

空间探测暗物质简介*

常进[†] 冯磊 郭建华

(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)

2015-08-24收到

[†] email: chang@pmo.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20151101

Detecting dark matter in space

CHANG Jin[†] FENG Lei GUO Jian-Hua

(Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

摘要 宇宙线的探测分为地面探测和空间探测。地面探测测量的是高能宇宙线(大于100 TeV)在大气中产生的簇射的前锋面。由于低能宇宙线在大气中产生的簇射不能到达地面,所以要探测低能的宇宙线就需要把探测器送到大气层外部。空间探测宇宙线的优点是能测量低能宇宙线,并且能区分宇宙线的种类。暗物质间接探测就是在宇宙线中寻找暗物质湮灭或者衰变产生的信号,表现在宇宙线能谱上就是各种超出。所以需要准确区分宇宙线的种类,并且精确测量宇宙线的能谱。在文章中,作者将介绍宇宙线的相关理论以及空间探测暗物质的研究现状,并详细介绍将于2015年底发射的暗物质粒子探测卫星,讨论其在暗物质间接探测方面的各种优势。

关键词 宇宙线, 暗物质, 空间天文

Abstract There are two methods to measure cosmic rays, namely, ground detection and space detection. Each has its own advantages and disadvantages. Ground detection measures air showers at ground level produced by high energy (greater than 100 TeV) cosmic rays. As showers of low energy (less than 100 TeV) cannot reach the ground, to measure them we need to launch the detectors into space. Space detection can not only measure low energy cosmic rays but also identify their charge. The indirect detection of dark matter particles measures the signal produced by their annihilation or decay, which are of all kinds in the energy spectrum of cosmic rays. Hence, we need to make precise measurements of the spectrum and distinguish each component type. In this paper we will review cosmic ray physics and the status of dark matter detection. The dark matter explorer satellite which will be launched at the end of this year and its advantages in indirect detection will also be discussed.

Keywords cosmic ray, dark matter, space astronomy

1 宇宙线简介

奥地利科学家 Victor F. Hess 在 1912 年研究不同海拔高度的空气电离度时发现,海拔越高空气

电离度越大^[1]。这表明空气中的带电粒子不是来自于地球内部的放射性元素衰变而是来自于外部空间。Hess 把这种来自宇宙空间的高能带电粒子叫做宇宙线。我们现在知道,空气中的带电粒子是由宇宙线在大气中的级联簇射产生的。

簇射指的是高能宇宙线和介质发生相互作用

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2013CB837000)资助项目;中国科学院战略先导专项(批准号:XDA04040000)

产生的粒子级联现象。高能宇宙线在大气中会发生强子簇射和电磁簇射，产生游离的带电粒子和电磁辐射。这些游离的带电粒子包括很多寿命很短的粒子，比如 μ 子和 π 介子等。在大型对撞机没有制造出来之前，我们主要在宇宙线中寻找新粒子。其中正电子^[2]和 μ 子^[3]等都是首先在宇宙线中发现的。

宇宙线的能谱如图1所示，从图中我们看到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。其中核子约占99%，电子约占1%。其他成分如正电子、反质子和中微子等所占比重都很小。

宇宙线的能谱很明显是非热谱，可以近似为分段幂律谱。比较明显的结构是“膝”和“踝”，此外在 5×10^{19} 电子伏特处有一个截断，被称为GZK截断。GZK截断是甚高能宇宙线与宇宙微波背景光子的碰撞所造成的^[4, 5]。

2 宇宙线的探测

宇宙线的探测分为地面探测和空间探测。两者各有优缺点，互为补充。

地面探测测量的是高能宇宙线在大气中产生的簇射的前锋面。空气簇射分为电磁簇射和强子簇射。其中强子簇射主要是宇宙线的核子引发的，会产生大量的 μ 子。而电子和高能光子的簇射主要是电磁簇射，产生的 μ 子数目相对较少。

