

暗物质的直接实验探测^{*}

李 金[†]

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘 要 暗物质研究是 21 世纪粒子物理、天体物理和宇宙学最重要的前沿科学课题之一。暗物质被天文学中的引力效应所观察到,但对它的存在和认识仍旧是个谜。文章主要论述了对弱作用大质量暗物质粒子(WIMP)直接探测的基本原理、各种直接探测技术、当前的实验进展和发展方向,最后给出了最近的实验物理结果。

关键词 暗物质, 弱作用大质量暗物质粒子(WIMP), WIMP 直接探测

Direct detection of dark matter

LI Jin[†]

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Dark matter is one of the most important basic topics of particle physics, astrophysics and cosmology in the 21st century. Its existence has been established by gravitational effects, but its identity is still a mystery. In this review we shall discuss the principle of direct detection of the weak interaction massive particle (WIMP), direct detection techniques, the current status and future developments of experimental detection, and finally some new experimental physics results.

Keywords dark matter, weak interaction massive particle(WIMP), direct detection of WIMP

1 引言

人类借助于各种波段的电磁波(从极短波长的 X 射线、紫外线、可见光到无线电波(如图 1 所示))来观察和认识宇宙。然而,有一些物质既不发射任何波段的电磁波,也不与电磁波发生相互作用。这些用任何波段电磁波都“看”不到的物质被称之为暗物质。大约在 70 年前,费里兹·扎维基(F. Zwicky)惊奇地发现,大型星系团中星系具有极高而又难以理解的运动速度,除非是星系团中还有“看不见”的物质,否则单靠我们观测到的星系团的引力作用根本不能束缚住这些星系。随后,天文学家依据球状星系旋转速度的测量,引力透镜的观测,大尺度宇宙结构形状以及微波背景辐射等研究中的“奇特”现象,大胆地猜想,宇宙中可能存在大量的“看不见”却又能通过引力作用而被感知的暗物质,而且占的比例很大。目前人们普遍认为,我们所能观察到的物质仅占整个宇宙的 4%,暗物质占宇宙的 23%,此外还有 73%的暗能量。

暗物质到底是什么?它在宇宙中如何分布?它在宇宙演化中扮演什么角色?它们是否是我们已经知道的基本粒子,还是尚未发现的粒子?这些都对目前人们已经构造的标准基本粒子模型理论(以 6 个轻子和 6 个夸克为基本粒子,以量子色动力学(QCD)和弱电统一理论来描述相互作用为基础)提出了挑战。

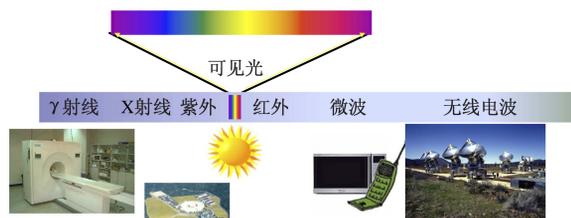


图 1 人类观察宇宙所借助的电磁波的波段

21 世纪初,美国国家科学技术委员会(NSTC)中的“宇宙物理学”跨部委工作小组向美国国家研究

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10935005,11055002)资助项目
2010-12-06 收到

[†] Email:lij@ihep.ac.cn

理事会提出了关于“建立夸克和宇宙联系,新世纪的11个科学问题”的报告,其中第一个问题就是“*What is dark matter(什么是暗物质)*”.可见,暗物质的寻找与研究具有跨学科的重大科学意义,它是关系到微观基本粒子、宏观宇宙的构成、宇宙的演化以及基本相互作用的重大前沿课题.

然而,到目前为止,暗物质还是基于天文宇宙观察而“感悟”出来的大胆猜想,没有被真正的直接实验观测到.表1列出了暗物质可能的候选者,大致分两大类:一类是重子暗物质,如中子星,白矮星,黑洞;一类是非重子暗物质,其中包括宇宙初期形成的相对论性粒子(如质量很轻的中微子)和宇宙形成后期的较冷的非相对论性暗物质粒子(如大质量的majorana中微子等).在人们还不能确定是哪种粒子的时候,就把那些具有大质量、不带电、又有弱作用的粒子统称为WIMP.无论在天上、地面上,还是在地下、海底,寻找WIMP成为实现对暗物质粒子直接观测的突破口.本文主要介绍对WIMP直接探测的原理、实验和最新的进展.

