

# 怎样直接探寻暗物质

李 金

(中国科学院高能物理研究所 100049)

## 探寻暗物质的含义

顾名思义“暗物质”，就是用任何波长的光，无论是极短波长的 $\gamma$ 射线还是很长波长的无线电波都无法观察到的物质。当没有光线时，它是黑暗的，无法看到它；有光线时，它既不反射光，也不吸收光，是完全透明的，我们依然观察不到它。

但是，自1993年以来，发现宇宙中存在暗物质的所有根据都是因为“引力”。因为这些暗物质与我们普通物质之间有“引力”作用，才使我们感知到暗物质的存在。暗物质不仅存在，而且在宇宙物质中占有85%的比例。不少文章介绍了表明暗物质存在的证据，这里不再赘述。

依据引力现象的观察和分析，人们认为，在我们扁平的银河系周围是由暗物质构成的暗物质晕，如图1所示。而构成这个暗物质晕的应该是暗物质粒子。并且认为暗物质粒子在晕中只是热运动，因为温度不高热运动的速度也不大，我们的太阳或地

球是在几乎均匀的暗物质晕中转动。

人们不禁要问，既然诸多引力现象已经证明暗物质的确存在于宇宙中，我们探测暗物质的含义又是什么呢？我们知道，普通物质之间有多种相互作用，除引力外还有在微观领域的两种作用：能构成原子核的强相互作用和造成原子核衰变的弱作用，以及宏观领域中大家很熟悉的电磁相互作用。实际上，探测暗物质的实质就是想了解：在暗物质粒子与普通粒子之间，除引力外，是否还有其他作用。如果有的话，是什么性质的作用，在作用中暗物质粒子的质量是多少？很显然，这些作用存在与否，质量大小都会影响宇宙的形成与演化。另外，与普通粒子有作用的暗物质粒子如果存在的话，显然也应该是我们已知微观粒子大家庭中的一员。是一个新成员呢？还是我们已经预言又没有找到的粒子？这显然是粒子物理理论非常关心的一大课题。所以说，暗物质粒子的探测对宇宙学，天文学和粒子物理学都有非常重要的科学意义。

人们推测的暗物质粒子有很多，如中微子，轴子(Axion)，大质量弱作用粒子(WIMP)……不过现在人们最关注的是WIMP。WIMP是一种泛指粒子，并不特定哪种理论所预言的粒子，也许是超对称理论所预言的超对称粒子，也许是其他理论所期望的粒子，更可能是完全出乎我们所料的粒子。

## 暗物质的直接探测

今天我们所讲的探测暗物质粒子就是指探测WIMP。探测WIMP的方法有三种，直接探测、间接探测和人工产生。篇幅所限，本文只讨论WIMP的

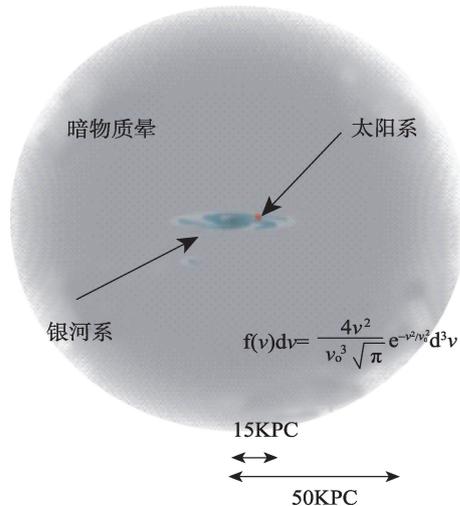


图1 扁平的银河系周围是由暗物质粒子构成的暗物质晕

直接探测。直接探测就是直接观察 WIMP 粒子与普通粒子之间有无弹性碰撞或非弹性碰撞。如果有碰撞发生,就表明 WIMP 与普通粒子之间有相互作用。从而了解相互作用的性质,我们可以通过碰撞几率来估计作用的强度,通过碰撞中能量的传递来估计 WIMP 质量,当然还可以知道 WIMP 的数量等。

图2是 WIMP 与探测器中普通粒子之间相互直接作用的示意图。WIMP 入射到探测器的介质中,与介质中的原子核发生碰撞,原子核被反冲出来,离开原来在介质中的位置,散射后的 WIMP 粒子飞出探测器介质。这样,我们就可以通过探测被反冲的原子核来发现入射到探测器的 WIMP。这意味着我们在地球上的探测器是被动地等待 WIMP 的入射,完全是“守株待兔”的做法。因为我们不知道 WIMP 到底有多少,也不知 WIMP 在哪里,就只能守株待兔了。不过,一旦发现这样的事例,不仅能证明 WIMP 与普通粒子之间有相互作用,而且能说明宇宙中的确有 WIMP 的存在。

