

# 暗物质粒子探测

常进 郭建华 伍健 冯磊

(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 210008)

天文观测发现, 星系周围的物质和星系团中的星系运动速度很快。仅靠发光物质提供的引力无法束缚如此大速度的天体。于是科学家假设存在一种不发光但是能提供引力的物质, 也就是暗物质。但是我们不知道暗物质粒子的质量, 也不知道它是否参与其他类型的相互作用。所以各国科学家设计了多种类型的实验来寻找暗物质。暗物质实验可以分为直接探测、间接探测和对撞机探测这三种类型。对暗物质的研究, 是当今天文学和物理学的研究热点。我国科学家也进行了广泛的实验和理论研究。在本文中, 我们将介绍各类暗物质探测实验的最新进展。

## 1. 暗物质存在的证据

我们人类比较熟悉的日月、星辰乃至银河可以被自己的眼睛或者借助于望远镜(光学的、射电的)观察到, 这样的天体是由所谓的明物质构成的, 这些也是我们人类早前认识的宇宙的全部, 但是, 天文观测却对此提出了质疑。

人们日常生活有这样的经验: 用一截细绳的一端系一个小球, 另一端拉在手里旋转, 则旋转的速度越快, 手上感觉绳子的拉力越大, 如果绳子不够结实, 在小球的旋转速度超过一定数值时, 小球就会挣断细绳飞出去。在绕行半径为  $R$  时, 质量  $m$  的小球所受向心力  $F$  与其切向速率  $V$  的关系为:

$$F = m V^2 / R.$$

实际上, 在任何引力系统中, 上面的现象同样适用, 只不过细绳换成了星体间的引力。引力的大小在知道两个星体的质量(分别是  $M$  和  $m$ ) 和质心距离  $R$  后可以用牛顿的万有引力公式加以计算:

$$F = GMm/R^2,$$

其中  $G$  为引力常数。在这样的引力系统中, 小质量星体绕大质量星体旋转的切向速率及两者质心间的距离

$R$  有着一一对应的关系, 可以计算得出

$$V = \sqrt{GM/R},$$

可见, 随着距离的增大,  $V$  将以  $R^{-1/2}$  的形式下降。

20 世纪 30 年代初, 美国加州理工学院的瑞士天文学家扎维奇 (F. Zwicky) 在观测螺旋星系旋转速度时, 发现星系间的相对运动速度较牛顿力学预期的快, 故推测必有数量庞大的质量拉住星系外侧的组成天体, 以使其不致因过大的离心力而脱离星系。

扎维奇指出, 大型星系团中的星系具有极高的运动速度, 除非星系团的质量是根据其中恒星数量计算所得到的值的 100 倍以上, 否则星系团根本无法束缚住这些星系。在星系团中, 看得见的星系只占总质量的 1/300 以下, 而 99% 以上的质量是看不见的。不过, 在当时扎维奇的结果许多人并不相信。

同样在 20 世纪 30 年代, 荷兰天体物理学家奥尔特 (Jan Hendrik Oort) 独立地指出: 为了说明恒星的运动, 需要假定在星系附近存在着暗物质。

自 20 世纪 70 年代以来, 科学家们对许多星系的旋转曲线进行了系统的测量, 发现星系外围的物质运动速度很快, 常规物质提供的引力无法束缚住速度如此大的天体。因此暗物质的存在理论被广泛认同。图 1