表1 暗物质粒子WIMP的候选者

重子类	{	白矮星	
		褐矮星	
		中子星	
		黑洞	
非重子类	{	热暗物质(HDM): 质量轻的中微子(质量约几十eV) (相对论性粒子)	
		{	轴子(质量约 10^{-5} eV)
			WIMP's(弱作用有质量的中性粒子)
			a) 大质量中微子(质量大于20GeV) b) 超对称粒子(SUSY)(质量大于30GeV)

2 直接实验探测的基本原理

根据对宇宙中星系及星系团的观察,对暗物质粒子WIMP性质的猜想,可归纳为以下几点:(1)它是来源于宇宙大爆炸的稳定粒子;(2)质量大约为 $10-100\text{GeV}$ (或稍小),其相对地球速度不大(约 270km/s);(3)中性不带电,与普通物质最多只有弱相互作用;(4)暗物质粒子WIMP与其反粒子碰撞,发生湮灭,形成普通的粒子(如电子(e)、正电子或 γ 射线等),即 $\chi + \bar{\chi} \rightarrow e + e \rightarrow \gamma + \gamma, \dots$.这里 χ 代表WIMP, $\bar{\chi}$ 代表WIMP的反粒子;

对暗物质粒子WIMP的实验探测方法有两种:一种是利用WIMP和探测器介质直接相互作用的方法,称之为直接探测法;另一种是通过测量WIMP湮灭后的产物(如电子、正电子或 γ 射线)来实现对

WIMP的探测,称之为间接探测法.由于篇幅所限,本文重点介绍WIMP的直接探测法.

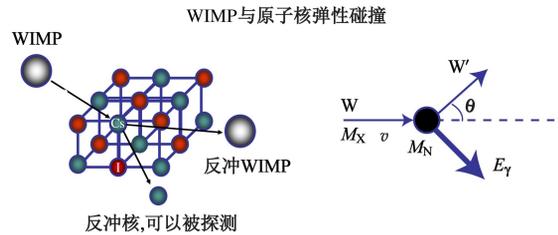


图2 对WIMP直接探测的原理示意图(图中W, W'代表WIMP粒子和散射WIMP; M_X 和 v 分别为WIMP的质量和速度; M_N 和 E_γ 分别是反冲核质量和动能; θ 为散射角)

图2给出直接探测WIMP的示意图.当WIMP入射到探测器介质中时,与其原子核做弹性碰撞.WIMP被散射,介质中原子核被反冲并获得一些能量,离开原来的位置成为带电的离子.如果我们应用各种手段来观察被反冲的原子核,就可以了解WIMP的质量大小和发生碰撞的几率等.假设WIMP的质量为 M_X ,能量为 E_X ,核反冲能量为 E_γ , E_γ 的大小与夹角 θ (见图2)有关.在最简化的情况下,发生碰撞事例率可表示为 $\frac{dR}{dE_\gamma} = \frac{R_0}{E_0 K} \cdot e^{-\frac{E_\gamma}{E_0 K}}$,

其中 $K = \frac{4M_X M_N}{(M_N + M_X)^2}$, R 是碰撞事例率(以下简称为事例率), R_0 是总事例率, E_0 是最可几的入射动能.实际情况远不是那么简单,事例率还和原子核的形状因子、自旋等有关.图3(a)给出了Ar, Ge, Xe三种原子核的形状因子.图3(b), (c)给出了Ar, Ge, Xe三种原子核的反冲能量与事例率的关系.可以看出,反冲能量越小,事例率越高.因为是弱相互作用,反碰撞截面约为 10^{-6} pb,所以其事例率极低.每公斤探测器介质每天的事例率约为 $0.01/\text{kg}/\text{day}$.