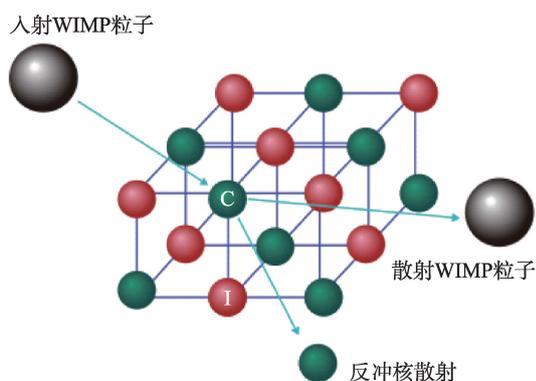


图2 WIMP 粒子在探测器中与原子核发生散射

但是,直接探测有难以想象的困难。首先,地球是在由 WIMP 粒子构成的暗物质晕中转动,而 WIMP 粒子自身只有较低速的热运动。因此,在地球上探测器与 WIMP 的相对速度就是地球相对于暗物质晕的速度,也就是太阳环绕银河的速度和地球绕太阳速度之和,大约 230 km/s。虽然在宏观物体来讲,动能已经不小了。但对质量极小的微观粒子来讲,WIMP 相对探测器的动能是很小的。当我们假设 WIMP 粒子的质量之后,不难计算出反冲核

得到的能量,是在 keV 的范围内。这就是说,我们必须能够探测很低能量的反冲核,才能知道有无 WIMP 入射到探测器内,并将原子核反冲出来。这个能探测到的最小能量就是专业术语——“探测器的阈”。显然,探测阈越低越好。

第二个困难是探测器周围环境有大量的 $\gamma$ 射线、带电粒子、宇宙线粒子……这些粒子进入探测器也会将探测器中的原子核或核外的电子反冲出来。我们会把这些事件误认为是 WIMP 粒子进入探测器,专业术语称“辐射本底事例”。经常简称为“本底”。这些本底数量大得惊人,比我们要找的 WIMP 高几十个量级。例如,每平方厘米每分钟就有一个宇宙线粒子入射到探测器内。探测器周围的环境中有无处不在的天然放射性物质,如,铀、钍、钾、氡……另外,探测器自身也有因为宇宙线照射而生成的辐射本底,专业上叫“宇生放射性”等。为此,直接探测必须将这些“本底”一一排除干净才行。

为避免宇宙线造成的本底,通常要将探测器安排在很深的地下或山洞中。用很厚的岩石将宇宙“阻挡”在外。一般都在几百米或几千米地下。很显然越深的地下宇宙线越少。为此,世界上建立了很多地下实验室,在欧洲、美洲、亚洲都有探测暗物质实验室。当然,还有其他需要低本底的实验也会安排在这些实验室内。我国的锦屏地下实验室(CJPL)就是世界上最深的地下实验室。为我国的暗物质直接探测提供了极好的低宇宙线实验环境。经测量,宇宙线极少,每平方米每周只有一个。比地面宇宙线降低了 8 个量级。可以称之为无宇宙线的实验室。不过,不用担心,再厚的岩石 WIMP 粒子也能穿过。因为它不带电,几乎不与物质发生作用,所以,将探测器安排在地下还是可以探测 WIMP 粒子的。

即使在没有宇宙线的地下,探测器周围的岩石,空气中也还有上面讲的放射性本底,这就需要在探测器周围设置能阻挡天然放射性辐射进入探测器的所谓“屏蔽体”。一般采用能阻挡 $\gamma$ 射线的铅

墙,能阻挡中子的聚乙烯板和无放射性的高纯无氧铜等,搭建一个“屏蔽室”。再将暗物质探测器安排在屏蔽室内,从而大大降低环境辐射本底的影响。图3是中国暗物质实验(CDEX)的屏蔽体的示意图。从外到里分别是20厘米厚的铅,20厘米厚的含硼聚乙烯和超纯无氧铜。用来测量WIMP的高纯锗半导体探测器在最里面。为进一步减少本底的影响,探测器外面是碘化钠晶体探测器。当碘化钠晶体探测器和高纯锗半导体探测器同时有事例的话,就会被视为本底。因为WIMP粒子不可能同时在两个探测器上产生事例,只有 $\gamma$ 射线之类的本底才会同时在两个探测器上发生碰撞。这种方法的专业术语为“反符合”法,或称之为“主动屏蔽”。