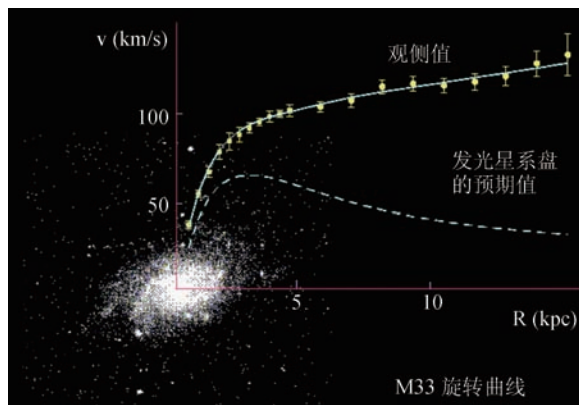


图 1 星系旋转速率与其星系团中心距离的关系。虚线为发光星系盘的预期值, 带误差的点为观测值

显示了星系旋转速度的观测结果与用明物质作预测的理论结果。其中虚线是发光物质预言的旋转曲线，实线是加上暗物质贡献后的旋转曲线，显然发光物质已不能解释观测数据。

2006年，美国天文学家利用钱德拉 X 射线望远镜对星系团 1E 0657-56 进行观测，如图 2 所示。因为其形状很像子弹头，又被称为子弹头星系团。图中红色区域为 X 射线望远镜的观测结果，这些 X 射线由热气体产生，所以我们能够重建出热气体的分布。图 2 中蓝色区域是根据引力透镜的观测结果计算出的主要的物质分布。出人意料的是热气体的分布和物质的主要分布区域并不重合。这表明物质主要分布在不发光的区域，这直接证明了暗物质的存在。一般认为这样的结构是两个星系团碰撞后形成的。碰撞后，暗物质因为相互作用弱，而以原星系团的速度相互远离。普通物质因为电磁相互作用，分离速度较慢。一段时间以后，普通物质和暗物质就相互分离，形成我们观测到的结构。



图 2 子弹头星系团的物质分布

根据各种观测结果，天文学家推测宇宙中最重要的成分是暗物质和暗能量，其中暗物质占宇宙 27% 左右，暗能量占约 68%，而通常可见的普通物质仅占宇宙总能量的 5%。探测和研究暗物质很可能导致物理学新的革命，会引起人类对物质世界的革命性的认识。

## 2. 暗物质粒子的性质

理论上，人们将可能的暗物质分为三个大类：冷暗物质、温暗物质、热暗物质。这个分类并非依照粒

子的真实温度，而是依照其运动的速率。

冷暗物质：低速运动的暗物质，无相对论效应；

温暗物质：粒子运动速度足以产生相对论效应；

热暗物质：粒子速度接近光速，是极端相对论粒子。

虽然可以有第四个称为复合暗物质的分类，但是这个理论在 20 世纪 90 年代由于暗能量的发现而被舍弃。

不同类型的暗物质对宇宙大尺度结构的形成有截然不同的影响。冷暗物质占主导的模型中，暗物质因为速度低而容易成团，然后小的成团结构再通过碰撞等过程形成更大尺度的结构。热暗物质因为速度很高，而无法成团。所以宇宙大尺度结构的形成方式是现有其他物质成团形成结构，然后热暗物质把这些结构打碎形成更小尺度的结构。这样的图像和我们的观测是相反的，因为观测发现小尺度的恒星等结构首先出现，然后出现星系，星系团等结构。温暗物质的效应介于两者之间。

不论何种理论模型构造的暗物质粒子，都应该有如下性质：即长寿命、作用弱（不论是暗物质粒子之间还是明暗物质之间），并且以冷暗物质或温暗物质为主，后者一般要求其质量比较大。这样才能满足目前所有的观测证据。而目前人类所了解的标准模型框架下的基本粒子都不符合暗物质粒子性质，因此，研究和探测暗物质粒子很可能导致物理学突破。

理论物理学家建立了多种暗物质模型，其中最受关注的模型称作：“大质量弱作用粒子（WIMP）”。在这一类模型中，暗物质粒子质量可达质子的几十到几千倍，暗物质之间以及暗物质同普通物质之间的相互作用强度比较弱。例如在超对称模型中，一种称作 *neutralino* 的新粒子就是这样的粒子，它的性质就满足现有的暗物质的观测。理论上可以假定这些暗物质粒子可以发生衰变或者它们之间发生湮灭，从而产生可以探测到的普通物质粒子，如正、负电子，反质子以及光子等。当然，发生这样反应过程的概率很小，也就是反应截面极小，需要通过大探测器及长时间的观测才有可能实现实验上的观测。这一假设是目前所有的空间和地下探测试验的理论基础。

## 3. 暗物质探测

暗物质的探测在当代粒子物理及天体物理领域是

一个很热门的研究领域。对于大质量弱相互作用粒子来说，物理学家可能通过放置在地下实验室，背景噪声减少到极低的探测器直接探测 WIMP，也可以通过地面或太空望远镜对这种粒子在星系中心，太阳中心或者地球中心湮灭产生的其他粒子来间接探测。此外还可以通过高能对撞机人工制造出暗物质粒子供科学家研究。

