

“悟空”玉宇探测暗物质 ——暗物质粒子探测卫星简介

常进,冯磊,郭建华,范一中

中国科学院紫金山天文台,中国科学院暗物质与空间天文重点实验室,南京 210008

摘要 暗物质是当今科学研究的前沿热点研究领域。暗物质探测可以分为直接探测、间接探测和对撞机探测3类。其中间接探测是在宇宙线中寻找暗物质湮灭或者衰变产生的信号。2015年12月27号中国发射了第1颗用于暗物质粒子探测的空间科学卫星(DAMPE),它具有能量分辨率高、测量能量范围大和本底抑制能力强等优势,将中国的暗物质探测提升至新的水平。本文介绍暗物质粒子探测卫星的结构、性能优势和科学目标。

关键词 暗物质;空间天文;宇宙线;暗物质粒子探测卫星

1 暗物质研究背景

在美国国家研究理事会“宇宙物理学分会”提出的该领域21世纪11个最重大科学问题中,“暗物质是什么?”和“宇宙射线的起源”分列第1、第6位。暗物质的探测也一直是国际前沿热点研究领域。世界主要国家都对暗物质的探测进行了重点关注,发展了多种探测方法和探测技术。中国科学院战略先导专项2010年开始实施,其中重要领域之一就是发展中国的空间科学。暗物质粒子探测卫星(DAMPE)项目应运而生。

暗物质这一概念是瑞士天文学家Fritz Zwicky提出的。他在研究Coma星系团的时候发现根据维里定理计算出的星系团的总质量要远大于根据发光度计算出来的星系团质量,他推测星系团中存在着大量不发光的物质,并称之为暗物质。20世纪70年代,美国天文学家Vera Rubin等测量发现星系的旋转曲线(也就是星系中的物质绕中心旋转的速度与到中心距离的关系)发现大半径处的旋转速度远大于发光物质给出的理论预期。如果引力理论正确的话,就需要引入看不见的物质来提供更大的引力以束缚住速度如此大的物质。

尽管暗物质粒子的确切物理性质仍有待进一步研究,一般认为暗物质粒子具有如下性质:电中性、大质量(比质子重许多)、长寿命(显著长于宇宙的寿命137亿年)、具有正常引力相互作用。暗物质粒子没有电磁相互作用和强相互作用,但可能具弱相互作用。已知的粒子中不存在满足这些性质的粒子,这意味着暗物质粒子的研究极可能带来物理学的革

命性突破。

现阶段主要有3种暗物质探测方案:直接探测、间接探测和对撞机探测。直接探测寻找的是暗物质粒子和核子碰撞产生的信号。这类实验因为要屏蔽大气中带电粒子的影响,一般在地下实验室进行,其优点是可以在地面进行,造价较低。中国有世界上最深的地下实验室——锦屏地下实验室,因此中国在暗物质直接探测领域也取得了很大的成就,清华大学和上海交通大学各自独立进行暗物质直接探测实验项目。对撞机探测主要是寻找高能粒子对撞产生的无法被探测器探测的暗物质粒子引发的能量动量不守恒过程。这类探测都是在大型高能对撞机上进行,造价高昂,技术难度大。间接探测主要通过研究探测银河系内的暗物质粒子湮灭产生的普通粒子,信号在宇宙线能谱上变现为各种“超出”或者“鼓包”。因为大气对宇宙线的屏蔽作用,这类实验需要发射空间探测器在大气层进行探测。国际上正在运行的空间科学卫星有费米大天区望远镜(Fermi-LAT),阿尔法磁谱仪2(AMS-02)、电子对望远镜(CALET)和中国的暗物质粒子探测卫星DAMPE。

2 暗物质间接探测

宇宙线是德国科学家Hess在研究空气电离度的时候发现的。宇宙线的能量范围非常大,可以高达 5×10^{19} eV。一般认为能量较低的宇宙线来源于银河系内超新星爆发喷射出的带电粒子。极高能宇宙线的来源仍然是未知的,可能与活