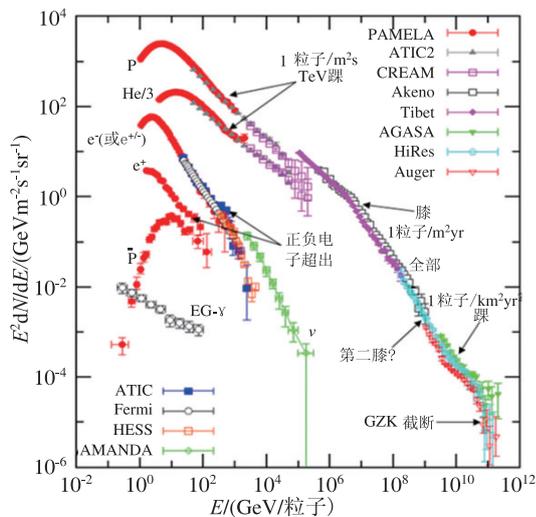


图1 宇宙线各成分的能谱

我们可以通过这个现象来区分宇宙线的成分。但是现有的地面试验还无法精确区分不同核子引发的簇射。所以地面试验通常测量的是各种核子成分流强的总和，具体结果如图1所示。

簇射产生后在空气中逐渐增大。当簇射达到最大后正负电子的数量急剧下降，而 μ 子的数量则基本稳定。所以地面探测试验都选择在高海拔地区进行。我国在这方面具有得天独厚的优势，所以宇宙线实验也有非常好的成果。由于低能宇宙线(小于100 TeV)在大气中产生的簇射无法到达高海拔的地面，所以地面探测只能探测能量大于100 TeV的高能宇宙线。要探测低能的宇宙线就需要空间探测。现有的地面宇宙线实验非常多，比较著名的有西藏羊八井的AS γ ^[6]和ARGO^[7]，LHAASO^[8]和Auger^[9]等。

空间探测宇宙线的优点是能测量低能宇宙线，并且能区分宇宙线的种类。缺点是探测器受技术难度和费用的限制，暂时无法测量PeV以上能区的宇宙线。

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。磁谱仪可以测量宇宙线在其磁场中的偏转，从而能够区分正反物质。

电磁量能器最开始只是用来探测宇宙线中的核子。这是因为原来实验室用的背景减除方法无法准确地把质子的信号有效扣除掉(见图2(a))。直到采用图2(b)所示的背景减除方案后，用电磁量能器来测量宇宙线中的高能电子和高能光子才成为可能。最先采用此方法测量宇宙线电子的实验是ATIC^[11]。此外费米大天区望远镜(Fermi-LAT)^[12]、CALET^[13]和暗物质粒子探测卫星(DAMPE)^[14]都是使用这种方法。

采用磁谱仪测量宇宙线的实验有Pamela^[15]和阿尔法磁谱仪-2(AMS-02)^[16]。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，可以求出宇宙线粒子的能量。AMS-02是华

裔物理学家丁肇中先生领导的宇宙线探测项目，已收集到目前为止最大的宇宙线事例，并给出了最精确的宇宙线能谱。

3 宇宙线的传播与暗物质间接探测原理

宇宙线的传播满足如下方程^[17]：

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = q(r, p) + \nabla \cdot (D_{xx} \nabla \psi - V \psi) + \frac{\partial}{\partial p} p^2 D_{pp} \frac{\partial}{\partial p} \frac{1}{p^2} \psi - \frac{\partial}{\partial p} \left[\dot{p} \psi - \frac{p}{3} (\nabla \cdot V) \psi \right] - \frac{\psi}{\tau_f} - \frac{\psi}{\tau_r}, \quad (1)$$

其中 $\psi(r, p, t)$ 是每单位动量间隔内宇宙线粒子密度， $q(r, p)$ 是宇宙射线的源项。 D_{xx} 为空间扩散系数，用来描述宇宙线中的带电粒子在银河系随机磁场中的运动，这种运动就等同于扩散。 V 为对流速度，描述星系风对宇宙线的影响。 D_{pp} 为动量空间的扩散系数，它表征了宇宙线在传播过程中的重加速效应。 τ_f 和 τ_r 分别代表碎裂时标和辐射衰变时标。如果再给出边界条件，我们就可以解析地求解这个方程，进而得到宇宙线在银河系任何位置的流量。一般情况下，这个方程是无法求解的，我们可以借助于软件包进行数值求解。其中比较常用的有 GALPROP^[18] 和 DRAGON^[19]。

