 瓦, 平均磁场强度 0.134 特斯拉 (1 特斯拉等于 10^4 高斯), 轨道高度 300 千米, 轨道周期 90 分钟。

AMS02 探测器由几个子部分构成, 分别是: 磁铁、穿越辐射探测器、飞行时间探测器、径迹探测器、环形切伦科夫成像探测器、电磁量能器、反符合计数器、径迹室准直系统、星迹仪与全球定位系统, 电子学。下面简单介绍一下各个部分的结构及作用。

1. 磁铁系统 (Magnet)

磁铁系统是 AMS02 的核心, 它的作用是区分正负带电粒子, 从而区分正反物质、正负电子等。另外, 还能通过带电粒子径迹的偏转程度来测量动量。带电的正反粒子是质量相同而电荷符号相反的。区分粒子与反粒子最简单的办法就是让它们穿过一个磁场。电荷符号相反的粒子, 在磁场中的偏转方向相反。

AMS02 的磁铁是一个圆桶形永磁体, 内径 1114 毫米, 外径 1296 毫米, 高 800 毫米, 由 6000 块钕铁硼 (每块 2 英寸×2 英寸×1 英寸) 制成。它为探测器提供了 0.134 特斯拉的均匀磁场。

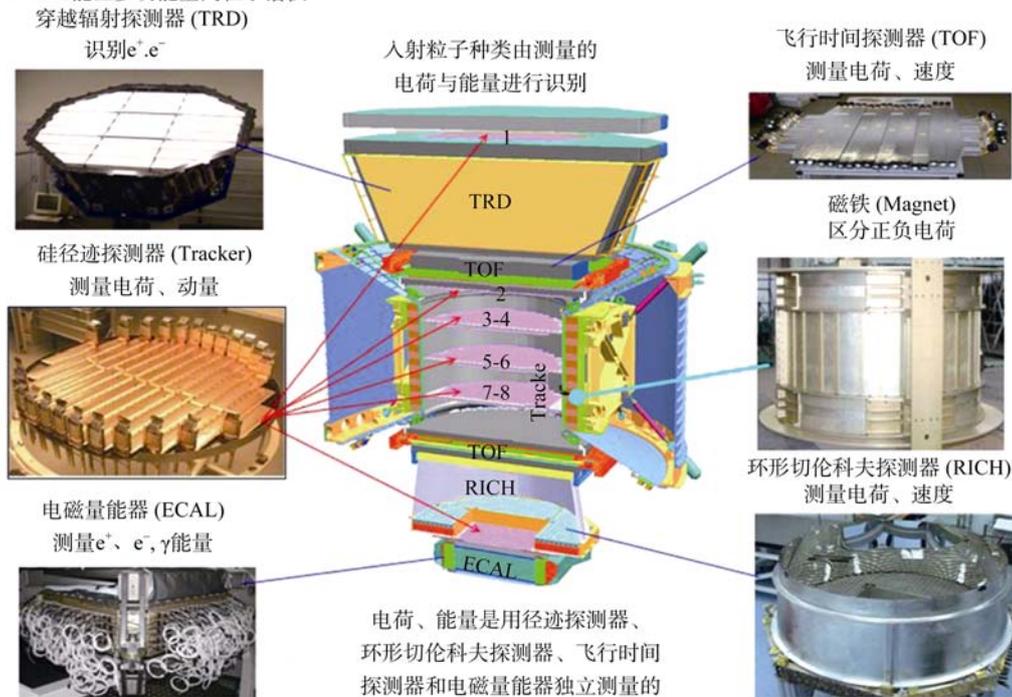


图 6 AMS02 探测器

2. 穿越辐射探测器 (Transition Radiation Detector, 简称 TRD)

穿越辐射探测器的作用是鉴别正负电子, 并将其与质子或反质子分开。当带电粒子穿过两种介电常数不同的介质交界面时会产生电磁辐射 (主要在 X 波段), 称为穿越辐射。

