

空间间接探测暗物质粒子

常进

(中国科学院紫金山天文台 210034)

在过去的几十年间,人类对于整个宇宙的认识有了飞跃式的发展,取得了辉煌的成就。基于近年天文观测的结果,一个暗物质⊕暗能量⊕暴涨的宇宙学标准模型被建立起来。我们的宇宙组成,如图1所示:已知的基本粒子只占整个宇宙的5%左右,而27%左右是不发光的暗物质,68%左右是类似真空能的暗能量。寻找暗物质粒子,研究暗能量的本质等,结合微观世界和宏观世界,结合粒子物理和宇宙学的研究已成为21世纪物理学和天文学的一个重要趋势。

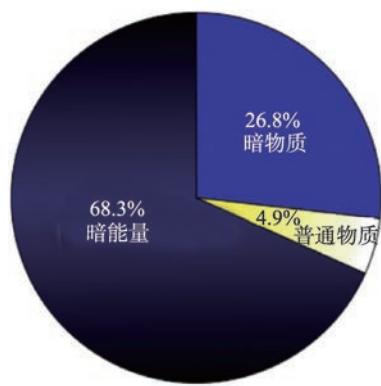


图1 宇宙的组成

在微观领域,人们建立了关于基本粒子的标准物理模型。这一理论告诉我们,目前已知的基本粒子是三代的夸克和轻子以及传递其相互作用的规范玻色子。然而,基于理论自洽性的考虑,人们普遍认为所谓的标准模型也只是一个基本理论在低能下的唯象描述。人们一直试图通过高能对撞机发现高能下的新现象,但到目前为止在对撞机上却没有发现任何新粒子,一切来自对撞机的实验数据都可以用标准模型准确地描述。然而,标准模型却不包含暗物质粒子。因此,反而是天文观测率先确定了暗物质的存在,发现了超越标准模型的新物理

现象。这也是粒子物理和天文观测必然会紧密结合的原因之一。

天文观测可能会发现对撞机上无法发现的新现象。这是因为在宇宙的早期,宇宙要经历一个高温的阶段。那个时候的粒子能量要高于现在已有的(甚至将来可能有的)一切对撞机的能量,新物理可能发生作用。因此我们可以认为早期宇宙是一个能量超出人类所能够达到的超高能对撞机,这个对撞机会撞出新的粒子并留下一些踪迹。暗物质有可能就是来自这样的新物理过程并在经历了宇宙大爆炸后遗留下来的。认识暗物质对于人类认识物质的基本结构和基本相互作用可能起到了非常关键的作用。

在天文观测方面,自从20世纪30年代暗物质的概念第一次提出后,随即得到了大量天文实验的证实。无论是星系、星系团还是整个宇宙的观测,人们都得到了暗物质存在的一致结论。然而,这些观测都源于暗物质的引力效应,因此无法确定暗物质的本质。暗物质其本质为何?究竟是什么粒子组成的?这些问题成为长期以来困扰人们的一个谜。

要探究暗物质的本质,只靠探测其引力效应是无法实现的。目前,为了了解暗物质的性质所开展的实验大致可以分为两类。其一称为直接探测实验,这类实验就是采用高灵敏度的探测器直接探测当暗物质粒子和探测器物质发生碰撞后所产生的信号。另一类实验称为间接探测实验,这类实验主要是通过探测暗物质自湮灭或衰变的产物来研究暗物质的本质。尽管我们对于暗物质的本质还不了解,但如果暗物质的确是由于宇宙早期的高温粒子碰撞产生,且随着宇宙膨胀遵循热退耦的演化过程,那么可以推断其反过程,即暗物质粒子湮灭到普通物质的过程也一定会发生。而且通过今天暗