对宇宙线在银河系中的传播影响最大的是扩散效应。扩散系数具有如下形式：

$$D_{xx} = \beta D_0 \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\delta, \quad (2)$$

式中 ρ 为磁刚度，其定义为宇宙线粒子的能量除以电荷数。从(2)式可以看到，扩散系数随磁刚度增加呈指数增加，说明磁刚度越大扩散越迅速。一般认为宇宙线在一个圆柱形的传播晕中传播，高能粒子扩散更迅速，也就更容易到达边界而逃逸出去。所以扩散效应的结果是使能量越高的宇宙线流量变得越小。也就是使宇宙线的能谱变软，即其谱指数变小了 δ 。

宇宙线在传播过程中会跟星际介质发生碰撞。星际介质的主要成分有原

子、分子和尘埃等。宇宙线与星际介质的碰撞主要是质子—质子碰撞，碰撞产生各种次级粒子。这些次级粒子包括正电子、反质子和伽马射线等。

比较重要的数据是正电子比例，因为比值的系统误差会因正负电子系统误差的相消而变小。正电子是由宇宙线和星际介质碰撞产生的。在正电子产生前，宇宙线由于传播效应而使正电子能谱变软 δ (即谱指数变小了 δ)，正电子产生后会继续传播，其能谱又变软 δ 。而负电子的能谱只变软 δ 。所以正电子与负电子的比例应该是单调递减的。但是实验得到的结果却是从 10 GeV 开始不断上升，具体结果见图 3。

2008 年，ATIC 发现在 300—800 GeV 能量范围内测量到的高能正负电子总和流量高于宇宙射线理论模型所预言的流量^[10]，且有类似尖峰的结构。后来 Fermi-LAT^[21] 和 AMS-02^[22] 的电子观测数据表明：与理论模型相比，在 100 GeV 以上也存在“超出”，但是“超出”的大小比 ATIC 小一些，而且能谱的结构也更光滑。最近的 AMS-02 数据支持存在一个新的正负电子源，且该源的截止能量在 543_{-130}^{+250} GeV^[22]，与 ATIC 2008 年报道的信号在能段上一致，尽管流量相比较显著得低。

这些超出都可以用暗物质的湮灭或者衰变产生正负电子来解释。若用暗物质湮灭模型来解释，暗物质的质量约几百 GeV，但是截面较大，约是产生正确的剩余密度所需要截面的一千倍。衰变模型要求的暗物质质量比较大，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。

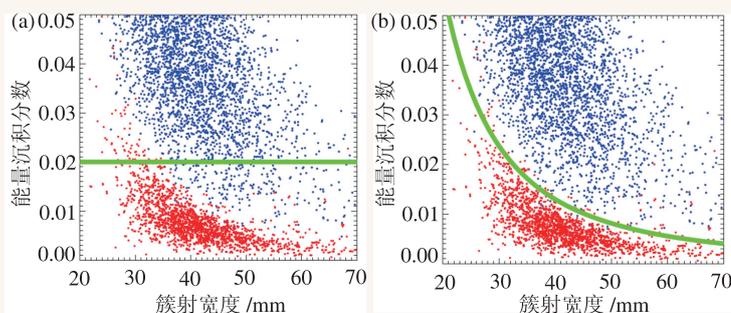
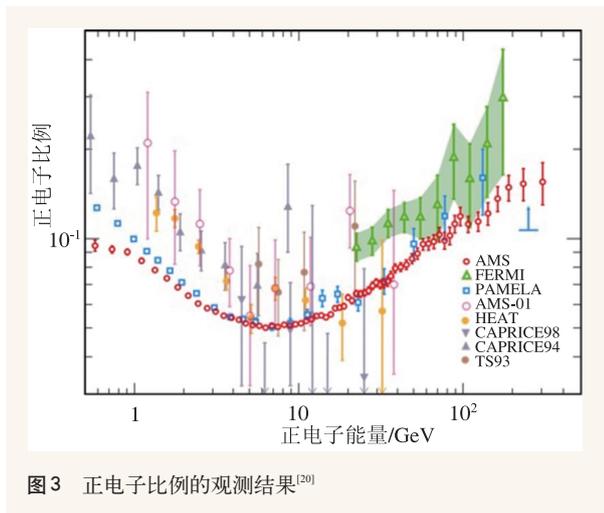


