

# 捕捉“失踪”的物质

■冯磊(中科院紫金山天文台)

我国首颗空间科学卫星——暗物质粒子探测卫星，将于12月15日至18日之间，在酒泉卫星发射基地择机发射。这颗卫星将在轨工作3年，其搭载的暗物质探测器在关键指标方面均超过目前国际最高水平，是世界上迄今为止观测能段范围最宽、能量分辨率最优的暗物质粒子空间探测器。



中国暗物质粒子探测卫星电脑模拟图

## 暗物质存在的证据

暗物质是现代宇宙学的核心问题之一，是天文学和物理学界极为关注并着力破解的一大谜团。暗物质促成了宇宙结构的形成，如果没有暗物质就不会形成星系、恒星和行星，更谈不上人类。对占当今宇宙能量密度90%以上的暗物质、暗能量，人类尚知之甚少。

天文观测表明，宇宙中最重要的成分是暗物质和暗能量，其中暗物质约占27%，暗能量约占68%，而通常所观测到的普通物质只占宇宙总能量的5%。

暗物质是一种不发光、不带电荷、不参与电磁相互作用的物质。所以暗物质不能为我们所看见或感知。但暗物质有引力作用，科学家们可以通过相关的天文学和物理学方法，探知其存在。

最早提出证据并推断暗物质存在的是瑞士天文学家弗里兹·扎维奇。1932年，他在研究Coma星团的时候发现，根据维里定理计算出的星团总质量要远远大于根据光度计算出来的星团总质量。

他猜想星系团中存在一种不发光的物质，不然不足以束缚住这些星系。他把这类看不见的物质称作“暗物质”。

20世纪70年代，美国天文学家维拉·鲁宾系统地测量了漩涡星系的旋转曲线，发现星系的旋转曲线和可见物质的预言是不相符的。如果不修改引力理论的话，就需要假设在星系内存在一种不发光但有引力的物质，也就是暗物质。

此后，又有很多观测证据证实了暗物质的存在，比如引力透镜、宇宙微波背景辐射等。

尽管现在人们对暗物质的性质仍知之甚少，但暗物质这一概念已得到了科学界的广泛认可。

## 和“幽灵”捉迷藏

暗物质就存在于我们身边，也许1立方米的空气中就有上千颗暗物质粒子。它们能像幽灵一样穿透障碍物，几乎不着痕迹地飞走。那么，该如何捕捉它们呢？一般来说，暗物质粒子的探测分为三类——直接探测、间接探测和对撞机探测。

对暗物质的研究是物理学和天文学的重点和热点之一。现有暗物质存在的证据都来自于引力效应，而暗物质是否具有其他类型的相互作用，人们尚不清楚。为了了解暗物质引力之外的物理属性，世界各国的科学家设计了多种实验来探测暗物质粒子。

**直接探测** 直接探测测量的是暗物质粒子和原子核碰撞后原子核的反冲信号。高速的暗物质粒子和探测器中的靶原子核发生碰撞，碰撞后原来静止的原子核就飞了出去。这个信号一般通过测量声子、光和电荷这三类信号获得。

国际上已经开展的实验有很多，如Xenon、CoGeNT、CDMS、DAMA等。为了屏蔽大气中带电粒子造成的信号误判，这类实验必须在很深的地下进行。在这一领域，欧洲的DAMA实验团队曾声称已经观测到暗物质，但包括美国LUX实验在内的其他探索，均未证实此发现。

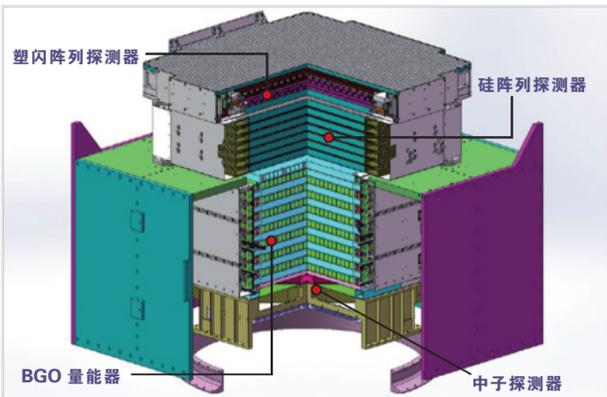
我国的科学家已深度参与到暗物质直接探测研究的国际竞争中。2010年12月投入使用的我国四川“锦屏地下实验室”，垂直岩石覆盖达2400米，是目前世界上最深的地下实验室。它具有最低的宇宙射线干扰本底噪声，是最适宜开展暗物质直接探测的实验室。清华大学等单

