

# 直接探测暗物质

马欣华



## 一、为什么相信有暗物质存在？

“暗物质”这个名字听起来有些神秘（其实还有听起来更神秘的“暗能量”，这超出了本文的范围。暗物质、暗能量并称为漂浮在当代物理学及天文学上空的两朵乌云）。从字面上来看，和暗物质对应的应该是“明物质”吧。虽然还没有人这么叫，但是其实“明物质”是对已知物质形态的一个很简单明了的形容，因为已知物质是由已知的基本粒子——夸克、轻子及其相互作用媒介子（包括光子、胶子、 $Z^0$ 、 $W^\pm$ 以及尚未发现的引力子）——所构成的，这些基本粒子参与（或部分参与）四大相互作用——万有引力作用、电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用，比如能发光或者发电，或者作用、衰变后的次级粒子能发光发电。光、电即电磁波和电流，实际是从宏观角度上说的，现代的探测器归根到底都是测光信号、电信号以及信号组成的径迹。这样，这些物质就都在“明”处了，即人们能在实验室里用探测器（当然是由“明物质”构成的）探测到其存在或者曾经存在，这就是现代物理学的实验基石。大家可以想出一些例子，比如居里夫妇发现放射性元素，卢瑟福测出原子结构，LEP 精确测量  $Z^0$ 、 $W^\pm$  质量等。

而暗物质不同，它不是在实验室里对微观世界进行研究时产生的概念，而是来自于天文学观测这一宏观领域，由兹维基 (F. Zwicky) 早在 70 多年前就提出了。这似乎又回到了牛顿时代，牛顿正是从前人对太阳系活动的观测结果中发现万有引力定律的。出个最基本的大学普通物理习题吧（做个积分马上见分晓）：在万有引力作用下，如果星系的质量大部分都集中在星系中心，那么一颗位于星系中心以外的恒星绕中心旋转的速度随恒星到中心的距离如何变化（所谓旋转曲线）？而如果星系的质量分散在整个星系，换句话说，这颗恒星穿行在一个质量球中，那么速度和距离的关系又是怎样呢？对恒星速度的观测表明，星系的质量并不集中在星系中心这一星系中最亮的、也就是说恒星最多的地方，而是分散在整个星系晕中，这就说明了星系中大部分质量是“暗”的。还不仅仅是这一个证据，对星

系、星系团、引力透镜、宇宙大尺度结构的观测结果都表明，宇宙中大部分物质是暗物质。（不过还有另外一个思路来解释这些天文现象，就是修改引力理论，即 MOND，本文暂不涉及这方面。）

天文观测表明，暗物质有质量，至少参与引力相互作用，不参与电磁作用和强相互作用，可能有弱的相互作用（与四大相互作用中的弱相互作用并不相同），而且暗物质不是重子物质。到目前为止，人们所了解的暗物质的性能特点就这些了，而且暗物质参与的作用如此之弱以至于很难观测到，这就给予理论以弹性很大的想象与发挥空间。理论预言的暗物质粒子类型让人眼花缭乱，不仅质量可轻可重，而且还可热可温可冷，即运动速度可以是相对论的、近相对论的或者非相对论的。热暗物质的候选者是中微子；温暗物质的候选者是 sterile neutrinos、gravitinos 和 axino；冷暗物质的候选者是超对称模型预言的 neutralino、轴子、类轴子粒子。

## 二、怎样才能捉到暗物质？

既然暗物质粒子作用如此之弱，那么还有可能抓到它吗？物理学家的信念是：暗物质粒子肯定不是孤家寡人，而是一定会 and 周围已知粒子发生作用，并且暗物质粒子的存在能够在已知粒子的存在、变化形态上反映出来，作用再弱也一定能够被观测到。更进一步的，物理学家相信可以用费曼图描述相互作用，如图 1 所示，暗物质粒子可以和已知粒子产生未知的相互作用，三个箭头代表三种可能的反应过程：

1. 两个已知粒子碰撞产生两个暗物质粒子（向左箭头）。这可以在对撞机实验上产生。目前全世界最大的对撞机 LHC 的一个重要物理目标就是希望在高能质子对撞产生的次级粒子中找到暗物质。