图2 用电磁量能器测量宇宙线中的高能电子和光子的背景扣除方案 (a)以前的背景扣除方案；(b)改进后的背景扣除方案^[10]

图3 正电子比例的观测结果^[20]

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)产生两个光子，光子的能量等于暗物质的静止质量(静止质量的一半)，这表现在伽马射线能谱上就为线谱信号。Bringman^[23]和 Weniger^[24]在 Fermi-LAT 数据中发现了一个约 130 GeV 的可能的伽马射线线谱信号，不过到现在为止，这个信号的置信度仍然不高。在探测伽马射线线谱方面，能量分辨率越高，优势越明显。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，在银河系中心附近的伽马射线能谱中发现 1—3 GeV 处存在一个“鼓包”，被称之为“GeV 超出”^[25, 26]，进一步的研究表明，这个信号并不因背景模板的变化而消失^[27, 28]。对于“GeV 超出”的起源，也存在着暗物质和脉冲星等模型，相关研究是近期的热点之一。

4 空间探测宇宙线与暗物质间接探测

空间探测宇宙线主要测量宇宙线粒子的电

表1 暗物质粒子探测卫星的设计指标^[30]

	电子	伽马射线	核素
测量能区	5 GeV—10 TeV	5 GeV—10 TeV	100 GeV—100 TeV
能量分辨率	1.5% @ 800 GeV	1.5% @ 800 GeV	好于 40% @ 800 GeV
空间分辨率	0.3° @ 100 GeV	0.3° @ 100 GeV	0.2° @ 100 GeV
几何因子	> 0.3 m ² ·sr	> 0.3 m ² ·sr	> 0.2 m ² ·sr

荷、能量和入射方向，其中测量电荷包括电荷的大小与正负。能量的测量靠电磁量能器，方向则通过硅微条阵列探测器获得，电荷大小利用塑料闪烁体探测器等测得。电荷的正负是最难测量的，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，一次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 都是利用量能器测量宇宙线的能量而不区分宇宙线电荷的正负。AMS-02 和 Pamela 都是通过磁谱仪来区分电荷的正负。下面我们以 DAMPE 和 AMS-02 为例介绍宇宙线的空间探测。

4.1 暗物质粒子探测卫星

暗物质粒子探测卫星(DAMPE)是我国第一颗空间高能粒子探测器，它是以我国为主，瑞士和意大利参与共同研发的。暗物质粒子探测卫星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等三大优点。其设计指标见表 1。

暗物质粒子探测卫星的这些性能优势和它的结构设计是紧密相关的，其结构布局见图 4。从图中我们可以看到，暗物质粒子探测卫星的探测器共有四部分组成，分别是：塑闪阵列探测器，硅阵列探测器，BGO 量能器和中子探测器^[29, 30]。

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，也有助于区分高能电子和伽马射线。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。这些沉积的能量转化为荧光后传递到达探测器两端的光电倍增管，然后经过打拿级放大后读出信号。塑闪阵列探测器主要由兰州的中国科学院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排布而成，每大层又由两层垂直排列的硅探测器组成。这样设计的目的是为了实现在空间上X、Y的定位。同时在第1/2，2/3和3/4层之间放置钨板。钨板的作用是使伽马光子在通过时以较高的概率转化为正负电子对。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了信号，说明入射粒子为伽马射线。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尤其是电子和伽马射线的能量。BGO晶体是一种无色透明的没有激活剂的纯无机闪烁体，它是一种被广泛用来探测高能带电粒子和伽马射线的闪烁体材料。暗物质粒子探测卫星所使用的BGO晶体是由中国科学院上海硅酸盐研究所专门设计开发的。高能宇宙线粒子打入BGO量能器后，会在BGO晶体中产生级联簇射。图5显示的是100 GeV的电子和质子在探测器中产生的簇射的模拟结果。我们可以看到宇宙线电子和质子在探测器中产生的簇射的形状是完全不同的。这是因为电子宇宙线在探测器中只产生电磁簇射，而质子在探测器中除产生电磁簇射外还会产生强子簇射。根据宇宙线粒子产生的簇射的形状，我们可以判断入射粒子的种类。入射粒子的能量越高，产生的簇射就越大，沉积在探测器内的能量也就越多。所以我们可以根据在探测器中的能量沉积确定入射宇宙线的能量。因为伽马射线首先在硅阵列探测器中转化为正负电子对，然后进入BGO量能器，所以伽马射线的簇射和电子是相同的，不能区分。BGO量能器主要由中国科学技术大学和中国科学院紫金山天文台负责研制。