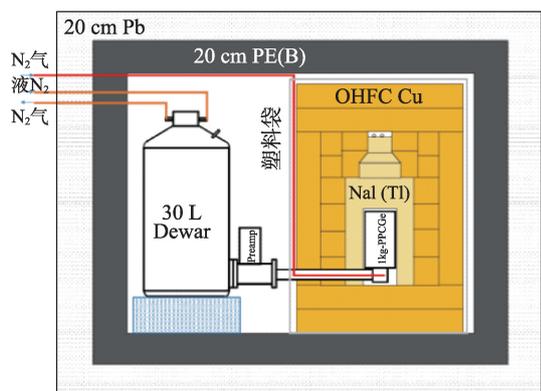


图3 CDEX实验的屏蔽体的示意图

探测器内的本底或自身的宇生放射性就无法用屏蔽的办法来去除了,需要在实验数据中来辨别。

不难看出,要探测WIMP粒子,就需要探测被反冲的原子核。直接探测的症结是如何探测反冲的原子核。在核物理或粒子物理中,探测反冲的原子核是很拿手的。因为,原子核被反冲出来的时候,没有带上原子核周围的电子,成了“裸核”。裸核是带正电的离子。当带电的反冲核离开原来的位置时,会将一部分能量传递给反冲核路径周围的原子或电子。得到这部分能量的原子,可能被“激发”而发射出可见光,这就是专业术语中的“闪烁光”,得到能量的电子也有可能离开原子,变成“自由”的电子,这就是专业术语中的“电离”,还有可能

使原子发生“振动”,原子的振动会发热,让“温度”升高,或者想象成振动会发出声音,物理上用产生“声子”来描述。这样,人们就借助这些宏观能观察到的现象来探测反冲的原子核。无论是“闪烁光”,“电离电子”还是“温度”都是我们常见的声、光、电的宏观现象,都有成熟的技术将它们记录下来。在记录的事例中,即使有不少本底事例,也没有关系,可以通过数据分析将WIMP事例找出来。一些实验只记录“声”“光”或“电”中的一种,也有实验同时记录其中的两种,如同时记录“电”和“光”;或同时记录“光”和“声”;也有的同时记录“电”和“声”。测量这些宏观现象的探测器的种类很多,也是核物理或粒子物理实验中常用的探测器,如,闪烁探测器,半导体探测器,液氙闪烁体探测器,低温超导探测器,甚至有使用气泡室,乳胶等很古老的探测器来探寻WIMP,篇幅有限,就不一一介绍了。表1给出部分探测器所用介质的种类和所探测的信号。

表1 探测器所用介质的种类和所探测的信号

实验名称	探测信号	靶材质量
低温固体		
CDEX-0	电离	20g Ge
CDEX-1	电离	O(1 kg) Ge
CDEX-10	电离	O(10 kg) Ge
SuperCDMS	电离+声子	9 kg Ge
CoGeNT	电离	443 g Ge
CRESSTII	闪烁光+声子	10 kg CaWO <sub>4</sub>
TEXONO	电离	1 kg Ge
液氙		
LUX	闪烁光+电离	350 kg LXe
PandaX-1a	闪烁光+电离	125 kg LXe
XENON100	闪烁光+电离	161 kg LXe
XMASS	闪烁光	835 kg LXe
液氩		
DarkSide-50	闪烁光+电离	50 kg LAr
DEAP-3600	闪烁光	3600 kg LAr
闪烁晶体		
DAMA/LIBRA	闪烁光	250 kg NaI (Tl)
KIMS	闪烁光	104.4 kg CsI (Tl)
过热液体		
PICASSO	气泡	2.7 kg C <sub>6</sub> F <sub>10</sub>
COUPP	气泡	4 kg CF <sub>3</sub> I

## 怎样辨别暗物质 WIMP

直接探测中,即使在很深的几乎没有宇宙线的地下实验室内,采用了再好的屏蔽,依据上面的各种探测器,观察到的绝大部分事例仍然是本底事例。特别是探测器自身的宇生放射性本底,必然会和暗物质事例一并被探测到。如何在探测到的事例中找到 WIMP 就变得十分重要了。