#### 直接探测

如果暗物质粒子和原子核具有相互作用。暗物质粒子与原子核碰撞会散射原子核，进而使之和周围的原子核发生碰撞。由此科学家可以探测到这些相互作用所释放出的热量和闪光。暗物质的核反冲信号会被进入地球的宇宙射线干扰，要减少宇宙射线  $\mu$  子的背景信号影响，唯一的办法是到地底深处的地下实验室进行相关的实验。世界上著名的地下实验室有意大利的大萨索国家实验室（Gran Sasso National Laboratory）和我国的锦屏地下实验室。

2011 年，大部分的实验使用低温探测器或惰性液体探测器。低温探测器是在低于 0.1 K 的环境下探测粒子撞击锗这类的晶体接收器所产生的热。惰性液体探测器则是探测液态氙或液态氦中粒子碰撞产生的闪烁。低温探测实验包括了 CDMS 等。惰性液体探测实验包括 LUX 等。这两种探测技术都能够从其他粒子与电子对撞的噪声中辨识出暗物质与核子的碰撞。其他种类的探测器实验有 SIMPLE 和 PICASSO 等。

方向性的暗物质探测方式是运用太阳系绕银河系的运动。利用低压 TPC（时间投影室），我们可以得知反弹路径的信息，进而探测 WIMP 与原子核的相互作用。从太阳行进方向入射的 WIMP 信号可以从各向同性的背景噪声中分离出来。这类的探测实验包括有 DMTPC 等。

低温暗物质搜寻项目（CDMS），位于加利福尼亚大学校园的隧道里的实验室。2009 年 12 月 17 日，CDMS 的研究团队发表了两个可能的 WIMP 事件。他们估计这两起事件来自已知背景信号（中子、错认的  $\beta$  射线或是  $\gamma$  射线）的可能性是 23%，并作出了这样的结论：“这个分析结果无法被视作 WIMP 的有力证据，但我们不能排除这两起事件来自 WIMP 的可能

性”。他们在明尼苏达州的 Souden 煤矿地下约 714 米处安装更高级的实验室设备，以进行二期低温暗物质搜寻项目（CDMS II）。

2011 年 5 月，位于美国 Souden 地下实验室的 CoGeNT 实验公布先前 15 个月的探测结果，显示粒子的碰撞率呈现周期性变化，夏天较高而冬天比较低，这可以看作是暗物质存在的证据之一。这个结果支持已经进行了 13 年的意大利的 DAMA/LIBRA 暗物质探测实验。CoGeNT 的实验结果显示，探测到的 WIMP 的质量是质子质量的 5 到 10 倍，这与某些其他的实验结果不符。

2010 年 12 月 12 日，中国首个极深地下实验室——“中国锦屏地下实验室（CJPL）”于在四川雅砻江锦屏水电站揭牌并投入使用，锦屏地下实验室垂直岩石覆盖达 2400 米，是当前世界岩石覆盖最深的实验室。它的建成标志着中国已经拥有了世界一流的洁净的低辐射研究平台，能够自主开展如暗物质探测这样的国际最前沿的基础研究课题。清华大学实验组的暗物质探测器已经率先进入实验室，并启动探测工作，而 2012 年上海交通大学等研究团队也进入这里开展暗物质的探测研究。这两个实验组 2014 年分别发表了各自的实验结果，发现他们的实验对低质量暗物质的探测灵敏度非常高，已经到达国际领先水平。

#### 间接探测

暗物质的间接探测主要是观测其两两湮灭时所产生的信号。由于其湮灭所产生的粒子与其暗物质的模型有关，有许多种类的实验被提出。假使暗物质是正反粒子为同一粒子的马约拉纳（Majorana）粒子，那么两个暗物质对撞可能湮灭产生  $\gamma$  射线或正负粒子对。如此可能会在星系晕生成大量  $\gamma$  射线、反质子和正电子。然而在完全了解其他来源的背景噪声以前，这类的探测不足以当作暗物质的决定性证据。

2008 年 ATIC 实验发现在 300~800 GeV 范围内宇宙线正负电子总和的流量高于理论预期的流量。后来 Fermi-LAT 卫星和 AMS-02 也发现正负电子的能谱存在“超出”，尽管“超出”的大小比 ATIC 小一些，能谱也更光滑。AMS-02 对宇宙线正负电子进行了更精确的测量，证实了该超出的存在。2008 年欧洲的