2. 两个暗物质粒子湮灭产生两个已知粒子，比如  $\gamma$ 、正电子、反质子（向右箭头）。高空气球实验、卫星实验对各种宇宙线成分的能谱进行观测，查看是否有无法解释的对本底的超出，这种观测方式被称为暗物质的间接探测。

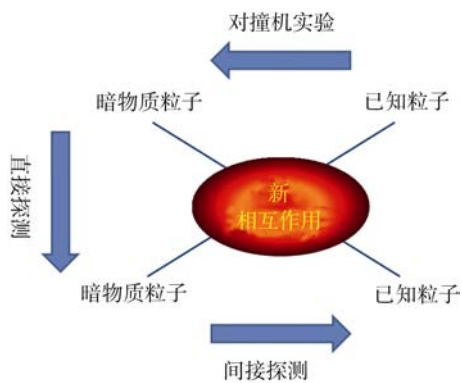


图1 理论预言的暗物质粒子参与的作用过程以及相对应的实验方式

3. 一个暗物质粒子和一个已知粒子碰撞产生另一个暗物质粒子和另一个已知粒子（向下箭头）。这里已知粒子可以是原子核、电子等。以暗物质粒子与原子核碰撞引起的核反冲为例，如果碰撞前后的粒子相同，那么碰撞就是弹性散射。进一步说，如果暗物质粒子不带自旋，则碰撞为自旋无关弹性散射，这时与暗物质粒子质量相近的原子核的反冲能最高（出一个中学物理题吧：动能相同的乒乓球、篮球和网球分别和一个静止的网球发生弹性正碰，哪种情况下被撞的网球获得的动能最大？）；如果暗物质粒子带自旋（想象一下贝克汉姆罚任意球时踢出的旋转球，当然这里的自旋是量子力学概念），则碰撞为自旋相关弹性散射，这时自旋因子最大的原子核的反冲能最高。如果碰撞后产生的粒子不是原初的粒子了，那么碰撞就是非弹性散射。除了核反冲，电子反冲也是有可能发生的，而且可能伴随一些电磁辐射。对这些反应的观测被称为暗物质的直接探测。本文重点介绍暗物质的直接观测。

### 三、怎样“直接”探测暗物质？

暗物质作用既然如此弱，那么它作用产生的信号就很容易被已知粒子产生的信号（称为本底）所覆盖。最严重的本底是宇宙线（即来自太空的射线，及其与大气层原子核作用后产生的成千上万的次级粒子簇射），而为了屏蔽掉宇宙线本底就只能往地下去，这样大量的宇宙线就被土石吸收（屏蔽）掉了。世界上已建的和新建的地下实验室有十几家，已建的如意大利的格兰萨索国家深层地下实验室（LNGS，1500m 深），新建的如中国四川境内的锦屏地下实验室(2500m 深)。那么到了地下是不是就够了？还不够，地下还有各种辐射，比如岩石中的

放射性同位素产生的辐射，实验室空气中的氦气产生的辐射等，因此还要搭建屏蔽室，比如位于 LNGS 的中国、意大利合作 DAMA 实验装置（图 2（a））；在中间的方形探测器阵列之外，由内到外依次是铜砖，铅砖，镭板，聚乙烯/石蜡板块。这些都封闭在一个树脂玻璃箱中，实验室被厚约 1m 的混凝土完全包围，而且充满氦气，将探测器与外界空气相隔离。因此工作人员在操作时都要穿上防护衣以减少污染，并且必须戴上氧气罩以防止在充满氦气的环境下产生缺氧的危险（图 2（b））。