另外,暗物质粒子WIMP相对于地球的速度因为地球围绕太阳的旋转而不同,在地球上的探测器因为这个相对速度的不同,造成事例率与季节有关的现象,这种事例率随季节的统计性变化被称之为年度调制效应.所以,我们既可以进行单个核反冲事例的测量,也可以统计性地做年度调制效应的测量.不过,后者必须考虑去除所有影响调制效应的其他各种因素.

因为周围环境存在大量的 γ 射线、中子、带电粒子和宇宙线,而且它们有电磁相互作用或像原子核内部的强相互作用,其反应截面比弱作用高10或20个数量级,因此造成了极大的本底.这就对直接探测实验提出了极大的挑战.为此,对实验提出如下一些要

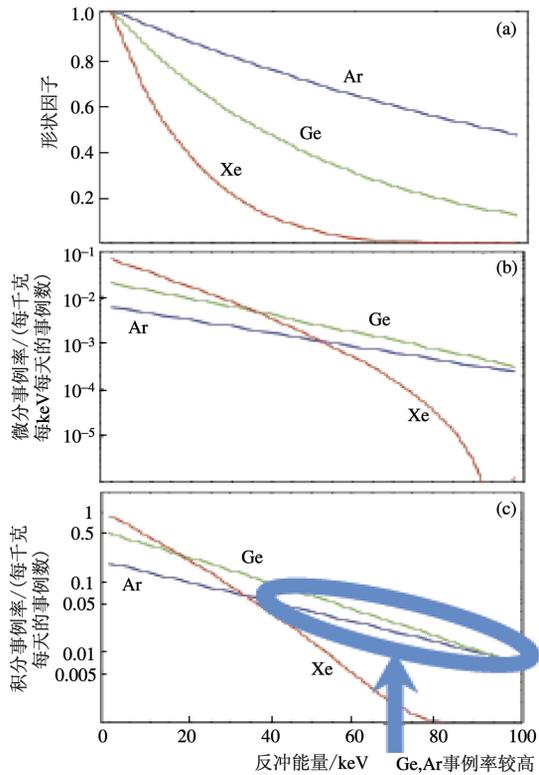


图3 (a) Ar, Ge, Xe 原子核的形状因子; (b) Ar, Ge, Xe 原子核的反冲能量与微分事例率的关系; (c) Ar, Ge, Xe 原子核的反冲能量与积分事例率的关系

求: (a)要求探测器的介质既是 WIMP 的靶, 同时又是高探测效率的灵敏探测器; (b)必须有很低的探测能量的下限 ($<10\text{keV}$); (c)因为事例率很低, 所以探测器的质量要尽可能的大; (d)探测器自身的辐射本底要小, 而且要具有甄别本底的能力; (e)实验探测要在宇宙线以及辐射本底极少的环境中进行。

为减少宇宙线的影响, 实验要在地下进行, 宇宙线和宇宙线产生的次级 γ 射线和中子等是暗物质探测的主要本底来源之一, 成为实验探测的重大危害。为此, 直接探测实验必须到地下进行。

宇宙线无处不在, 图 4 给出宇宙线的示意图, 原初宇宙线与大气原子核作用, 产生了大量次级粒子到达地面, 主要是 μ 子、质子、中微子等, 平均每年每平方米的宇宙线粒子约 10^9 个。除宇宙线本身造成本底外, 它还在周围的岩石、探测器和屏蔽体上打击出不少次级 γ 射线和中子。特别是中子, 其反冲核的特征与 WIMP 很相似, 而作用几率比 WIMP 要高 10 个量级, 危害极大。所以必须到宇宙线少的地下进行探测。世界上现在进行暗物质探测的地下实验室有韩国的 Yangyang; 日本的 Kamioka; 美国的 Homestake, SNOLAB, Saudan; 欧洲的 Modane, Gran Sasso; 英国的 Sasso, Bouldy 等。