如果入射宇宙线能量非常高，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。此外，如果大量的宇宙线粒子从探测器侧面入射，探测器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误差。由此可见，探测器做得越厚，能量分辨率就会越高，能量探

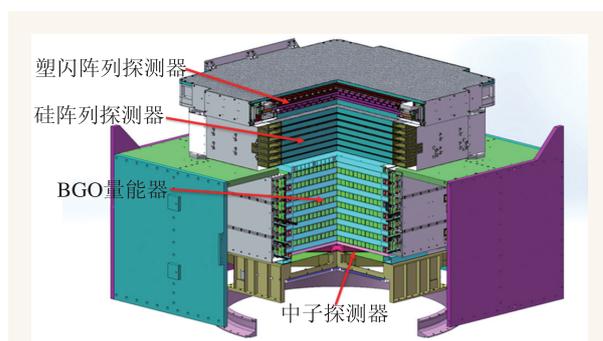


图4 暗物质粒子探测卫星的结构布局示意图^[30]

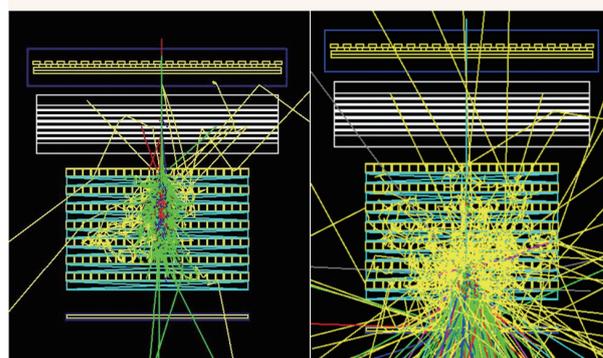


图5 100 GeV的电子(左)和质子(右)在探测器中产生的簇射^[30]

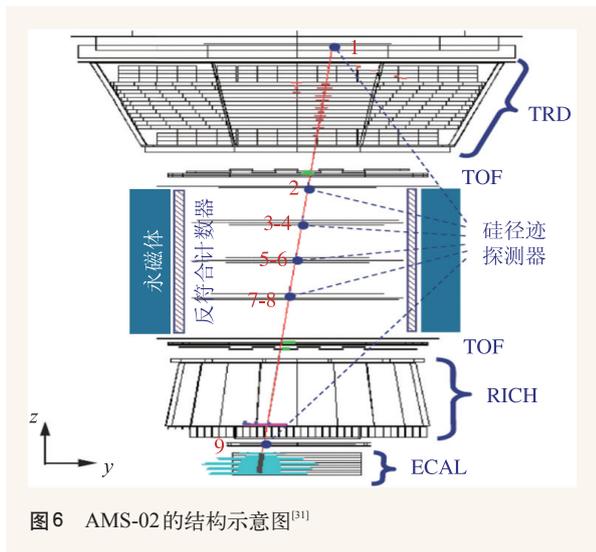
测范围也就越大。暗物质粒子探测卫星的探测器厚度目前来说是最厚的。

中子探测器测量的是宇宙线粒子与中子探测器上层的物质发生相互作用产生的次级中子。高能质子和其他核素在量能器中的强子簇射会产生大量的高能中子，而高能电子主要是电磁簇射，产生的中子数目很少。根据这种效应，我们可以进一步区分宇宙线的成分。中子探测器主要由中国科学院紫金山天文台负责研制。