PAMELA 卫星发现正电子与总电子的比值, 从 10GeV 开始逐渐变大。但是标准的宇宙线理论认为该比值应该随能量增加而减小。AMS-02 同样以更高的精度证实了这一发现。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。但是天体物理的过程, 如脉冲星等也可以很好的解释这一现象。要区分这两类模型, 需要科学家在更大的能量范围内对超出进行高精度测量。我国 2015 年 12 月 17 日发射的暗物质粒子探测卫星 (“悟空”), 就是为这一科学目标设计的。对宇宙线正负电子和  $\gamma$  光子, 它具有目前最好的能量分辨率和最大的能量测量范围。

暗物质湮灭或衰变到其他不稳定粒子, 这些不稳定粒子衰变产物中也有高能  $\gamma$  光子。寻找这类信号也是暗物质间接探测的重要手段。如果暗物质湮灭 (或衰变) 产生两个光子, 那么光子的能量就等于暗物质粒子的静止质量 (或一半)。这在  $\gamma$  射线能谱上表现为发射线谱。天体物理过程无法产生  $\gamma$  射线线谱信号, 这类信号是暗物质存在相互作用的最有利的证据。探测器的能量分辨率越高, 线谱信号就越容易从背景中区分出来。而 “悟空” 具有最好的  $\gamma$  射线能量分辨率, 因此有望在这方面作出自己的贡献。

#### 对撞机探测

如果对撞粒子的总能量足够高, 以至于大于暗物质粒子的静止能量。在碰撞过程中就可能产生暗物质粒子。但是电中性的暗物质粒子无法被探测器探测到。在重建这个碰撞过程的能量和动量时, 你会发现能量动量有一部分消失掉了。科学家就是通过这种方法在对撞机上寻找暗物质的信号。在这个过程中, 主要的干扰来自中微子的产生过程, 因为中微子同样不带电, 也无法被探测器探测到。大型强子对撞机 (LHC) 是世界上能量最大的对撞机, 相关暗物质信号的寻找一直是其最重要的科学目标之一。到目前为止, 还没有在对撞机上发现暗物质粒子的迹象。我国的正负电子对撞机, 因为对撞能量较小, 可以用来寻找低质量的暗物质粒子。

## 4. 空间探测暗物质概述

已经发射升空的探测器有: 丁肇中领导的阿尔法磁谱仪 2 (AMS-02), 日本的量热电子望远镜 (CALET), 美国的费米大视场望远镜 (Fermi-LAT) 和我国的暗

物质粒子探测卫星 “悟空” (DAMPE)。其中 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 和已停止运行的 PAMELA 卫星通过磁谱仪来测量宇宙线粒子的能量和区分电荷的正负。下面我们以 DAMPE 和 AMS-02 为例介绍宇宙线的空间探测实验。

#### 暗物质粒子探测卫星

暗物质粒子探测卫星 “悟空”, 是我国首颗空间高能粒子探测卫星, 它是我国为主, 联合瑞士和意大利参与共同研制的。它主要探测电子宇宙射线、高能  $\gamma$  射线和高达 PeV 的各类核素宇宙射线。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特点。其设计指标如表 1。

表 1 暗物质粒子探测卫星的设计指标

	电子	$\gamma$ 射线	核素
测量能区	5GeV~10TeV	5GeV-10TeV	100GeV~100TeV
能量分辨率	1.5% @ 800GeV	1.5% @ 800GeV	好于 40% @ 800GeV
空间分辨率	0.3° @ 100GeV	0.3° @ 100GeV	0.2° @ 100GeV
几何因子	>0.3m <sup>2</sup> ·Sr	>0.3m <sup>2</sup> ·Sr	>0.2m <sup>2</sup> ·Sr

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 3。从图 3 中我们可以看到, 暗物质粒子探测卫星的探测器共有 4 部分组成, 分别是: 塑闪阵列探测器、硅阵列探测器、BGO 量能器和中子探测器。

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, 也可用于区分高能电子和  $\gamma$  射线。高能带电粒子在穿过塑料闪烁体时, 通过电离与发射辐射 (光子) 的方式损失能量。这些沉积的能量转化为荧光。根据荧光信号的强弱来判断电荷的大小。塑闪阵列探测器是由兰州近代物理研究所研制的。

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, 并在前三层的下面放置钨板。高能光子通过钨板时有较大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信号, 则入射粒子为  $\gamma$  射线。硅阵列探测器是由中科院高能物理所、日内瓦大学、佩鲁贾大学等单位共同研制的。