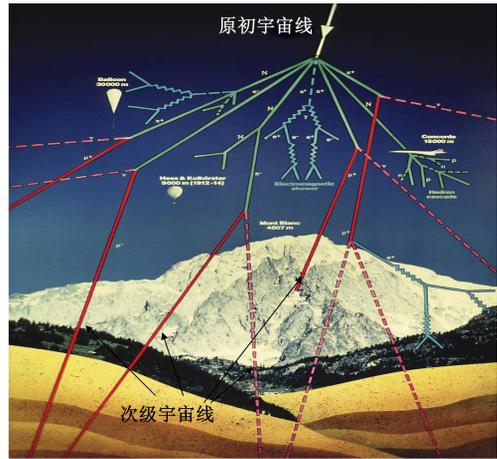


图4 原初宇宙线和次级宇宙线形成的示意图

我国去年在四川锦屏建立了一个地下实验室 CJPL(China Jinping Underground Laboratory, 中国锦屏地下实验室), 虽然起步较晚, 但却是世界上最深、宇宙线最少的地下实验室。图 5 是我国的 CJPL 地下实验室和其他地下实验室宇宙线通量的比较。要比意大利著名的 Gran Sasso 地下实验室的宇宙线通量低 100 倍, 比韩国的 Yangyang 低 1000 倍。

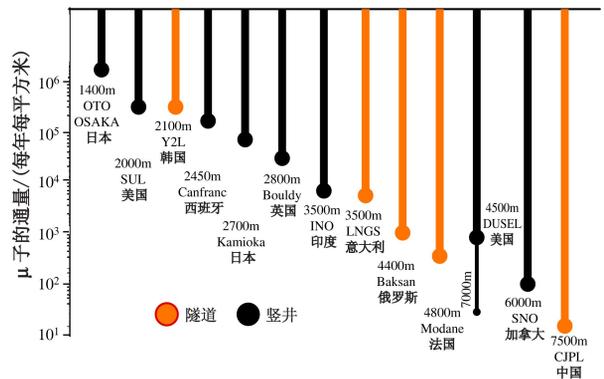


图5 我国的 CJPL 地下实验室和其他地下实验室宇宙线通量的比较

实验探测需要对周围的 γ 射线、中子进行很好的屏蔽。虽然地下宇宙线减少很多, 但它所产生的次级宇宙线、中子等对 WIMP 而言, 仍然不能掉以轻心。另外, 周围岩石中有不少钍系、铀系等长衰变寿命放射核素, 它们不断释放出有害的 γ 射线和中子。空气中还有放射性的氡气等。为此, 屏蔽体最外层通常采用很轻的材料, 如水或含 H 很多的闪烁体、聚乙烯等来慢化中子, 再利用含硼的聚乙烯将中子吸收掉。屏蔽体内层采用自身放射性很低的、对 γ 射线有很强阻止能力的铅来屏蔽环境中的 γ 射线以及硼吸收中子所产生的次级 γ 射线。最内层用目前认为放射性最少的无氧铜来屏蔽外层铅放射出来的 γ 射线。图 6 是韩国 KIMS 实验的屏蔽体, 分别是 30cm 的 LS 聚乙烯,

15cm 的 Pb 和 10cm 的 Cu. 屏蔽体内部是放置探测 WIMP 的探测器空间, 因为探测器的质量和规模都很大, 必须要有足够的空间, 所以外部屏蔽体的重量都相当大, 通常都是几百吨或数千吨.