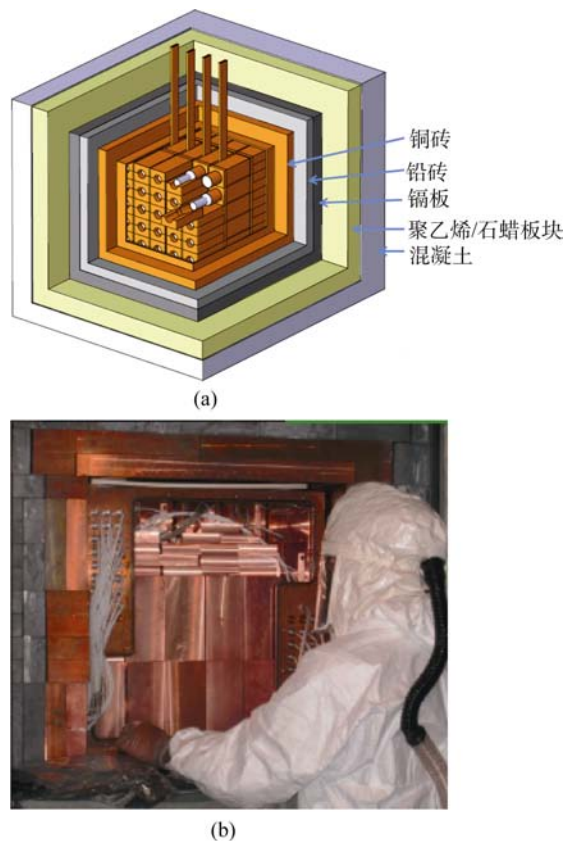


图2 (a) DAMA 探测器结构图。中间是方形的探测器阵列。四根立柱承载标定用放射源。  
(b) 工作人员在安装探测器，已经把铜砖和铅砖摆好

好了，前面已经铺垫得差不多了，下面进入本文的核心：形式各异的探测器。大家都知道，物理学包括力、热、声、光、电，物质形态包括固体（包括晶体，晶体又包括闪烁晶体、半导体晶体）、液体、气体，而在暗物质直接探测实验中，这些物理上能用来测弱信号的手段几乎全用上了，而且无所不用其极。在本文中，“力”特指万有引力，在上文的天文学观测中已经提及，恐怕直接探测很难；“热”和“声”并在一起，两者本质是一样的；“光”特指闪

烁荧光；“电”指电离。这就形成了图 3 中的三角形，暗物质直接探测实验都是以其中一项或者两项为探测信号的。图 3 中所列的这 34 家实验中（可能还有漏掉的，抱歉），有的已经结束，有的刚刚开始，有的已经坚持了十几年，并且在不断更新技术，增大规模。由于篇幅所限，本文不可能对所有的实验都一一涉及，只能分别记述几种探测方法，再相应的挑出几家具有代表性的实验来简要介绍一下。（如果读者想到了一个这里没有列出的测弱信号的方法，那就有可能成为一个新的暗物质直接探测方法！）

### 1. 光

只测量光信号的实验分为两类：闪烁晶体实验和惰性液体实验。闪烁晶体实验的代表就是前面已经提及的中国、意大利合作 DAMA 实验。说起来原理很简单，就是观测暗物质粒子穿过碘化钠（掺铊）晶体时所发出的闪烁光，是用光电倍增管将闪烁光转化成电信号而记录下来的。DAMA 在降低碘化钠（掺铊）晶体探测器中的剩余污染方面做了坚持不懈的工作，积累了大量经验，才得到了世界上放射性本底最低的晶体，已经实现了超低放射性本底  $<1\text{ppt}$ ，ppt 的意思是  $10^{-12}\text{g/g}$ ，也就是说一百万吨晶体里只有 1 克放射性本底！而且，碘化钠（掺

铊）晶体在许多方面占有竞争优势：可以有效地观测第二节中提到的所有的暗物质直接探测信号；既对重质量暗物质敏感（碘原子核重），又对轻质量暗物质敏感（钠核轻）；既对自旋无关弹性散射敏感（碘），又对自旋相关弹性散射敏感（钠自旋因子大），同时还可以测非弹性散射；具有高光产额的特性，高光产额和高放射性纯度保证了探测阈能（能测量的最低能量）能够低至 2 keVee（ee 代表等效电子）；探测器阵列能够达到较大的规模。目前 DAMA 采用的晶体阵列已经达到 250 kg，而且具有好的长期稳定性，能够多年连续、安全、可靠地运行。DAMA 实验使用高放射性纯度的碘化钠（掺铊）闪烁晶体作为靶探测器，可以研究广泛的暗物质候选者，多样的相互作用类型以及多种天体物理参量。有的实验选择了其他的闪烁晶体，比如中国、韩国合作 KIMS 实验采用碘化铯（掺铊），目标集中在对自旋无关的重质量暗物质的核反冲的探测（碘、铯都很重）；日本 ELEGANT VI/CANDLES 实验采用氟化钙（前者是掺铊的氟化钙，后者是纯的氟化钙），目标集中在对自旋相关的核反冲的探测，因为氟是自旋因子最大的一个原子核。中国科学院高能物理研究所正在研究一个大型晶体探测阵列方案（图 4），其中间的晶体探测阵列是泡在自身不产生闪烁