物质的密度还可以大致推断宇宙早期暗物质粒子产生和湮灭的几率,即相互作用强度。由暗物质所产生的湮灭信号会叠加到普通的宇宙线本底上,一般其能谱不同于宇宙线本底的能谱,因此高灵敏度的实验有可能探测到这样的信号。间接探测实验最理想的探测对象是反物质粒子。这是因为暗物质湮灭或衰变通常产生等量的正、反粒子。而在宇宙空间,恒星、脉冲星、超新星遗迹、吸积中的黑洞等天体可以加速出各种宇宙线。能量足够高的宇宙线在星系中传播会与星际介质发生碰撞进而产生反物质宇宙线。但此类反物质宇宙线的流量显著的低于对应的正物质宇宙线的流量。因此,在反物质宇宙线中更易证认暗物质信号。为了可靠的区分正反物质,我们需要磁谱仪。丁肇中先生领导的阿尔法磁谱仪(AMS-02)项目正进行此类研究。但磁谱仪技术难度较高,耗资较大,探测器的能段范围也受到磁场强度的约束。由于宇宙线中的负电子和正电子之比在5~20倍左右,如果正电子能谱中有显著异常,那么对正负电子宇宙线总能谱的精确测量仍能证认出该成分。所以另外一种实验是通过探测宇宙高能(正负)电子来探测暗物质粒子,像我国的暗物质粒子探测卫星(悟空),日本的CALET就属于这类实验。

由于银河系存在磁场,高能带电粒子会在磁场中偏转,所以无法通过探测带电粒子得到暗物质的空间分布。要得到空间分布信息,需要伽马射线望远镜。通过观测 γ 射线线谱或者其他特异结构得到暗物质信号,并获得空间分布信息,像美国FERMI伽马射线天文台就属于此类实验。当然我国的暗物质粒子探测卫星也能观测 γ 射线,但其接收度比较小。不过暗物质粒子探测卫星能量分辨本领比美国的FERMI卫星高10倍,这对 γ 谱线的寻找比较

有利。

国际上空间暗物质粒子间接探测竞争比较激烈,表1列出了目前在天的暗物质探测间接实验。从表1中可以看到我国的暗物质粒子探测卫星“悟空”相比较于其他探测器,在能量分辨本领和接收度等关键参数上优势明显。

到目前为止,空间间接探测实验看到了一些暗物质粒子存在的迹象,但仍需要进一步的数据积累以及更高能量的精确测量,以确定这些信号究竟是来自于暗物质或是其他天体物理过程。

在早期的 γ 射线观测中,康普顿空间 γ 射线天文台上的EGRET望远镜发现银心 γ 射线在GeV处观测流量比理论模型高40%左右。有人认为该“超出”可能与暗物质有关。2009年FERMI卫星上天后证实该超出并不存在。HEAT气球实验在1994年到2000年之间对正电子能谱及正电子比例的测量显示在8GeV以上正电子有着不同寻常的超出。随后PAMELA卫星实验进行了更大能量范围的测量,结果显示,10GeV以上的正电子的比例比通常的宇宙线模型计算值要高出最多一个量级。PAMELA的测量结果引起了人们的广泛关注。2013年4月,AMS02实验公布了能量范围从0.5 GeV到350 GeV的宇宙线正电子比例谱的测量结果,其结果如图2所示,清晰地表明正电子比例存在超出。理论上人们发现,暗物质模型可以解释正电子比例的超出,但同时脉冲星模型也可以产生类似的结果,因此,究竟是哪种物理过程产生了这些超出的正电子,需要更高能量和更高精度的测量。

在电子的观测方面,2008年以中美科学家为主的ATIC探测器发表了宇宙高能电子观测结果。ATIC发现高能电子流量在300~800 GeV能区间与理论模型相比高了将近3倍。这些超出可以被解释

表1 各空间实验主要性能参数对比

实验(发射时间)	探测能区	观测对象	电子(γ)能量分辨	e/p鉴别	电子有效接收度 m^2sr
FERMI(2008)	1 GeV~1 TeV	γ 、电子	10%	10^{-3}	2.7
AMS02(2011)	1 GeV~1 TeV	正、负电子、反质子	2%~5%	10^{-5}	0.06
DAMPE(2015)	1 GeV~10 TeV	γ 、电子	1%	10^{-5}	0.3
CALET(2015)	1 GeV~10 TeV	γ 、电子	3%~5%	10^{-5}	0.12