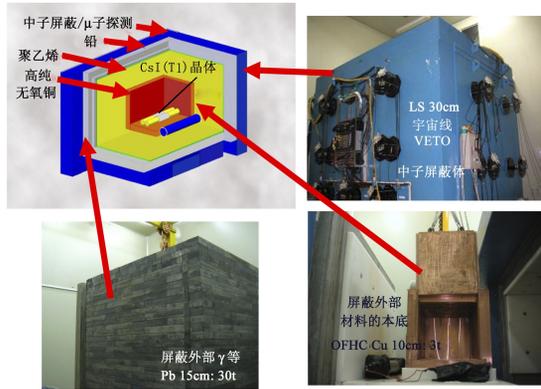


图 6 中国和韩国合作 Y2L 地下实验室 KIMS 实验的屏蔽体和 VETO 探测器

3 各种直接实验探测技术

在直接探测实验中, 暗物质粒子 WIMP 与探测器介质的原子核碰撞, 并将原子核反冲离开原来的位置, 成为带电的重离子. 该重离子与探测器周围介质发生作用, 电离产生大量电荷或闪烁荧光, 也可能因介质分子的振动而在产生声子时, 使介质的温度略有升高或产生其他次级效应. 我们可以通过测量这些物理量(电离电荷、荧光光子和声子的强度)来实现对反冲核的探测, 从而知道 WIMP 进入探测器后与介质所发生的相互作用. 为此, 人们发展出各种不同的探测器: 有只测量其电离的探测器, 如高纯锗半导体探测器; 有只测量闪烁荧光的 NaI(Tl) 或 CsI(Tl) 晶体探测器; 有同时测量闪烁荧光和电离电荷两种信息的液氙、液氙探测器; 还有同时测量电离电荷和声子的组合式探测器等. 图 7 是各种探测器所探测物理量(电离电荷、荧光光子和声子的强度)的示意图, 同时也给出部分国际上正在进行或已完成的实验名称和相关的检测技术(图 7 黄框中给出的是实验组名称, 见《物理》网刊彩图, 下同). 不难看出, 因为反冲核能量很低, 不可能飞离介质, 所以探测器介质本身既是和 WIMP 发生作用的“靶”, 同时又是对反冲核进行探测的“灵敏元件”. 下面重点介绍几种探测器的工作原理和一些相关实验.

3.1 高纯锗探测器

高纯锗是一种杂质极少, 其纯度达到 99.9...9% (省略号处为 6—9 个 9) 的半导体探测器, 由于其具有

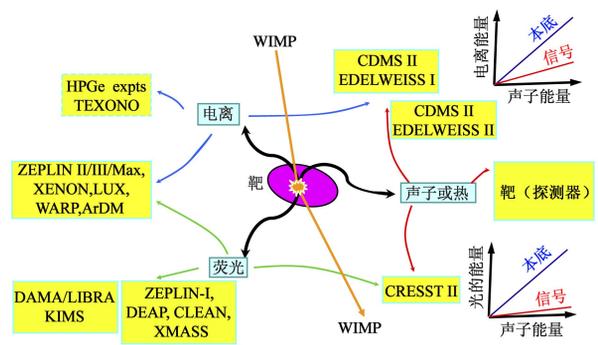


图 7 各种探测技术所探测的三种物理量及相应的实验(黄框中的文字为实验组名称)

密度大、自身放射性本底低、能量分辨率好、可以探测的能量阈值低等优势, 被人们所重视. 特别是近年来发展出点电极 HPGe 探测器, 其电容在 1pF 左右, 噪声很低, 能量阈值在 200eV 左右, 成为能量阈值最低的探测器. 从图 3 不难看出, 能量阈值越低, 事例率就越高, 即探测效率就越高, 对低质量 WIMP 的探测灵敏度就越好. 图 8 给出了 HPGe 探测器的晶体照片和工作原理图. 暗物质粒子 WIMP 入射后, HPGe 的晶体反冲核在晶体中电离附近的原子, 产生大量电子空穴对. 它们在电场作用下漂向电极, 形成电脉冲, 并通过低噪声放大器放大后被记录下来. 如果有 γ 射线入射, 则有可能在晶体内发生二次电子反冲, 与仅有一次核反冲的 WIMP 的输出脉冲前沿不同, 所以 HPGe 还有不错的本底甄别能力. 2009 年, TEXONO 实验组利用 20g 的 HPGe 就实现了低质量下的最好灵敏度探测. 2010 年, CoGent 实验组利用 475g 的 HPGe 又获得了在低质量区最高灵敏度的探测.

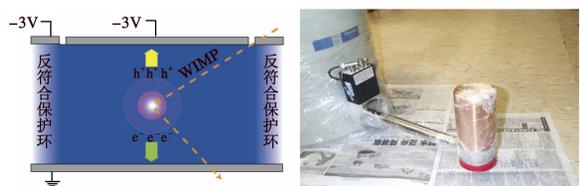


图 8 HPGe 探测器的工作原理图(左)和探测器照片(右)

近来, 由于 HPGe 有很不错的表现, 所以不少实验准备增加 HPGe 的规模. 在确保低阈值的同时, 采用模块阵列的方式增加 HPGe 的质量, 为保证 HPGe 工作在低温下, 采用液氮或液氙致冷的方式. 因为液氙的密度大, 又有闪烁荧光, 所以, 如果将 HPGe 浸泡在液氙中, 不仅有了低温的环境, 还可以作为反符合探测器来降低本底.