收稿日期:2016-02-28;修回日期:2016-03-01

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB837000);中国科学院战略科技先导专项;中国科学院青年创新促进会资助项目(2014275,2016288);国家自然科学基金项目(11273070,11303096)

作者简介:常进,研究员,研究方向为空间天文与高能天体物理,电子信箱:chang@pmo.ac.cn

引用格式:常进,冯磊,郭建华,等.“悟空”玉宇探测暗物质——暗物质粒子探测卫星简介[J].科技导报,2016,34(5):22-25;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.05.002

动星系核或伽马射线暴有关。宇宙线的成分比较复杂,不同成分的宇宙线的流量差别很大。其中核子所占比重最大,可达99%;电子约占1%,其他成分如中微子、正电子以及反质子等所占比重都非常小。

因为大气对宇宙线的屏蔽作用和流量小等限制,最近一二十年才实现宇宙线正负电子的精确测量。空间探测器因为技术和造价的原因一般都较小,可测能量只能达到几十TeV。测量宇宙线粒子能量的探测器一般有两种:量能器和磁谱仪,其中磁谱仪可以测量宇宙线在其磁场中的偏转,可以区分宇宙线中的正反粒子。而量能器测量的是宇宙线在探测器中产生的簇射,所以无法区分宇宙线的电荷符号。磁谱仪的缺点是造价高昂,技术难度高。

2008年ATIC和PAMELA实验组分别发表了电子宇宙线测量结果并引发广泛关注:ATIC发现在300~800 GeV能量范围内测量到的高能电子流量显著高于理论模型所预言的流量;PAMELA实验发现正电子比例从10 GeV开始随能量增加而上升,但是理论预言的正电子比例应该随能量的增加而下降。这两个“超出”,被Fermi-LAT和AMS-02实验以更高的精度所证实。这些“超出”可以用天体物理过程来解释,比如脉冲星;也可以用暗物质的湮灭或者衰变来解释。暗物质湮灭模型要求的暗物质的质量约几百GeV,但是截面约是产生正确的剩余密度所需要的截面的1000倍。衰变模型要求的暗物质质量更大,约1~2 TeV,寿命约为 10^{26} s。无论是湮灭模型还是衰变模型,都受到了伽马射线观测的限制。

伽马射线线谱信号是另外一个非常重要的暗物质信号。天体物理过程无法产生伽马射线线谱信号,但是如果暗物质能够湮灭(衰变)产生的是单能光子,这表现在能谱上就是线谱信号。Bringman和Weniger发现在Fermi-LAT数据中存在一个~130 GeV可能的伽马射线线谱信号,不过这个信号的置信度不是很高。梁云峰等发现在星系团的数据中存在一个~42.7 GeV的疑似线谱信号,其整体置信度约 3σ 。能量分辨率越高,线谱的能谱结构越尖,越容易从数据中区分出这一信号。所以高能量分辨率的空间探测器在线谱信号搜寻方面优势越明显。中国暗物质粒子探测卫星(DAMPE)具有非常高的伽马光子能量分辨率,这方面具有很强的优势。

此外,在银心附近的伽马射线的能谱中发现1~3 GeV处存在一个“鼓包”,也被称作“GeV超出”。背景模板的选取对GeV超出的行为是有影响的,研究表明这个信号不会因背景模板的改变而消失。对于“GeV超出”的起源,也存在着脉冲星、超新星遗迹和暗物质等模型,相关研究是近期的热点之一。最近李尚等对40 kpc以内的几个矮星系的联合拟合中也发现了GeV超出信号,但其置信度尚不够高。

3 暗物质粒子探测卫星——“悟空”的性能与结构

空间探测宇宙线主要测量宇宙线粒子的电荷、能量和入射方向,其中测量电荷包括电荷的大小与正负。电荷正负的

测量是最困难的,必须借助于磁场才能实现。磁谱仪可以测量宇宙线在其磁场中的偏转,进而判定入射宇宙线的电荷。磁谱仪造价昂贵,现在仍在空间运行的探测器只有AMS-02。Fermi-LAT、CALET和DAMPE这3个探测器都利用量能器来测量宇宙线的能量,而不测量电荷的正负。