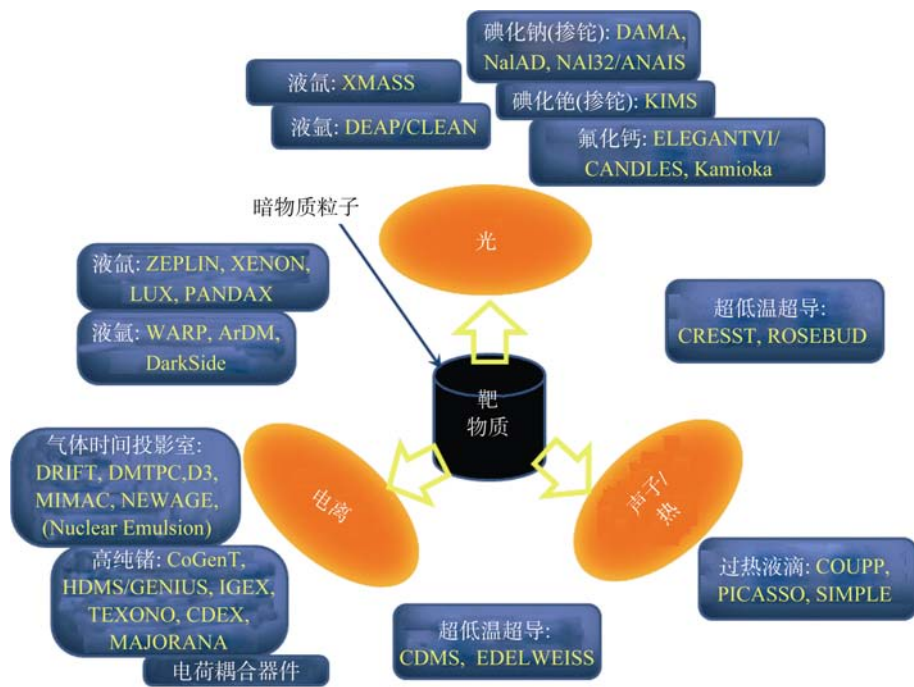


图 3 直接探测暗物质方法和实验汇总

椭圆框内是暗物质在靶物质中产生的信号类型。方框内中文是探测器材料或者探测方法，英文是相关实验

光的液体中，这样晶体探测阵列以外的放射本底就被隔开了。上述做法称作被动屏蔽，即把放射性本底挡在探测器之外；还可以做主动屏蔽，也就是说即使有放射性本底进来了，也可以把它们排除掉。图4中外围是纯净水，起主动屏蔽的作用，这样探测阵列以外来的放射性本底在水中就会产生光信号从而被区分出来。该方案的另一个优点是可以灵活替换晶体用于不同的暗物质模型的研究。惰性液体实验在“光+电离”一节一并提及。

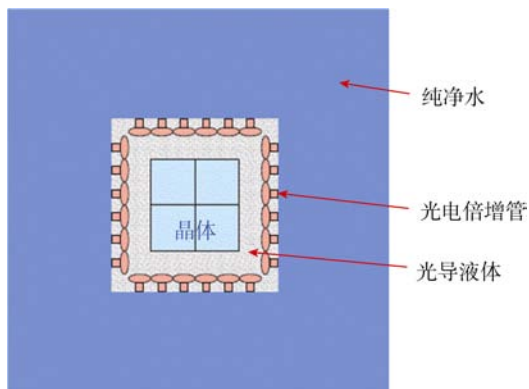
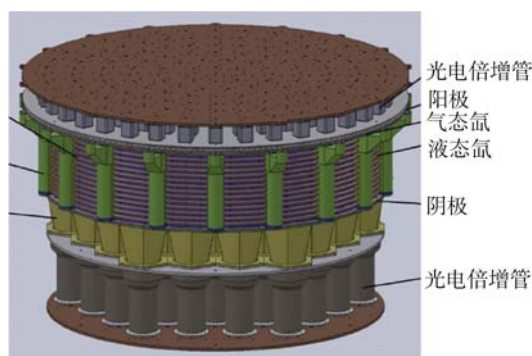