3.2 能够同时测量电离和声子的组合型探测器

图 9 给出了能够同时测量电离和声子的组合型探测器的基本工作原理. 该探测器由 3 部分构成: AI

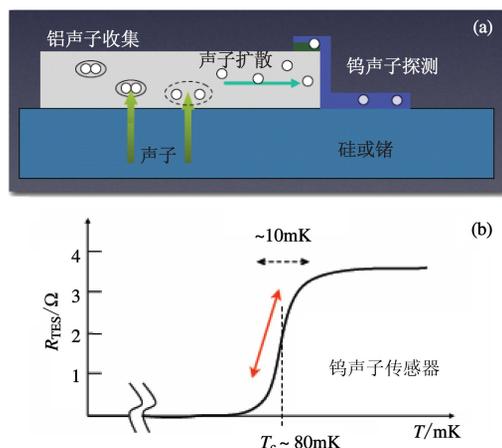


图9 (a)能够同时测量电离和声子的组合型探测器的工作原理图;(b)W(钨)传感器的电阻值 R_{TES} 随温度 T 的变化

(铝)声子收集器、Ge(或Si)探测器和W(钨)超导探测器。将Al(铝)声子收集器紧贴在Ge(或Si)探测器上,而W(钨)超导探测器又紧靠在Al(铝)声子收集器边上。Ge(或Si)半导体探测器的工作原理在上节已经讲过,WIMP进入Ge(或Si)半导体中,不仅发生电离,而且会使整个晶体发生振动,产生声子。声子从Ge(或Si)半导体进入Al收集器,通过“类似粒子散射”到达W(钨)超导探测器。因为探测器是工作在mK的极低临界温度下,所以虽然声子数量不一定很多,但也会使W(钨)传感器发热,温度升高。当W(钨)的温度超过临界温度80mK时,其电阻值会发生阶跃式的变化(见图9(b))。电阻的变化可以通过电子学设备转化为电脉冲被记录下来。这样不仅可以由Ge(或Si)半导体探测器获得电离效应的信息,而且还可以得到有关声子方面的信息,也就是可以同时得到电离能和总的反冲核能量。电离能和反冲总能量的比例对反冲核和反冲电子来讲有很大差别,我们可以利用这个差别来甄别 γ 射线或电子(e)本底,因为 γ 射线或电子反冲的是电子而不是核。如图10所示,同样的反冲能量,本底 γ 射线或电子的电离大,反冲核产生的电离小,从而实现对本底的鉴别。图10中的左图表示反冲核信号和电子本底电离能与声子能量之间的关系,右图是这两种事例的实验散点分布。

实际上,每个探测器单元都很小,特别是Al声子收集器和W传感器都是利用微电子技术蒸镀在Ge(或Si)表面。阵列式结构中每个单元的尺寸为 $250\mu\text{m}\times 60\mu\text{m}$ 左右。Ge(或Si)的厚度为几毫米。Ge(Si)探测器单元叠在一起形成阵列,放在量级为mK的温度环境中。电流脉冲信号和声子传感器信号可以分别读出。这种探测器的优点是有很好的本底甄别能力,缺点是能量阈值比较高,制作技术复