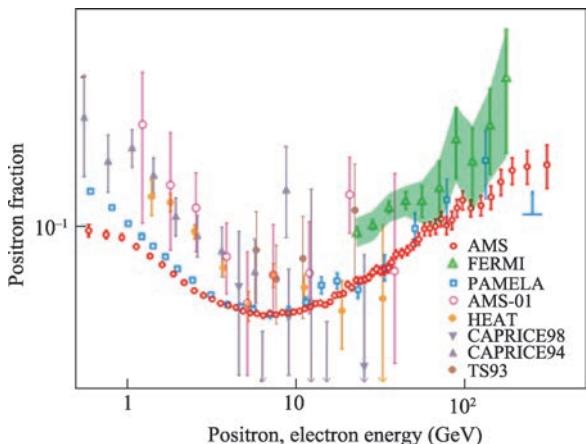


图2 各实验正电子比例的观测结果

为暗物质粒子湮灭或衰变的产物。ATIC结果表明电子观测的科学意义重大,许多原初观测目的不是电子的探测器都开始进行电子测量。2009年5月FERMI伽玛射线望远镜公布了其半年的电子观测数据,发现电子能谱在高能段明显比模型预期偏硬,意味着存在额外的正、负电子成分,可能和前文所述正电子超出具有相同来源。

我国20年前就开始了空间探测暗物质粒子间接探测实验。从1998年紫金山天文台就提出了相关科学目标,1999年在加速器上验证了相关的关键探测方法。2000年开始花了10年时间解决了所有关键的技术。2011年12月我国第一颗暗物质探测卫星“悟空”立项,经过4年研制成功。整个研制阶段,以国内为主的科学家一共花了4年时间,经历了3个阶段,研制了4套样机。2012年到2015年在欧洲核子中心对探测器进行了详细标定。2015年12月17号,我国首颗暗物质粒子探测卫星“悟空”在酒泉卫星发射中心成功发射。2016年3月,卫星交付中国科学院紫金山天文台,正式进入科学运行阶段。迄今这颗卫星已平稳在轨运行超过2年时间,获得了大量高品质的观测数据。“悟空”这个名字的寓意是希望通过它的“火眼金睛”,找到暗物质这个“妖魔鬼怪”。卫星的英文名字叫Dark Matter Particle Explorer,简称DAMPE。

“悟空”的质量为1850千克,探测器质量为1415千克。卫星轨道为太阳同步轨道,轨道高度500千米,三轴稳定,指向天顶,每天的数据量约13

G字节。卫星的设计寿命是3年。根据现在的测试结果,所有的探测器工作完美,预计卫星真正在太空服役的时间要远远超过它的设计寿命。“悟空”每天绕地球15圈,平均每秒钟获得60个高能粒子,每天获得500万个高能粒子。从发射到现在,卫星工作十分稳定。

“悟空”卫星主要目标是在空间探测高能粒子,在暗物质粒子探测、宇宙射线起源和 γ 射线天文研究三个方面取得突破。在暗物质探测方面,“悟空”卫星要寻找三类特征信号:第一类是 γ 射线谱线,第二类是晕状分布的 γ 射线,第三类是奇异电子能谱结构。这三类信号是暗物质的特征信号,和其他的天体物理过程形成的信号有显著的区别,对研究暗物质特别重要。

由于宇宙射线成分比较复杂,各种粒子的流量相差很大,比如“悟空”卫星需要观测的高能电子和伽马射线,其流量只有质子的 $1/10^3$ 和 $1/10^6$ 左右。悟空卫星最关键的功能是将流量相差很大的各种高能粒子区分清楚、把它们的物理参数测量准确。对关键的物理量(比如电荷、能量、方向等)我们在设计时都采用两种独立的测量,以保证结果的高可靠性。



图3 悟空卫星发射

“悟空”卫星是一个高能粒子和 γ 射线望远镜,从顶部到底部一共有4个子探测器,顶部是塑料闪烁体探测器,往下依次是硅阵列探测器、BGO量能器和中子探测器。每一个子探测器各有测量,4个子探测器协同工作,以实现高分辨观测高能电子、 γ 射线和宇宙射线粒子。“悟空”总共有75,916路信号通道,是我国在天上飞行的电子学方面最复杂的一

颗卫星。“悟空”卫星参与研制的单位有：中国科学院紫金山天文台，中国科学技术大学，高能物理所，近代物理所和国家空间科学中心。另外瑞士日内瓦大学和意大利佩鲁贾大学参与了部分探测器的研制。

塑料闪烁体探测器的主要功能是测量入射粒子电荷。太空中的粒子多种多样，比如伽马射线不带电，电荷为0；电子的电荷为-1；正电子的电荷为+1；质子的电荷为+1；从氢到铁的原子核电荷逐渐增加。因此我们通过高精度测量入射粒子的电荷可以鉴别大多数的粒子。电荷测量的原理是带电粒子在闪烁体中通过电离过程沉积能量，能损率正比于粒子电荷的平方。“悟空”的塑料闪烁体的电荷分辨水平对质子是0.12个电子电荷，对于铁是0.28个电子电荷。电荷分辨率与世界上所有的空间探测器的最高水平相当。