DAMPE即“悟空”是中国第1个空间高能粒子探测器,经过全球征名活动,最终命名为“悟空”,寓意用《西游记》中火眼金睛的悟空寻找难以察觉的暗物质存在的证据。“悟空”已于2015年2月17日发射升空,是世界上迄今为止观测能段范围最宽、能量分辨率最优的空间探测器,其观测能段是国际空间站阿尔法磁谱仪的10倍,能量分辨比国际同类探测器高3倍以上。目前在轨运行状态稳定,数据源源不断地获取了大量数据。DAMPE是以中国为主,瑞士和意大利参与共同研发完成的。DAMPE主要探测电子宇宙射线、高能伽马射线和高达PeV的核素宇宙射线。它具有能量分辨率高,测量能量范围大和本底抑制能力强三大优点。设计指标如表1所示。

表1 暗物质粒子探测卫星的设计指标

宇宙线组分	测量能区	能量分辨率	空间分辨率	几何因子
电子	5 GeV~10 TeV	1.5%@800 GeV	0.3°@100 GeV	$> 0.3 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$
伽马射线	5 GeV~10 TeV	1.5%@800 GeV	0.3°@100 GeV	$> 0.3 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$
核素	100 GeV~100 TeV	好于40% @800 GeV	0.2°@100 GeV	$> 0.2 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$

DAMPE的性能优势和它的结构设计紧密相关,其结构布局见图1。暗物质粒子探测卫星的探测器由4部分组成,分别是:塑闪阵列探测器、硅阵列探测器、BGO量能器以及中子探测器。

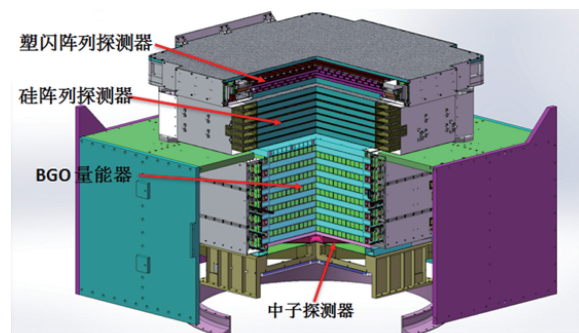


图1 暗物质粒子探测卫星的结构布局示意

塑闪阵列探测器的主要功能是测量入射宇宙线的电荷以区分不同核素,也有可区分高能电子和伽玛射线。高能带电粒子在穿过塑料闪烁体时,通过电离和发射辐射(光子)的方式损失能量。沉积的能量转化为荧光,被两端的光电倍增管转化为电信号,经打拿级放到后读出。塑闪阵列探测器主要由兰州近代物理研究所负责研制。

硅阵列探测器的主要功能是测量入射宇宙线粒子的方向和电荷。硅阵列探测器由6大层硅微条探测器上下层叠布而成。同时在第1/2、2/3和3/4层之间各有一块钨板。高能光子在穿过钨板时以较高的概率转化为正负电子对。所以光子和电子在量能器中的信号是一致的。如果在第一层没有记录到带电粒子的信号,但在下面几层记录到信号,则入射粒子为伽玛射线。硅阵列探测器是由中国科学院高能物理研究所、日内瓦大学、佩鲁贾大学等单位共同研制的。

BGO量能器是探测器最核心的组成部分,其功能是测量宇宙线粒子的能量,并可区分宇宙线中电子与质子。BGO晶体是一种无色透明的没有激活剂的纯无机闪烁体,是核物理实验中常用的一种闪烁体材料。暗物质粒子探测卫星所使用的BGO晶体是由上海硅酸盐研究所专门设计开发的。BGO量能器的数据读出系统有高达8万路的电子学信号通道(也就是整个探测器有8万路电子信号输出;而且这8万条电子学信号通道要在 1 m^3 这样小的范围内布局完成,难度很大)。BGO量能器及其电子学系统见图2。