图4 一个大型晶体探测阵列方案

## 2. 光+电离

同时测量光信号和电离信号的实验主要用惰性液体。在常温下惰性元素状态都是气体，因此就必须在低温环境下得到惰性液体。惰性液体的好处是核反冲既能够产生荧光，又能够产生电离电子。如果探测器只有惰性液体，那么就只测荧光（第1节）。如果探测器中惰性材料为气液两相，那么既能够测量荧光，又能够测量电离电子。比如上海交通大学的液氙实验 PANDAX（图5（a）），核反冲产生的荧光被下面的光电倍增管接收，电子则在时间投影室（TPC）产生的强电场中加速而从液氙漂移到气氙中，在气氙中发出的光被上面的光电倍增管接收。时间投影室是由多层电极丝组成的，包括阴极、阳极和多层栅极。这样一个核反冲产生了时间、幅度不同的两个信号，依靠这两个信号就可以把核反冲和本底区别开来。除了液氙，液氙也被用作靶物质，中国、美国、意大利合作 DarkSide 实验（图5（b））就是刚起步的液氙实验。由于靶物质原子核的质量不同，液氙适用于直接探测重质量暗物质粒子，而液氙则侧重于较轻质量的暗物质粒子的寻找。液氙的一个明显的好处是价格便宜，比较容易做到较大规模，这样就可以做其他的物理课题比如质子衰变观测等。

23 卷第 6 期 (总 138 期)



(a) PANDAX实验



(b) DarkSide实验

图5 同时测量光信号和电离信号的探测器结构图

## 3. 电离

只测量电离信号的实验分为三类：气体时间投影室实验、高纯锗实验和 CCD 实验。这里又讲到了时间投影室，只不过这回不只是一要测核反冲产生的电离信号的强弱，更重要的是测出反冲核的径迹，进而得到核反冲的方向，至于为什么方向如此重要，将在第4节解释。因为反冲核在气体中比在液体中反冲的路程会更长，因此选用气体，这样反冲径迹就更长，反冲方向也更好确定，这正是气体时间投影室的长项。当然，不利的是气体稀薄，需要做得相当大才能有足够的靶原子核数，与暗物质粒子作用的机会才会更多，但是测到径迹才表明暗物质粒子被真的“跟踪”到了。以 DMTPC 实验为例（图6（a）），时间投影室 TPC 记录下径迹在平行页面的二维投影，而上下的电荷耦合器件（CCD）则拍下了径迹在垂直页面的二维投影，这样三维径迹就能合成出来了。DMTPC 的靶材料选择了  $CF_4$ ，目标集中在对暗物质的自旋相关弹性散射的探测。

· 33 ·

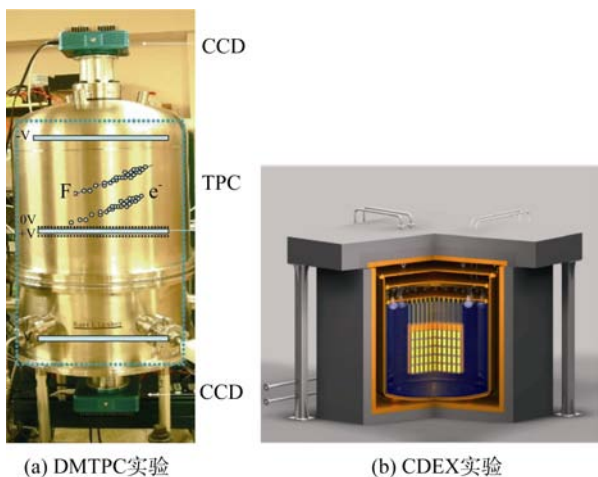


图 6 测量电离信号的探测器结构图

而高纯锗实验采用的是另一种原理：暗物质粒子造成的核反冲在高纯度的半导体晶体锗中造成电子-空穴对，电子与空穴在电场作用下分别向两极运动，并被电极收集而给出电脉冲。高纯锗是工作在液氮温度下的。清华大学 CDEX 实验就是采用高纯锗探测器（图 6 (b)）。高纯锗探测器的优势在于有很好的能量分辨，并且阈能可以降得很低。