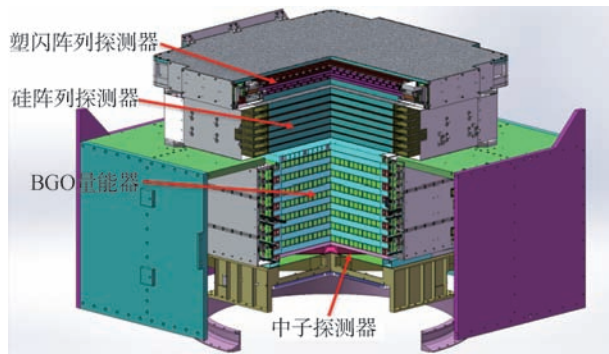


图3 暗物质粒子探测卫星的结构布局示意图

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 $\gamma$ 射线的能量。BGO量能器由中国科学技术大学以及紫金山天文台共同研制而成。BGO晶体是一种没有激活剂的无色透明的纯无机闪烁体，它被广泛用作探测高能带电粒子和 $\gamma$ 射线的闪烁体材料。暗物质粒子探测卫星所使用的BGO晶体是由上海硅酸盐所专门设计开发的。

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4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。由图4可知宇宙线电子和质子在探测器中产生的簇射的形状差别很大。这是因为电子宇宙线在探测器中只产生电磁簇射，而质子还会产生强子簇射。根据簇射的形状，我们可以推断入射粒子的种类。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。我们根据探测器中沉积的能量的多少来反推入射宇宙线的能量。

宇宙线能量越高，产生的簇射就越大。比较薄的探测器就无法对簇射进行完全测量，所以能量的测量会有较大的误差。由此可见探测器做的越厚，能量分辨率就会越高，能量探测范围也越大。“悟空”是现

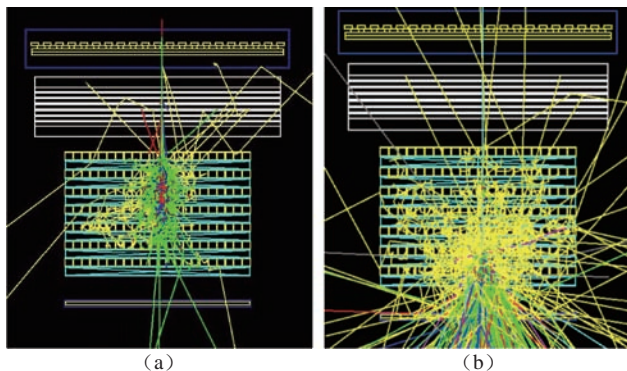


图4 100GeV的电子(a)和质子(b)在探测器中产生的簇射。

有这类探测器中最厚的，因此能量分辨率也最好。

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会产生大量的次级中子，而高能电子产生的次级中子则较少。根据这种效应，我们可以进一步区分宇宙线中的质子和电子。中子探测器主要由紫金山天文台负责研制。

### AMS-02

阿尔法磁谱仪(AMS-02)也被称为反物质磁谱仪，配备了超导磁铁和超高精度探测器，主要目的是探测宇宙中的反物质和暗物质。AMS-02是人类发射的最复杂、最昂贵的一台宇宙线探测设备，代表了当今科学实验的最高技术手段，由16个国家和地区的600余名科学家历时近18年完成，耗资21亿美元，预计在轨运行15至20年。

AMS-2的具体结构见图5，自上而下分别为：硅径迹探测器(Tracker)，穿越辐射探测器(TRD)，飞行时间探测器(TOF)，永磁体，环像切伦科夫探测器(RICH)和电磁量能器(ECAL)。

硅径迹探测器主要测量的是入射宇宙线的轨迹。TOF记录的是粒子达到的时间，根据到达时间的先后，推断出宇宙线粒子的入射方向。知道了宇宙线粒子的方向和径迹，再根据磁场的大小和方向，我们就知道了宇宙线粒子所带的电荷的大小和正负。刚度 $R$ 的定