位在这个实验室开展的CDEX实验和上海交通大学等单位设计运行的PandaX实验，都取得了具有国际竞争力的成果。

**间接探测** 间接探测主要探测银河系中暗物质湮灭或衰变产生的末态粒子，这些粒子经过传播后以宇宙线的形式被探测到。间接探测的优点是可以给出暗物质粒子的质量，并研究其寿命或自湮灭截面。

近年来的间接探测有意大利的PAMELA卫星、南极的ATIC气球、美国的费米卫星以及由华人科学家、诺贝尔奖获得者丁肇中先生领导的国际合作项目阿尔法磁谱仪2号(AMS-02)和最新发射的日本CALET探测器等。有些实验项目已经取得了一些结果，但在能量测量精度、测量能段等方面还存在不同程度的局限。

**对撞机探测** 在暗物质粒子碰撞实验中，如果碰撞粒子质心能足够高，超过暗物质粒子的质量，那么就有可能产生暗物质粒子。电中性的暗物质粒子无法被对撞机探测到，那么该事例的观测就表现为能量的丢失。欧洲粒子中心的大型强子对撞机(LHC)是这一类暗物质探测实验最重要的科学装置。



我国首颗暗物质粒子探测卫星由四层探测器组成：

**闪烁阵列探测器** 由中科院兰州近代物理研究所负责研制，主要功能是测量高能粒子的电荷。

**硅阵列探测器** 由中科院高能物理研究所与瑞士、意大利合作研制，主要功能是测量入射粒子的方向并实现高能光子向电子对的转换。

**BGO量能器** 是探测器最核心的组成部分，由中科大和中科院紫金山天文台联合研制，其功能是测量入射粒子的能量，并区分质子和电子。

**中子探测器** 由中科院紫金山天文台负责研制，主要功能是通过探测对簇射产生的中子的测量，来进一步区分高能质子和电子。

## 我国首颗暗物质卫星

对宇宙线电子和高能光子而言，我国即将发射的暗物质粒子探测卫星，是迄今为止观测能量范围最宽、能量分辨率最优的空间探测器。卫星通过探测宇宙中高能粒子的方向、能量以及电荷大小，来寻找和研究暗物质粒子。

低能宇宙线经过大气层时会被屏蔽，从而难以在地面进行测量。到空间观测暗物质粒子湮灭产生的末态粒子，如伽马射线、电子和正电子、反质子等，是暗物质粒子探测的一个重要方法，也是国际物理学界的热点和前沿。

即将发射的我国首颗暗物质粒子探测卫星，是一颗运行在500千米高度太阳同步轨道的科学实验卫星。其主要科学目标，是开展高能正负电子和伽马射线的观测，进而探寻暗物质存在的证据，并研究其空间分布特性。

该卫星由闪烁阵列探测器、硅阵列探测器、BGO量能器和中子探测器等4层探测器组成，包含近8万路电子学信号通道。与美国的费米卫星相比，我国的暗物质粒子探测卫星对高能电子和光子的能量分辨率要高约10倍；同时，它具有更大的探测电子宇宙线的视场，相当于丁肇中团队AMS-02的10倍。此外，它也很具有区别电子与质子的能力。

如果入射宇宙线能量非常高，它

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，能量探测范围也就越大。以前世界范围内最长的BGO晶体只有30厘米，而我国科学家进行了技术革新，成功研制了60厘米长的BGO晶体。暗物质粒子探测卫星的BGO量能器由14层这种晶体组成，对应的辐射长度是费米卫星的4倍，因而具有更高的能量探测能力和更好的能量分辨率。