塑料闪烁体探测器下方是一个硅阵列探测器，它的主要功能是测量粒子的方向和电荷。硅阵列探测器的研制水平可以用位置分辨来表示，“悟空”卫星上的硅阵列探测器位置分辨的精度优于60微米，这表明探测器空间分辨水平也达到了国际上最先进的 γ 射线望远镜的水平。

在硅阵列探测器下方是BGO量能器，它是“悟空”卫星最核心的探测器，其质量超过所有探测器质量的70%。BGO量能器的主要任务是测量入射

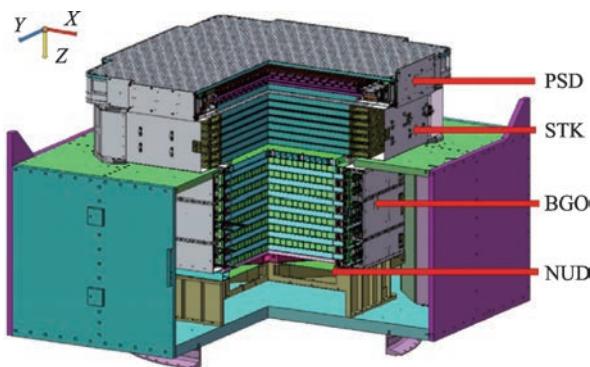


图4 悟空卫星探测器组成：从上到下分别是塑料闪烁体探测器(PSD)，硅径迹探测器(STK)，BGO量能器以及中子探测器(NUD)。这4个子探测器组合在一起就形成了一个高空间分辨、高能量分辨、高灵敏度、低本底的GeV~TeV电子宇宙射线探测器和伽马射线望远镜。

粒子能量和方向，并鉴别粒子的种类。BGO量能器能量分辨率在TeV能段优于1.5%，为国际最高水平，远远超过世界上所有的空间探测器水平。

最下方的中子探测器的主要功能是用来鉴别粒子的物理属性。我们知道宇宙射线的质子、重核都会和探测器作用产生大量的次级中子，而电子和 γ 射线产生的次级中子数目要少很多，根据这一特点我们用中子探测器来鉴别电子/ γ 和原子核。

“悟空”卫星前530天的观测数据中记录下了28亿个高能粒子事例，我们从其中筛选出了150万高能电子，它们覆盖的能段从25 GeV到5 TeV。基于这些事例，我们得到了国际上精度最高，本底最低，能量分辨率最好的电子能谱，如图5所示。相比于以前的空间实验结果，“悟空”将电子最高能量测量至近5 TeV，超过了阿尔法磁谱仪(AMS-02)的1 TeV和费米伽马射线空间望远镜的2 TeV，开辟了宇宙观测的新窗口。

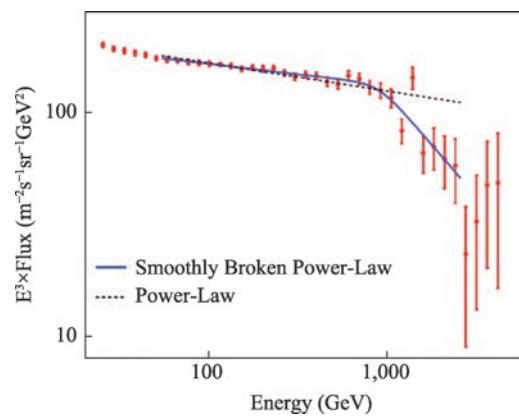


图5 宇宙高能电子能谱(“悟空”卫星前530天的观测数据)

“悟空”卫星直接测量到了电子能谱在约0.9 TeV处的拐折，这个拐折澄清了TeV能区电子的能谱行为，为判断TeV以下的高能电子宇宙射线是否来自于暗物质湮灭提供了关键性的数据。此外，“悟空”的数据初步显示在1.4 TeV处存在能谱精细结构。这个结构很难用天体物理过程解释，一般说来天体过程会预期一个相对平滑的电子能谱，例如图5中的实线。但现有的数据量还不足以定论。“悟空”卫星正在持续积累数据，希望通过更多的观测数据我们能够最终澄清该现象的物理本质。