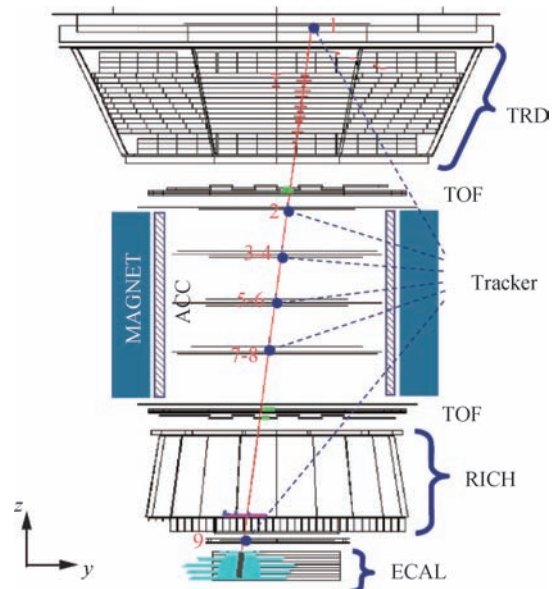


图5 AMS-02的结构示意图

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很简单地求得曲率半径，就可以计算出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里区分出来，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伦科夫光。带电粒子在介质中的速度如果大于光在该介质中的速度，就会向外辐射切伦科夫光，并且速度和电荷数越大，辐射越强。AMS-02 通过收集到的切伦科夫光的信息反推粒子的速度和电荷。

综合上述信息，经过计算就可以得到宇宙线粒子的质量和能量。AMS-02 中电磁量能器也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。

“悟空”和 AMS-02 各有优势，互为补充。对电子宇宙线而言，“悟空”的可探测能量范围更大，能量分辨率也更好。而且“悟空”可以对高能  $\gamma$  射线进行高精度的测量。AMS-02 的优势在于能够区分正负电荷，从而可以对正负电子、质子宇宙线分别进行测量，而“悟空”只能测量正负电子总和的能谱。

## 5. 总结与展望

暗物质的研究方兴未艾，一些国家在大力支持暗

物质的研究中。暗物质实验可以分为直接探测、间接探测和对撞机探测这三种类型。尽管实验上发现了一些疑似的信号，但这些信号都没有得到确认。可以预见，未来几年暗物质的研究仍将如火如荼地进行下去。

我国拥有世界上最深的地下实验室——锦屏地下实验室，是世界上开展暗物质直接探测的最佳场所。清华大学和上海交通大学的实验都已经取得了很大的成绩，他们都在低能量暗物质信号的寻找方面做出了达到国际最高水平的工作。

在暗物质间接探测方面，暗物质粒子探测卫星“悟空”也已经成功发射升空。对电子和  $\gamma$  光子的探测，它具有世界上最好的能量分辨率和最大的能量探测范围。在高能正负电子的测量和  $\gamma$  射线线谱的寻找等方面有非常大的优势。在未来三年的在轨运行中，我们期望“悟空”能出色完成任务，取回真经。

大型强子对撞机是当今世界能量最高，技术最先进的粒子对撞机，也是当今世界对撞机探测暗物质的主力。不过强子对撞机信号背景复杂，分析难度大，到现在为止没有发现暗物质的信号。计划中的中国下一代对撞机性能先进，技术含量高，在对撞机探测暗物质领域也会取得一席之地。

基金资助：国家重点基础研究发展计划（2013CB837000）、国家自然科学基金（11303096，11273070）和中国科学院青年创新促进会（2014275，2016288）

### 科苑快讯

## 古老圣经由牲畜制成

中世纪的“袖珍圣经”曾在 12 世纪的法国、英格兰、意大利和西班牙广泛传播，因为小巧便携，在当时是一项技术突破。超薄的动物皮肤为书籍的诞生提供了可能，技术专家们长久以来一直在争论，中世纪的工匠们是如何制造出这样的薄纸的。线索之一是当时称为“abortivum”的所谓“子宫皮纸”。有一种假设认为，薄羊皮纸是由胎死腹中的小牛或小动物（如兔子）的皮制成。还有研究者怀疑：数量众多的书需要大量胎牛皮，而小动物皮难以制成耐用的羊皮纸。另一种假设认为，薄纸是技术进步使然，也许是将动物皮层层分离或打磨而成。现在，《美国科学院院刊》（*Proceedings of the National Academy*

*of Sciences*）网站上发表的文章中，科学家通过蛋白质分析终于揭开了这个谜。

他们首先采用无损方法从几世纪前的手稿上采集样本，采用聚氯乙烯（PVC）制成的普通矩形绘图橡皮，这是用于去除污渍古籍上灰尘的常用工具。这就像用气球摩擦吸引头发一样，将携带足够胶原蛋白的橡皮碎屑放入质谱仪中，检测其中的化学物质类型。化验结果证明，纸张的原料不只有牛皮，还有山羊皮和绵羊皮，这说明薄羊皮纸不是因为使用了胎牛皮，而是通过一种耗时的手工技术制成。

（高凌云编译自 2015 年 11 月 23 日 [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org)）