作为我国首发的大型科学探测卫星，暗物质粒子探测卫星主要的科学仪器无论重量、功耗，还是电子学线路的复杂度、工程实现难度，均超出了以往传统意义上有效载荷的定义。就拿BGO量能器来说，它结构复杂、指标先进、技术难度高，而且是我国空间型号任务中此类探测器装置的首次实现，并无先例可循，其研制是一项艰巨的任务。

## 相关链接

### “上天”“入地”寻找暗物质

目前，世界上暗物质探测项目主要有——

机维护和升级，LHC正式开启第二阶段运行。至今，LHC尚未发现暗物质产生的证据。

#### 华裔科学家丁肇中团队的阿尔法磁谱仪(AMS-02)

由华裔科学家丁肇中领导的来自16个国家、60家研究机构约600位科学家参与的阿尔法磁谱仪——AMS-02项目，整个建造过程历时达12年之久，耗资约合人民币120亿元。

2011年5月，AMS-02发射并成功运行在高度约380千米的国际空间站上，通过宇宙线成分和流量观测，来寻找暗物质和反物质。

2014年9月18日，丁肇中在瑞士日内瓦主持新闻发布会，宣布与山东大学程林团队合作的AMS项目最新研究成果：宇宙射线中过量的正电子可能来自暗物质。在已完成的观测中，证明暗物质存在实验的6个有关特征中，已有5个得到确认。

#### 中国四川锦屏地下实验室

2010年12月在四川雅砻江锦屏水电站揭牌并投入使用的“锦屏地下实验室”，垂直岩石覆盖达2400米，是目前世界上最深的暗物质探测地下实验室。它的建成，标志着中国已经拥有了世界一流的洁净低辐射研究平台。

清华大学的暗物质实验(CDEX)和上海交通大学的粒子和天体物理氙探测器(PandaX)实验都已经发表最新的研究成果，对小质量暗物质的参数空间给出了很强的限制。2014年8月，锦屏地下实验室开始扩建，将从4000立方米扩容到13万立方米。

#### 即将发射的中国首颗暗物质粒子探测卫星(DAMPE)

即将发射的我国首颗空间科学卫星——暗物质粒子探测卫星(Dark Matter Particle Explorer, DAMPE)，是中科院战略先导专项空间科学项目5颗卫星中的首发卫星，由紫金山天文台、中国科技大学、中科院兰州近代物理研究所和中科院高能物理研究所等单位合作研发，是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，在暗物质间接探测方面具有较强的国际竞争力。

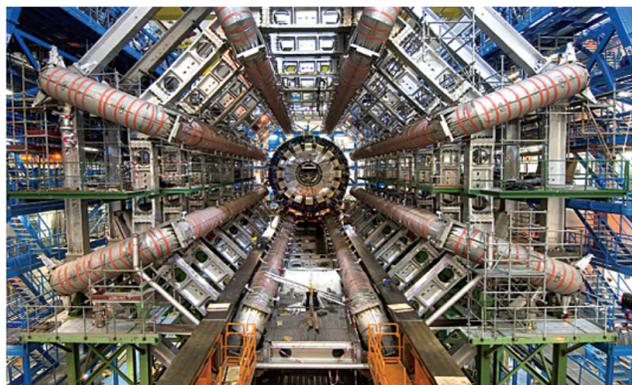
#### 欧洲粒子中心的大型强子对撞机(LHC)

欧洲粒子中心的大型强子对撞机是目前世界上最大、能量最高的粒子加速器，是一种将质子加速碰撞的高能物理设备。它位于瑞士和法国交界的侏罗山地下100米深、总长约27公里(含环形隧道)的隧道内。2008年9月，LHC初次启动，后因故障停止运转，耗资3000万美元维修后，于2009年秋天重新启动。

今年4月5日，经过约两年的停



阿尔法磁谱仪(AMS-02)



大型强子对撞机(LHC)



中国锦屏地下实验室