CCD 实验是以 CCD 本身的半导体硅为靶材料的，主要特点是阈能可以降得很低。目前 CCD 实验处于刚起步阶段，中国科学院高能物理研究所陈勇等正在开展这方面的研究。

#### 4. 电离+声子/热

同时测量电离信号和声子信号的实验主要是超低温超导实验，比如 CDMS 实验（图 7），半导体晶体锗或者硅被用作靶材料，同第 3 节一样，核反冲造成电子-空穴对从而在电场作用下给出电脉冲。不过这次靶材料被放置在超低温下 ( $<50\text{mK}$ )，半导体中的热能是由声子传播的，声子会扩散到钨作的传感器上使之温度升高，从而使传感器由超导态变成常态，电阻增大，这样电信号产生了。依靠这两个信号就可以把核反冲和本底区别开来。

#### 5. 热

只测量热信号的实验，比如 PICASSO 实验（图 8），是在泡室中，靶材料液体正好被加热在沸点温度下，处于过热液滴亚稳态，那么暗物质粒子在液滴中穿过的时候，反冲核就会引起过热液滴变成蒸汽时发生爆破，发出声波而被压电传感器探测到。PICASSO 的靶材料选择了  $\text{C}_4\text{F}_{10}$ ，目标也是集中在

对暗物质的自旋相关弹性散射的探测。目前中国原子能院利用已有的过热液滴技术，也在做着这方面的研究。

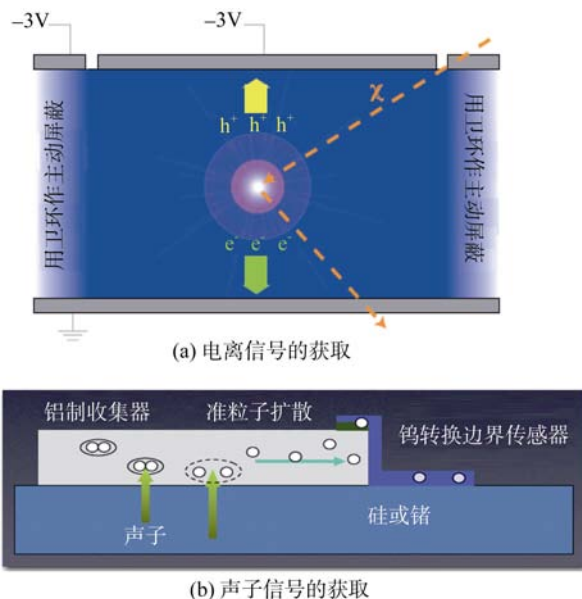


图 7 超低温超导 CDMS 实验工作原理

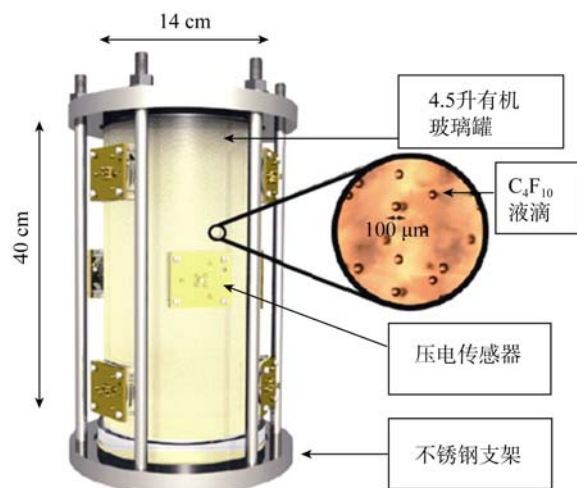


图 8 过热液滴 PICASSO 实验探测器结构

#### 6. 光+声子/热

同时测量光信号和声子信号的实验也是超低温超导实验，实验原理与电离+声子相似，不过靶材料换成了闪烁晶体以产生闪烁荧光，比如 CRESST 实验采用的是钨酸钙晶体。

如上所述，人们在尝试着用各种手段直接探测暗物质，真可谓八仙过海，各显神通。（补充一点，本文没有涉及另一大部分观测轴子的实验。）这些实

验展开了一场热烈的竞赛，看谁先捕捉到暗物质。尺有所短，寸有所长，这些实验都希望尽量发挥自己的优势：有的测两种信号希望区分开核反冲和本底信号；测一种信号的也可以通过脉冲波形的分析来排除本底；尽量把探测器做大，比如 DAMA 的晶体已经达到了 250kg，XENON 和 PANDAX 的有效探测质量分别已经达到了 62kg 和 100kg。其实最根本的是要看谁的放射性本底更低，谁的阈能更低，谁的信噪比（信号/本底区分能力）更强。