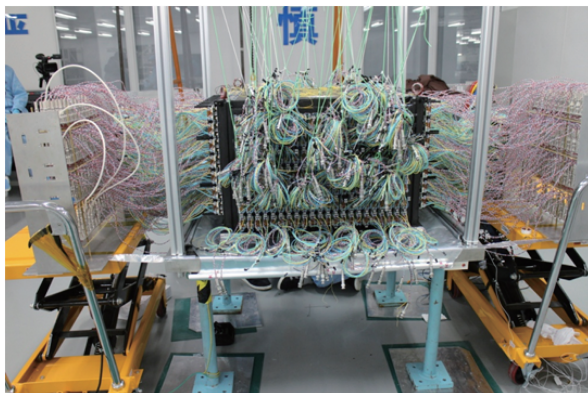


图2 光电管安装完成后测试

高能宇宙线粒子进入探测器后,会产生级联簇射。图3显示的是100 GeV的电子(质子)在探测器中产生的簇射的模拟结果。从图中可以看到电子和质子在探测器中产生的簇射的形状差别非常大。这是因为电子宇宙线在探测器中只产生电磁簇射,而质子在探测器中还会产生强子簇射。根据簇射的形状可以判断入射粒子的种类。沉积在探测器内的能量和入射粒子的能量有非常好的线性关系,可以根据沉积能量的大小计算出入射粒子的能量。BGO量能器主要由中国科学技术大学以及紫金山天文台负责研制。

入射宇宙线能量足够高,其产生的簇射的体积就会大于

BGO量能器的体积而发生溢出。从探测器侧面入射宇宙线,探测器就只能测量到部分簇射。这时对宇宙线粒子能量的测量就会有较大的不确定性。所以探测器越厚,能量分辨率就会越高,能量探测范围也越大。暗物质粒子探测卫星的探测器厚度目前来说是最大的。

中子探测器测量的是宇宙线粒子在探测器上面3层中产生的次级中子。高能电子主要是电磁簇射,产生的中子数目很少,但是质子和其他核素还会发生强子簇射,从而产生大量的高能中子。根据这种效应,可以进一步区分宇宙线的电子和质子。中子探测器主要由中国科学院紫金山天文台负责研制。

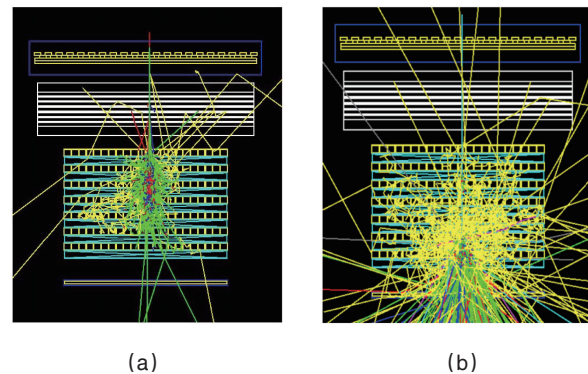


图3 100 GeV的电子(a)和质子(b)在探测器中产生的簇射的模拟结果

4 国际其他空间宇宙线探测器

根据测量能量方式的不同,空间宇宙线探测器可以分为两类,一类是利用量能器测量入射宇宙线的能量;一类主要通过磁谱仪来测量能量。目前在轨运行的利用量能器的空间卫星有费米大天区望远镜(Fermi-LAT)、CALET和DAMPE,探测原理相同,第3节已有介绍。

采用磁谱仪的空间卫星有Pamela(项目已完成)和阿尔法磁谱仪-2。磁谱仪能够测量宇宙线在探测器内的偏转,所以可以区分正反粒子并测定其电荷。根据偏转的曲率半径还可以计算宇宙线粒子的刚度。结合电荷、速度等测量结果,通过简单计算可以算出宇宙线粒子的能量和动量。AMS-02是华裔物理学家、诺贝尔奖获得者丁肇中先生领导的宇宙线探测项目,已收集到海量的宇宙线事例,并给出了目前最为精确的宇宙线能谱。

这些探测器的性能参数见表2。DAMPE具有能量分辨率高、测量能量范围大和本底抑制能力强三大优势。当然DAMPE也有自身的不足,比如不能分辨电荷正负。可测量的最小能量为 $\sim\text{GeV}$,比费米卫星和AMS-02都要高。所以这些实验既竞争又互补。通过对这些科学卫星产生的数据的分析,希望能够弄清楚宇宙线正负电子超出的起源,寻找到暗物质存在的证据。