4.2 AMS-02

阿尔法磁谱仪-2的具体结构见图6，自上而下分别为：硅径迹探测器，穿越辐射探测器(TRD)，飞行时间探测器(TOF)，永磁体，环像切连科夫探测器(RICH)和电磁量能器(ECAL)。

硅径迹探测器共有9层，在图6中用数字1—9标示，其中2—8层径迹探测器在永磁体中。它主要测量的是入射宇宙线的轨迹。TOF记录的是

图6 AMS-02的结构示意图^[31]

粒子到达的时间，据此可以判断宇宙线粒子是从哪个方向打进来的。知道了宇宙线粒子的方向和径迹，就知道了它在磁场中是怎么偏转的，据此可以判断宇宙线粒子所带的电荷的大小和正负。刚度 R 的定义为动量除以电荷数，它等于磁场强度乘以偏转的曲率半径。根据带电粒子在磁场中的轨迹可以很简单地求得曲率半径，进而求得粒子的刚度以及动量。

TRD的主要功能是把高能正负电子从宇宙线中区分出来，但不能区分电子和正电子。这是因为高能正负电子在穿过TRD时能辐射出X射线而质子不能。RICH测量的带电粒子在探测器中产生切连科夫光。带电粒子在介质中的速度如果大于光在该介质中的速度，就可以向外辐射切连科夫光，并且速度和电荷数越大，辐射越强。AMS-02通过收集到的切连科夫光的信息反推粒子的速度和电荷。

结合动量和速度等信息，可以求得宇宙线粒子的质量，进而计算出入射宇宙线粒子的能量。AMS-02中电磁量能器可以独立地测量入射宇宙线的能量。这两种能量测量方法可以相互校正，提高能量分辨率。

5 总结与展望

暗物质粒子探测卫星将于年底发射，是我国

第一颗空间科学卫星，预期在轨工作三年。我国空间天文起步虽然较晚但是发展迅速，除暗物质粒子探测卫星外，还计划发射硬X射线望远镜等。暗物质粒子探测卫星具有能量分辨率高、测量能量范围大和本底抑制能力强等三大优势，在暗物质间接探测方面具有强的国际竞争力。暗物质粒子探测卫星的主要科学目标有三个：暗物质间接探测，宇宙线物理和伽马射线天文。在此我们简单讨论一下暗物质粒子探测卫星可能取得突破的几个科学问题。

首先，暗物质粒子探测卫星有望准确测量宇宙线正负电子“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，这两类模型所预言的超出部分在截止能量处的行为是不同的。现有的数据只测量了“超出”的前半部分，还无法对这两类模型进行区分，所以对“超出”的完全测量是至关重要的。暗物质粒子探测卫星的工作能段为5 GeV—10 TeV，有望准确测量“超出”的截断。此外，暗物质粒子探测卫星还将首次在空间进行1—10 TeV的高能电子宇宙射线的测量，发现或限定邻近的高能电子的宇宙射线源。

其次，暗物质粒子探测卫星具有非常高的能量分辨率，在测量伽马射线线谱方面具有较大的优势。我们知道，若能量分辨率比较低，线谱信号在能谱上表现为一个鼓包，但是在高能量分辨率的测量数据中表现为非常尖的一个“尖峰结构”。所以暗物质粒子探测卫星可以在寻找伽马射线线谱信号方面有所突破。

最后，暗物质粒子探测卫星能够测量高达100 TeV的核子宇宙线，并且能够区分各种宇宙线成分。我们知道地面宇宙线实验测量的是大约100 TeV的高能宇宙线，且是宇宙线各成分总和的能谱，无法准确区分宇宙线的各种组分。因此，暗物质粒子探测卫星将实现地面探测和空间探测在能谱上的衔接。