暗物质信号如此之弱，有没有更巧妙的办法探测暗物质呢？有的，比如观测暗物质粒子引发的与暗物质作用模型无关的年调制信号。事实上，地球围绕太阳公转，地球成为了一个巨大的回旋器，而太阳系在银河系内以一定方向运动，这样可以预期穿过地球的暗物质粒子流强应在 6 月 2 日左右最大（地球的公转轨道速度与太阳系相对于银河系的运行速度是相加的），在 12 月 2 日左右最小（两个速度相减）（图 9），这样暗物质信号就具有了年调制特征，年调制相位（调制信号最大时的时间）应该在 6 月 2 日左右。暗物质粒子引起的年调制信号与地球上的季节变化引起的效应相比有不同的起源和差异，比如季节变化引起的大气温度年周期变化的相位在 7 月中。暗物质粒子引起的年调制信号必须同时满足下列六大特征：

- (1) 事例率必须包含一个余弦函数调制项；
- (2) 周期为一年；
- (3) 相位峰值大致在 6 月 2 日左右；
- (4) 这种调制应限于良好的低能量范围内；
- (5) 必须只适用于那些单次击中事例，因为暗物质粒子作用弱，多次作用可以忽略不计；
- (6) 如果采用通常的银晕分布，则预计调制幅度为 <math><7\%</math>，但在某些情况下可能较大。

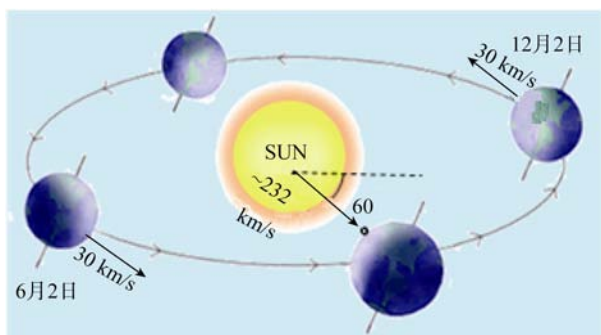


图 9 年调制信号产生机制的示意图

另外，太阳不仅仅公转，而且还自转，这样在一定方向上（如图 10 中的 Z 方向）的暗物质流强在一天之中是周期变化的，暗物质信号在一定方向上就具有了与暗物质作用模型无关的日调制特征，而且预计日调制幅度比年调制幅度高很多，这就是第 3 节中所讲述的气体时间投影室要测核反冲方向的动机。图 3 中这一部分有个实验 Nuclear Emulsion（核乳胶）被用括号括起来了，它不是气体时间投影室实验，但是也是测径迹方向的，因此也放在了这类实验里。

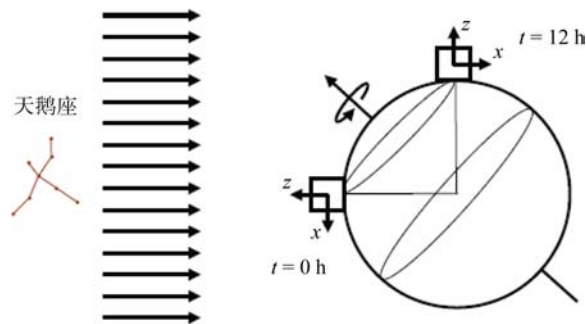


图 10 日调制信号产生机制的示意图

#### 四、现在捉到暗物质了吗？展望

在写这篇文章的时候，想起了秦波在《现代物理知识》2007 年第 5 期上发表题为《精确宇宙学时代的暗物质问题》的文章，感触颇多。从 2007 年到现在仅仅四年时间，国内、国外暗物质研究可以说产生了日新月异的进展。在对撞机实验方面，LHC 开始运行，还没有达到设计的最高能量，但是已经在做一些暗物质粒子的初步寻找，目前还没有结果。在间接探测暗物质方面，中美合作气球实验 ATIC 于 2008 年在世界顶尖科学期刊《自然》上发表结果，确认在宇宙线正负电子能谱中观测到了一个高出本底的超出，这可以用暗物质的存在来解释。卫星实验 PAMELA 在 2009 年《自然》也给出了正电子超出的观测结果。但是卫星实验 Fermi 却否定了 ATIC 的结果。