表2 DAMPE和其他空间科学卫星对宇宙线
电子测量能力的比较

卫星名称	观测能段/ GeV	几何因子/ ($\text{m}^2 \cdot \text{sr}$)	能量分辨	本底抑制 @TeV
PAMELA	~300	0.002	5%~10%	10^4
FERMI	~300	1.0	5%~15%	10^3
AMS-02	~1000	0.04	5%~10%	10^5
CALET	~3000	0.08	3%	10^5
DAMPE	~10000	0.3	1%	2×10^5

5 DAMPE 的优势与未来研究展望

暗物质粒子探测卫星是中国第1颗空间天文卫星,它在暗物质间接探测方面具有较强的国际竞争力,大大提升了我国暗物质探测水平。DAMPE的主要科学目标有3个:暗物质间接探测、宇宙线物理和伽马射线天文。DAMPE已于2015年2月17日发射升空。目前在轨运行状态稳定,已获取了大量数据。图4为DAMPE两个真实事例,能量约为2 TeV。

DAMPE可以准确测量宇宙线正负电子的能谱,有望完整测量“超出”的截断行为。宇宙线正负电子“超出”的起源有暗物质和天体物理过程两类模型,所预言的“超出”的截断

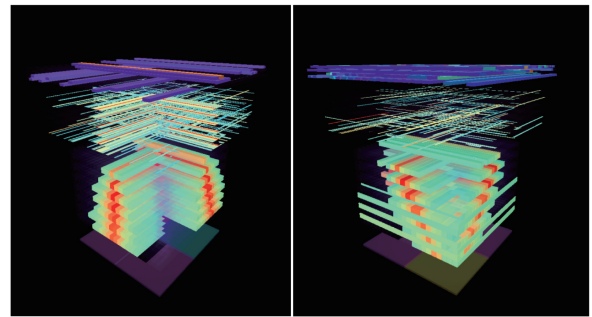


图4 DAMPE探测到的真实的电子(左)和质子(右)事例

行为有显著差异。现有的数据因为只覆盖了相对较低的能段部分,还无法进行有效区分这两类模型。DAMPE有望准确测量“超出”截断处的能谱,区分起源模型。此外,DAMPE还将首次在空间得到1~10 TeV的电子宇宙射线的能谱、发现或限制邻近的高能电子射线源。

DAMPE由于优秀的能量分辨率,在伽马射线线谱的搜寻上有望取得突破。因为对于线谱结构,能量分辨率差的话信号容易淹没在背景噪声之中。在高能量分辨率的数据中却会表现为非常“尖”的结构。因此能量分辨率越高,就越有可能在数据中找到线谱结构。

DAMPE能够测量高达100 TeV的核子宇宙线。地面宇宙线实验测量能段偏高,且难以准确区分宇宙线的各种组分。DAMPE可以实现地面探测和空间探测在能谱上的衔接,并且能够区分宇宙线组分。

Search for dark matter with Wukong, an introduction to the dark matter particle explorer

CHANG Jin, FENG Lei, GUO Jianhua, FAN Yizhong

Purple Mountain Observatory, Key laboratory of dark matter and space astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract The study of dark matter is the current active subject of science research. There are three kinds of methods to detect dark matter particles which are direct detection, indirect detection and collider detection. The indirect detection of dark matter (DM) particles search the signals produced by DM annihilation or decay which are all kinds of excesses in the energy spectrum of CRs. The dark matter particle explorer (DAMPE) has already launched to space at December 27, 2015. It is the first science satellite in china and it has three advantages: large energy range, high energy resolution and strong background distinction. The main scientific goals are dark matter indirect detection, cosmic ray physics and gamma ray astronomy. In this paper, we will introduce the structure of DAMPE, the advantage of DAMPE and the scientific goals of DAMPE.

Keywords dark matter; space astronomy; cosmic ray; dark matter particle explorer

(责任编辑 李娜)