辐射出的 X 光能否被测到与粒子的种类有关。在穿越辐射探测器中, 可以测到正负电子辐射出的 X 光, 但是测不到质子或其他带电粒子辐射出的 X 光。因此, 通过穿越辐射探测器可以鉴别正负电子与其他带电粒子。

穿越辐射探测器主要由辐射体和光子探测器组成。AMS02 采用密度为 0.06 克/立方厘米, 直径为 10 微米的光纤作为辐射体, 用直径为 6 毫米的正比稻草管探测光子。正比稻草管内填充的是由 Xe 和 CO₂ 按 8:2 的比例混合成的气体。穿越辐射探测器共有 20 层, 每层有 20 毫米厚的辐射体和 14~18 个稻草管单元 (每个单元有 16 个稻草管)。

穿越辐射探测器能够达到 1000 倍的正电子/质子鉴别能力, 即能够在 1000 个质子通过时, 只有 1 个会被误认为是正电子。

3. 飞行时间探测器 (Time of Flight, 简称 TOF)

飞行时间探测器能够记录粒子进入探测器以及

穿出探测器的时间。飞行时间探测器测量的时间精度能达到 150ps (1.5×10^{-15} 秒), 上下两层的间距约 1.2 米, 因此, 飞行时间探测器能测量速度为 0.98 倍光速以下粒子的速度。

此外飞行时间探测器还有另一项重要任务, 扮演所有子探测器数据采集发起者的角色, 称为触发。粒子如果能够通过上、下飞行时间探测器, 说明粒子进入了阿尔法磁谱仪接受范围, 其他子探测器数据采集、处理、存储工作随之开始进行。此外由于飞行时间探测器的时间记录功能, 它能够非常准确判别带电粒子是从上往下进入, 还是从下往上进入探测器的, 并与径迹探测器协作, 判别经过探测器的粒子携带电荷的正负属性。AMS02 的飞行时间探测器由四层闪烁体平面构成。

4. 径迹探测器 (Tracker)

径迹探测器是 AMS 探测器最重要的组成部分。带电粒子经过磁场其方向会发生偏转弯曲, 带正电与带负电粒子经过磁场, 偏转方向相反; 速度越大的粒子穿过磁场偏转越小。径迹探测器能够测量粒子经过磁场的弯曲程度, 通过这种测量我们能够知道经过探测器的粒子的电荷符号, 以及粒子动量。此外, 径迹探测器与穿越辐射探测器、飞行时间探测器、切伦科夫探测器协同工作能够测量粒子所携

带的电荷量。

径迹探测器由 9 层探测平面构成，中间 7 层放置在永磁体提供的磁场中。每一层能够精确探测粒子在该平面的位置（精度约 10 微米），根据 9 层探测平面的位置信息，就能够精确得到带电粒子的方向，以及带电粒子在磁场中偏转大小。当粒子能量非常高，粒子则会在磁场中接近直线穿行，探测器就会辨别不出粒子在磁场中的弯曲。AMS 的最大探测刚度约为 2TeV (2×10^{12} 电子伏特)。

径迹探测器每一层探测平面由双面硅微条感应元件组成，感应元件由面积 72 微米 \times 41 微米，厚 300 微米的掺杂硅构成。上下表面由微小的铝条排列构成，并成 90° 交错，铝条之间间距 50 微米。当粒子经过硅感应片，产生电子空穴对（空穴为带正电的基本单元），在上、下表面电压作用下（80 伏），电子空穴朝上、下相反方向运动。电子空穴对在粒子穿过附近的铝条上产生电信号，通过铝条的信号能够判断粒子在探测平面的位置。而电信号幅度与电荷平方成正比，从而达到探测粒子电荷量和位置的目的。

5. 环形切伦科夫成像探测器（Ring Imaging Cerenkov Detector, 简称 RICH）

它的作用是高精度的测量粒子的速度。当带电粒子在某一介质中的运动速度超过光在该介质中的传播速度时，粒子会辐射出切伦科夫光。切伦科夫光的辐射方向与粒子的运动方向成一定夹角，角度的大小与粒子的速度成反比。