如果探测手段很高明,能够将“电子反冲”和“核反冲”事例分辨得清清楚楚,那么,在没有中子本底的情况下,就可以将“核反冲”事例确定为 WIMP 事例了。这就必须对每一个事例进行辨别,需要知道 WIMP 事例特征和其他本底事例特征的差别,并能严格地将其区别开来。显然这不是件容易的事。

如果很难对每个事例进行辨别的话,我们可以利用事例的集体行为将 WIMP 事例找出来。

如果 WIMP 粒子的反冲核能量分布和本底的反冲电子能谱有较大的差别,我们可以通过能谱的分布来辨别 WIMP 粒子。图 4 是质量为  $100\text{GeV}/c^2$  WIMP 粒子在与氩、硅和锗原子核散射后反冲原子核的能谱。在对数坐标中是随能量下降的直线,而本底则不随能量有大的变化,这在图 4 中应该是平的直线。两者的能谱有不小的差别。虽然我们可以通过这些差别将 WZMP 粒子从本底中辨认出来,但是本底也不能太多。如果本底远高于 WIMP 粒子,相当于将 WIMP 能谱被深深地埋在本底能谱中,这也是不行的。实际上,本底一般都要高十几个量级,要能将本底下降到与 WIMP 同等水平,就不是一件容易的事了。必须采取各种手段降低本

底。为了降低本底,还必须意识到有哪些本底。不了解本底的来源和性质,无法找到降低本底的方法或手段。

也可以从事例率的时间谱上寻找 WIMP 事例。我们知道,地球围绕太阳转,太阳在银河系中绕银心转动。那么地球相对于暗物质晕的运动在地球看来就像有 WIMP 的风刮过来,如图 5 所示。不难看出,地球相对于 WIMP 的速度与地球绕太阳的方向有关,6 月份逆 WIMP 风向转动,12 月份顺 WIMP 风向转动。不同季节中,地球上的探测器相对 WIMP 的速度不同。前者速度较慢后者速度较

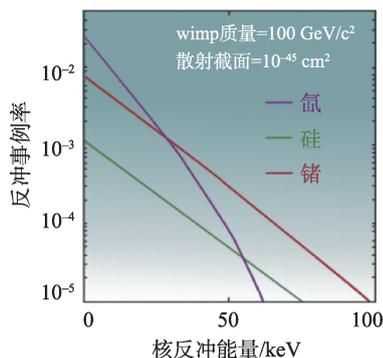


图 4 质量为  $100\text{GeV}/c^2$  WIMP 粒子在氩、硅和锗原子核散射后反冲原子核的能谱

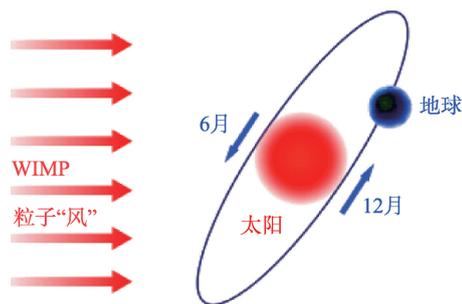


图 5 地球在银河系暗物质粒子“晕”中相对运动示意图

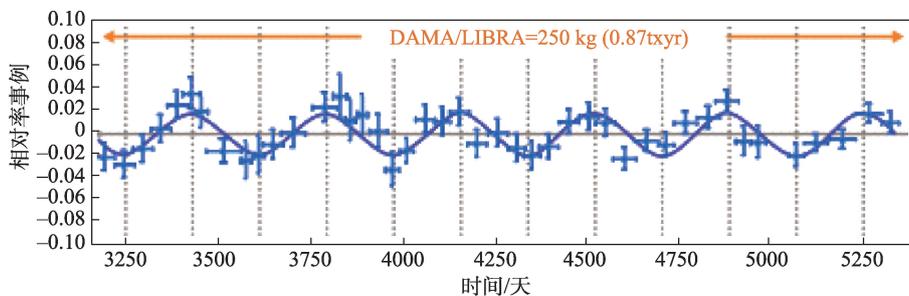


图 6 一年中事例率随季节有周期变化

快。由此造成 WIMP 与探测器作用的几率有差别。从而在一年中事例率会随季节有周期变化,如图6所示。这就是所谓的“年调制”效应。如果能观察到这种“年调制”效应,也不愧为是辨别 WIMP 的好办法。可惜的是,能够造成“年调制”效应的不仅仅是上述原因,还有很多其他因素,如温度、湿度、电压、宇宙线等会使探测器的响应有周期变化。克服这些因素造成的影响也不是件容易的事。