在直接探测暗物质方面，首先是 DAMA 共测得 13 个年调制周期（图 11），并且作了大量工作努力排除各种本底。然后 COGENT 不仅在 2010 年宣布测到了暗物质候选事例，而且在 2011 年也宣称看到了年周期调制信号。就在前不久，CRESST 也声称测到了暗物质候选事例。这样到目前为止，又有两

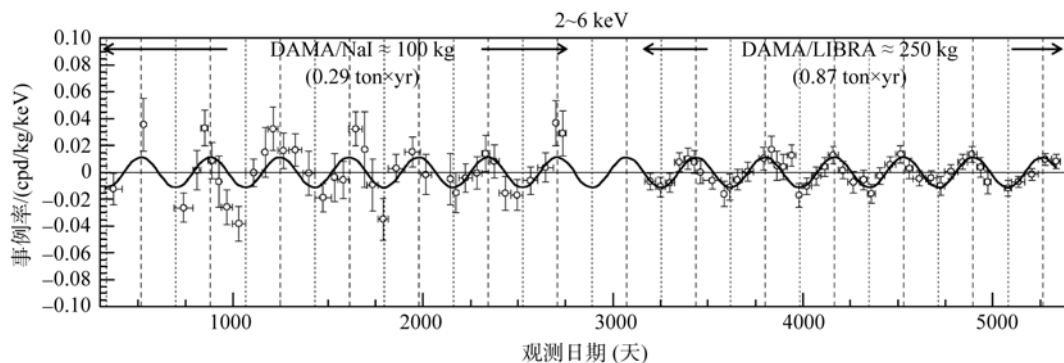


图 11 DAMA 观测到的能量 2~6keV 的年调制信号

家实验印证了 DAMA 的结果。有意思的是, DAMA、CoGenT、CRESST 三家实验采用的探测方法不一样, 但是得到的结果相近: 三家看到的暗物质信号都更符合轻暗物质的特征, 暗物质质量应在 10GeV 左右; 而且 DAMA、CoGenT 的信号年调制相位(前者是 5 月 26 日, 后者更早一些) 远离季节变化引起的大气温度年周期变化的相位(7 月中)。而另一方面, XENON、CDMS 等实验的结果却是相反, 虽然有候选事例, 但是与本底估计相一致, 因此这些实验认为没有找到暗物质。这里需要强调一点: 由于上述暗物质探测的复杂性, 在比较各家实验给出的结果时, 就要特别注意所假设的理论模型、所选择的参数大小是否相同, 给出灵敏度的暗物质质量范围是否相同, 而且实验的探测阈能、探测效率、本底水平、能量分辨、粒子分辨本领等性能究竟如何。只有在这些方面相一致的情况下, 作出比较才是可行的。

矛盾的结果, 因此实验还要深入做下去。DAMA、XENON、PANDAX 等实验都在从百千克量级向吨级探测器扩展; CDEX 也希望逐步把高纯锗探测器做大; 探测手段在不断改进、创新, 比如 DarkSide 在去除放射性本底  $^{39}\text{Ar}$  (地下生产液氩)、采用新型光电器件 QUPID 等方面有独到之处。

最后, 我发现用苏轼的这首诗来描述暗物质探测的目的的状况是再合适不过的了:

《题西林壁》

横看成岭侧成峰,  
远近高低各不同。  
不识庐山真面目,  
只缘身在此山中。

可能谁能跳出“此山”, 谁就能给出暗物质的“真面目”。

### 作者简介

马欣华, 男, 1969 年出生于北京, 1992 年哈尔滨工业大学精密仪器系本科毕业, 2003 年获中国科学院研究生院粒子物理与核物理博士学位, 自 1996 年起在中国科学院高能物理研究所工作, 先后参加了欧洲核子中心 L3 宇宙线实验, 中意合作 ARGO-YBJ 宇宙线实验, 中国 LHAASO 计划预先研究, 中意合作 DAMA 实验, 973 项目“暗物质的理论研究及实验预研”等。



(中国科学院高能物理研究所 100049)