环形切伦科夫成像探测器是由辐射体、圆锥形的反射面和光探测平面构成的。带电粒子穿过环形切伦科夫成像探测器的辐射体后，辐射出切伦科夫光锥，在光探测平面上即为圆。在 RICH 侧面的反射镜可以增加光收集效率，经过反射的光，在光探测平面上则会表现为月牙状。通过模式识别找到属于同一个粒子的光环，从光环附近的感应单元重建出粒子的速度和入射角。粒子所带的电荷越大，产生的切伦科夫光越多，所以也可以重建出粒子的电荷大小。环形切伦科夫成像探测器的速度测量精度对于 $Z=1$ 的粒子为 0.1%， $Z>1$ 的粒子为 0.01%。电荷分辨率为 10%。

6. 电磁量能器（Electromagnetic Calorimeter, 简称 ECAL）

电磁量能器主要有两个方面的作用，一是测量

电子、正电子和伽马射线的能量，二是根据电磁簇射和强子簇射的差异，鉴别出宇宙线中的电子和正电子。

电磁量能器是由铅和闪烁光纤组成的取样型量能器，一共有 9 个超层（Super Layer），每个超层有 36 个光电倍增管（PMT）。ECAL 采用的是 4 阳极 PMT，即同一个 PMT 有 4 个阳极单元。所以每个超层有 2 (1 \times 2) 层（Layer），而每层有 72 (36 \times 2) 个单元（Cell）。为了实现 3 维的取样，ECAL 的超层在 X 和 Y 方向交错放置。其中 5 个超层(0, 2, 4, 6, 8) 的光纤沿着 X 方向排列，4 个超层(1, 3, 5, 7) 的光纤沿着 Y 方向排列。

当高能量的电子（正电子）或者光子穿过铅时，会产生许多能量稍低的次级电子或光子，而次级电子或光子又会产生更多的次级电子或光子从而形成电磁簇射。而质子则是发生不同的作用过程——强子簇射，它的形状与电磁簇射很不相同。当能量小于 1TeV (10^{12} 电子伏特) 时，电磁簇射的大部分能量都沉积在 ECAL 内，ECAL 信号与入射粒子的能量正相关，可以用于测量粒子的能量。对于 100GeV (10^9 电子伏特) 的电子，能量测量精度可以达到 2%。ECAL 可以重建出 3 维的簇射形状，从而区分电子和质子。ECAL 的正电子/质子鉴别能力可以达到 500，既在 500 个质子中只有一个会被误认为是电子。ECAL 也可以测量粒子的入射方向，对于 100GeV 垂直入射的电子，角度测量误差为 0.8°。

7. 反符合计数器（Anticoincidence Counters, 简称 ACC）

反符合计数器能够排除从侧面进入探测器的粒子。宇宙中穿行的粒子方向各不相同，探测器侧面进入的粒子不能有效地被测量。反符合可以降低这部分事例，从而减少探测器的数据量。粒子同探测器作用，特别是高能情况下会产生许多次级粒子，这些粒子也会影响探测器分辨能力，反符合会对此加以排除。反符合探测器由径迹探测器外面的共 16 个长条状闪烁体围成桶状。

8. 径迹室准直系统（Tracker Alignment System, 简称 TAS）

准确知道径迹室每个模块的位置是确定粒子径迹和测量刚度的前提条件。确定每个模块错位的过程即称为准直。硅微条的热胀冷缩效应，会导致不同温度时，模块的错位程度不同，所以需要模块

的错位和温度都进行监测。TAS 就是用于监测模块错位的一个系统。

TAS 提供激光来模仿直线径迹。径迹室可以重建出激光穿过的位置，与 TAS 提供的位置进行对比，从而通过激光扫描可以计算出每个模块的错位。

9. 星迹仪 (Star Tracker) 与全球定位系统 (Global Position System, 简称 GPS)

星迹仪用于确定 AMS02 在空间中的指向。星迹仪是由位于径迹室上方 2 个指向相反的 CCD 数码相机组成。AMS 的轨道周期约为 90 分钟，星迹仪每 10 秒钟对天空进行拍照，然后将照片以恒星分布图进行对比，从而计算出 AMS 在空间中的指向。