致谢 感谢袁强博士提供并授权使用图1。

参考文献

- [1] Zwicky F. *Helvetica Physica Acta*, 1933, 6: 110
- [2] Anderson C D. *Phys. Rev.*, 1933, 43(6):491
- [3] Wheeler J A. Some Men and Moments in the History of Nuclear Physics: The Interplay of Colleagues and Motivations. In: Stuewer R H (ed.). *Nuclear Physics in Retrospect*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1977. pp. 213—322
- [4] Greisen K. *Phys. Rev. Lett.*, 1966, 16(17):748
- [5] Zatsepin G T, Kuz'min V A. *J. Exp. Theor. Phys. Lett.*, 1966, 4: 78
- [6] <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/em/index.html>
- [7] <http://argo.na.infn.it/>
- [8] <http://english.ihep.cas.cn/ic/ip/LHAASO/>
- [9] <https://www.auger.org/>
- [10] Chang J *et al.* In: Kajita T, Asaoka Y, Kawachi A *et al*(eds.). *Proc. 28th Intl Cosmic Ray Conf.*, Universal Acad. Press, Tokyo, 2003. 1817—1820
- [11] Chang J, Adams J H, Ahn H S *et al.* *Nature*, 2008, 456: 362
- [12] <https://www-glast.stanford.edu/>
- [13] <http://calet.phys.lsu.edu/>
- [14] <http://dpnc.unige.ch/dampe/index.html>
- [15] <http://pamela.roma2.infn.it/index.php>
- [16] <http://www.ams02.org/>
- [17] Gaisser T K. *Cosmic Rays and Particle Physics*, Cambridge University Press, 1990
- [18] Strong A W, Moskalenko I V. *Astrophys. J.*, 1998, 509:212
- [19] Evoli C *et al.* *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 2008, 10:018
- [20] Aguilar M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110:141102
- [21] Abdo A A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102: 181101; Ackermann M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 108:011103
- [22] Accardo L *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 113:121101
- [23] Bringmann T *et al.* *JCAP*, 2012, 07:054
- [24] Weniger C. *JCAP*, 2012, 08:007
- [25] Goodenough L, Hooper D. 2009, arXiv:0910.2998
- [26] Daylan T, Finkbeiner D P, Hooper D *et al.* 2014, arXiv:1402.6703
- [27] Zhou B, Liang Y F, Huang X Y *et al.* *Phys. Rev. D*, 2015, 91:123010
- [28] Calore F, Cholis I, Weniger C. *JCAP*, 2015, 03:038
- [29] 常进, 冯磊, 郭建华等. 暗物质粒子探测卫星及邻近的电子宇宙射线源. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2015, 45(11):119510
- [30] 郭建华, 徐遵磊, 胡一鸣等. 暗物质粒子探测卫星有效载荷总体初样设计报告. 中国科学院紫金山天文台, 2013
- [31] Accardo L *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 113:121101

磁镜约束等离子体的新突破

对于可控热核反应来说,关键的一点是如何能在充分长的时间内控制住高温高密度的等离子体。例如创建在国际热核实验堆(ITER)的托克马克反应器就是通过绕在封闭环形几何管上的强磁场约束住等离子体,使其沿着力线方向在管内运动。另一种磁约束的方法是磁镜装置,它是在圆柱形螺旋管两端安置了磁镜,形成的强场区将迫使带电粒子缓慢运动并反转方向。限制等离子体约束时间和提高聚变反应功率的主要因素是等离子体中的电子温度。20世纪80年代,在考虑如何提高电子温度的问题方面,科学家们对磁镜装置给予了很大的关注。

物理新闻和动态

最近,位于新西伯利亚的俄罗斯 Budker 核物理研究所的 P. Bagryansky 教授和他的同事们提供了一个报告,他们已在 7 m 长的磁镜装置中,让氦等离子体中的电子温度提高到 900 eV,这个结果比他们以前获得的 250 eV 提高了三倍还多,同时这个数值也高于他们自己的预估值。这些成果的获得是由于使用了一个系统,采用高功率微波对电子进行共振加热,并使用一项新技术来降低等离子体中的槽纹不稳定性。P. Bagryansky 教授认为,他们的成果可用来发展与测试核聚变材料和对核废料进行善后处理。

(黄 响 编译自 *Phys. Rev. Lett.*, 2015, 114: 205001)