### 探测到暗物质了吗?

直接探测暗物质粒子的实质是寻找 WIMP 与普通粒子有无相互作用和在相互作用中所表现的 WIMP 的质量。这可以用两维直角坐标来表达。纵坐标表示粒子之间有无作用或作用大小,物理上采用粒子的截面大小来表示,单位是平方厘米( $\text{cm}^2$ )。很显然,截面越大表示作用的机会越多。横坐标表示 WIMP 粒子的质量,一般用  $\text{GeV}/c^2$  表示(质子的质量约  $1\text{GeV}/c^2$ )。直接探测可以看成在两维直角坐标中寻找可能的位置。如果找到 WIMP 的话,就可以在直角坐标中的某个位置表示出其作用截面和 WIMP 质量。如果有误差的话,可表示成一定范围的区域。如图7左图所示。如果没有探测到的话,也需要将探测的灵敏区域表示出来。也就是告诉大家,探测器能够找到 WIMP 的区域和不能够找到 WIMP 的区域。在专业上称之为“排除线”。“排除线”以上的区域是探测器有能力探测到 WIMP 的区域。如图7右图的虚线部分。

目前国际上直接探测的状态可以用图8来表

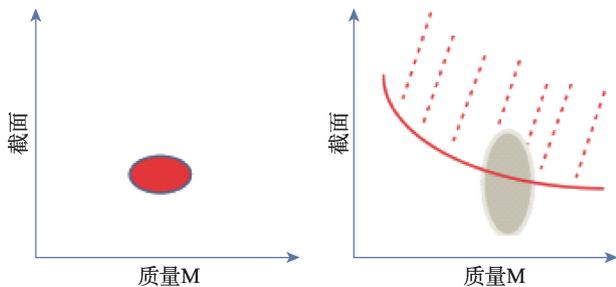


图7 表示 WIMP 探测的截面与质量

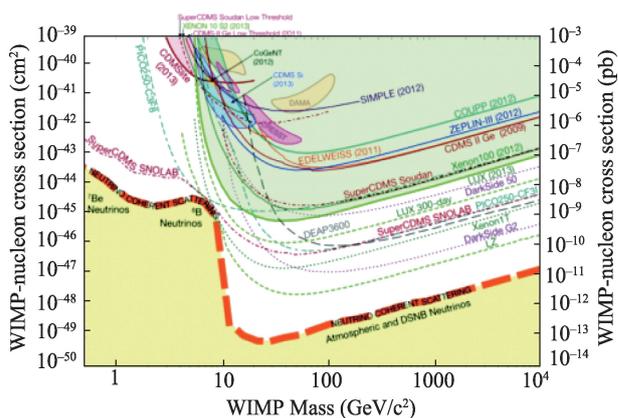


图8 直接探测的现状

示。低质量的彩色部分( $100\text{GeV}/c^2$ 以下),有探测到的区域(红色,蓝色等),也有没有探测到区域(绿色),而且相互矛盾。灵敏度不高的探测实验表示出了探测到的区域,给出了质量和截面的范围,而灵敏度高的探测实验又将其排除掉。在高质量绿色部分( $100\text{GeV}/c^2$ 以上),所有的实验都只给出排除线。表明没有探测到 WIMP。最下面的黄色区域是有中微子本底的区域。如果探测的灵敏度到达这一区域时,会有中微子本底出现。探测中必须考虑如何剔除中微子事例的问题。

图8中还有一些虚线,是计划中的一些实验可能达到的排除线。这表明,人们并没有停止暗物质探寻继续向着提高灵敏度和降低探测阈值两个方向努力。不断扩大探测器规模或更新手段,据统计,每6.5年,探测灵敏度提高一个量级。近年来更快,每3.5年提高一个量级。

我国不仅有世界上最深的锦屏地下实验室,在这实验室中目前还有两个直接探测的典型实验,一个是 CDEX 实验,采用点电极高纯锗探测器(PCHGe)。一个是 PANDAX 实验,采用液氙时间投影室(TPC)。目前,这两个实验的探测灵敏度分别在低质量和高质量区达到世界的最好水平。另外,锦屏地下实验室的二期 CJPL II 建设正在进行中,CJPL II 不仅是世界上最深的也将是最大的深地物理实验室。包括 CDEX 和 PANDAX 外的不少实验将在 CJPL II 进行。期望这些实验在不久的将来取得世界一流的科学成果。