粒子到达 AMS02 的时间由两部分构成，一是 GPS 提供的时间，二是数据获取系统的内部时间。GPS 时间加上 DAQ(数据采集系统 Data Acquisition System 的简称) 的准确时间即为粒子的到达时间。

10. 电子学系统 (Electronics)

AMS02 的电子学系统约有 300000 道。数据采集量为每秒 7 Gbit。传回地球的数据量为每秒 10 Mbit。

以上介绍了各个子探测器的作用。实际上在探测高能粒子时，需要各个子探测器协同工作，利用综合的信息识别和测量不同的粒子。

宇宙中的高能粒子称为宇宙线，其中质子约占 89%，氦核约占 10%，其他的是重原子核及电子，光子占 1%。AMS02 探测器能够测量绝大多数宇宙线粒子。图 7 是不同粒子通过各个子探测器时的不

0.3 万亿电子伏	电子	正电子	质子	反氦	光子
穿越辐射探测器					
飞行时间探测器					
硅微条探测器					
切伦科夫计数器					
量能器					

(时间精度: $\Delta t=0.1$ 纳秒; 坐标精度: $\Delta x=10$ 微米)

图 7 不同粒子通过各个子探测器时的响应

同响应。可以看到，正负电子在穿越辐射探测器中有 X 光辐射，在飞行时间探测器中有信号，在径迹探测器(硅微条探测器)中向不同方向偏转，在环形切伦科夫成像探测器中有信号，在电磁量能器中形成电磁簇射；质子和反氦在穿越辐射探测器中没有信号，在飞行时间探测器中有信号，在径迹探测器(硅微条探测器)中向不同方向偏转，在环形切伦科夫成像探测器中有信号，在电磁量能器中形成最小电离或强子簇射；而光子分为两种情况：左边是光子产生正负电子对的情况，这时就相当于正负两个电子同时通过各个子探测器。右边是没有产生正负电子对的情况，只在电磁量能器中有信号。

AMS 实验的物理目标

AMS 实验的物理目标是寻找宇宙中的反物质、暗物质及精确测量宇宙线的成分和能谱。这几个目标都是当前宇宙学研究的热点问题。

反物质

物质是由质子、中子和电子这些基本粒子构成的，这些粒子称为正粒子，每一个正粒子都有一个反粒子与之对应。反粒子的概念源自于狄拉克方程，而后由很多实验证实。目前已经发现很多反粒子如正电子，反质子等。由反粒子组成的物质称为反物质。按照大爆炸宇宙学说，在宇宙创生时，正、反粒子的数量是相等的，所以应该形成等量的正、反物质。然而到目前为止，我们所观测到的宇宙都是由正物质组成的，没有发现反物质存在。因此，寻找反物质是当前宇宙学研究的主要目标之一。在实验中，我们最为关注的是寻找反氦。因为更轻的反粒子如反质子、反电子可以在次级相互作用中产生，也就是说它不一定是大爆炸时所产生的原初反粒子。而反氦只能是由大爆炸时产生的原初的反粒子组合而成的，也就是理论所预言的反物质。其他更重的反粒子比反氦更加稀少，更难寻找。AMS02 探测器可以测量反氦，而且有很高的精度，是目前最有希望找到反物质的实验。

暗物质

根据目前的天文观测，可见物质只占宇宙总质量的 4% 左右，暗物质占 23%，还有 73% 是导致宇宙加速膨胀的暗能量。可见物质主要由重子及电子组成，而暗物质到底是什么还没有定论。其中一个热门候选者是超对称理论所预言的中性伴子 (neutralino)。超对称粒子是无法直接探测到的，

但是理论预言，两个中性伴子湮灭会衰变为正反质子，正负电子或光子，可能会在宇宙线的反质子、正电子或光子的能谱中形成某种超出。因此我们可以通过测量反质子、正电子或光子来间接测量暗物质。目前测量宇宙线能谱的实验大部分都是地面或大气层中的实验，所测到的能谱主要是质子，无法单独测量电子或光子的能谱。有一些空间实验测量了电子或光子的能谱，其最高能量只有 100 GeV 左右，而且精度也不高。AMS02 探测器的电磁量能器测粒子能量可以测到 1 TeV，如果用径迹探测器测量带电粒子的动量可以达到 2 TeV，并具有很高的精度。如果在正电子或光子的能谱上发现了明显的超出，就有可能是发现暗物质的迹象。

精确测量宇宙线的成分和能谱

宇宙线的成分和能谱为宇宙的产生和演化，宇宙线的来源及传播与加速机制等问题提供了重要信息。因此精确测量宇宙线的成分和能谱对于解答宇宙学研究的相关问题具有重要意义。精确测量宇宙线的能谱还有一个重要作用，可以为寻找暗物质提供有力的帮助。如果暗物质就是理论所预言的超对称粒子，它们相互湮灭的概率也是很小的，所以湮灭后产生的正电子或光子的流量很低。我们所观测到的宇宙线粒子基本上都是来自可见物质的辐射，这些宇宙线粒子构成寻找暗物质的本底。通过对宇宙线能谱的精确测量，我们可以准确地知道宇宙线本底的谱型。那么，如果在这些本底的谱型之上有其他的分布（超出），就可以确定这是来自本底以外的粒子，即可能是来自暗物质。AMS02 探测器可以测量电荷小于等于 26 的各种粒子，并具有很高的粒子识别能力和能量测量精度。可以预期 AMS 实验将会在宇宙线的成分和能谱的测量上给出重要的成果。

中国科学家在 AMS 实验中的贡献

中国方面参加 AMS 实验的研究机构有：中国科学院高能物理研究所、中国科学院电工研究所、中国运载火箭技术研究院、上海交通大学、山东大学、东南大学、中山大学，并得到了国家自然科学基金委员会，科技部和中国科学院的大力支持。

AMS 实验的核心部件永磁体系统的设计、研

制、测试和空间环境模拟试验由中国科学院电工研究所、中国科学院高能物理研究所和中国运载火箭技术研究院共同承担。在 AMS01 和 AMS02 两个探测器上使用的是同一个永磁体系统。按照原来的方案，AMS02 计划使用超导磁铁，但由于技术上的原因，最终还是使用了 AMS01 上的永磁体系统。

中国科学院高能物理研究所和中国运载火箭技术研究院与意大利比萨（Pisa）大学和法国的 LAPP（Annecy）研究所共同承担了 AMS02 的电磁量能器（ECAL）的研制工作。中国组承担或参与的工作包括：电磁量能器物理设计；电磁量能器主结构的设计和建造；电磁量能器的空间环境实验；电磁量能器前端电子学性能研究和测量；电磁量能器触发系统研制；电磁量能器读出和数据获取系统研制；束流测试和束流测试数据分析；AMS 物理研究的蒙特卡罗模拟等。以上各项工作都得到圆满完成。

展望未来

随着 AMS02 探测器在空间站上的运行，AMS 实验的数据分析与物理研究正在全面展开。在今后的几年中，可以预期会有很多前所未有的成果展现在我们面前，为研究解决当前天体物理、粒子物理和宇宙学面临的若干重大疑难问题提供实验依据。

（中国科学院高能物理研究所 100049）



封面照片说明

2011 年 11 月 3 日凌晨 1 时 40 分，我国神舟八号与天宫一号对接成功。封面照片是天宫一号摄像头拍摄的天宫一号和神舟八号对接锁紧完成后的画面。这是我国首次航天器空间交会对接成功，具有里程碑式的意义，使我国成为世界上第三个独立掌握空间自动交会对接技术的国家。

封底照片说明

这是我国自主研发的组合式多种昆虫诱集装置，该装置包括：数字风速风向传感器，多种昆虫捕捉装置，捕鼠装置，昆虫数据网络传输与管理系统，太阳能供电系统，环境温湿度传感器，星雨传感器及记录仪等。该装置可广泛应用于农业、林业、机场、口岸、医院、学校及居民区等地区与场所。