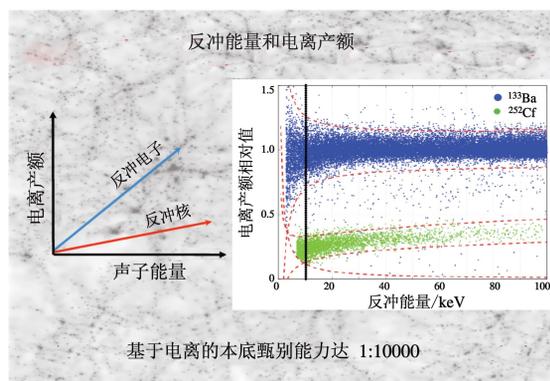


图10 电子、反冲核的电离产额与反冲能量的关系图

杂,不容易实现大规模、大质量的探测器系统。

美国的CDMS实验组采用了这种探测技术,其探测器CDMS-I的规模是100g的Si和 $6\times 165\text{g}$ 的Ge,而探测器CDMS-II的规模是 $3\times 100\text{g}$ 的Si和 $3\times 250\text{g}$ 的Ge。这里同时采用原子序数为28的Si和原子序数是73的Ge两种不同材料测量电离的半导体探测器,目的是为了通过比较这两种探测器的信号的多少来进一步减少本底。因为WIMP与这两种不同材料碰撞的几率不同, Si原子核太轻, WIMP和Si几乎不碰撞。Si可以看成是专门测量本底的参考探测器。

3.3 气液二相探测器

这是一种能够同时测量电离和闪烁光的探测器。其介质通常是液态的Xe, Ar等惰性元素。图11中的左图是以液氙为例的探测器结构示意图。实际上这是一种液气二相的TPC(时间投影室)。液氙(或液氩)在密闭的低温容器内,容器内下部是液体,上部是饱和蒸气。容器外面的电场线圈在容器内形成一个电场。在容器内壁安装有光电倍增管(PMT),用来接受可见光并将光转换为电信号。图11中的右图是其工作原理图。当WIMP进入探测器和液氙的核发生碰撞时,反冲核将周围液体电离,在产生很多电子和离子的同时,还激发出闪烁荧光。一方面闪烁荧光被周围的PMT接受后得到信号S1;另一方面,电离出来的电子在电场作用下向气态氙的方向漂移,经过一段时间到达气态氙中。因为气态氙的区域有更强的电场,从而使电子再次发生多次电离,产生更多的荧光,这些荧光仍然被PMT接受,形成信号S2。信号S2和S1的时间间隔就是电子漂移的时间。S1和S2信号幅度之比与初级电离产生的闪烁荧光和电子的多少有关。本底 γ 射线与氙原子外层电子作用,同样会将电子反冲出来,反冲的电子也同样有S1和S2两个信号。但是S1和S2信号幅度比要远大于反冲核(如图11右所

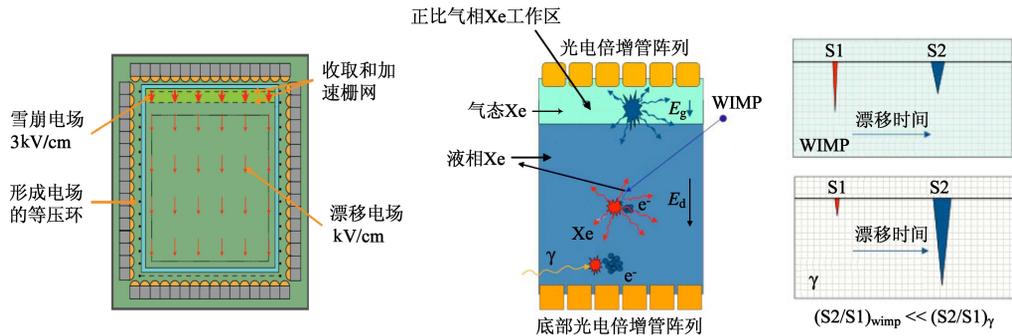


图 11 液氙探测器的结构示意图(左)和工作原理图(右)

示). 这就为甄别本底提供了一个很好的依据, 通过 S1 和 S2 幅度比将本底信号剔除. 这也是该实验方案的优势.

这种探测器介质的质量可以达到几百公斤甚至几吨, 但所使用的液氙必须不断进行纯化, 过滤掉可造成放射性的元素以及影响荧光产生和传播的杂质. 所采用的光电接受器件必须是极低放射性本底的、对荧光有高接受效率的 PMT. 图 12 是 WarP 实验组的液氙探测器组装示意图. 将内部探测器包围起来的液氙用来将本底反符合掉.

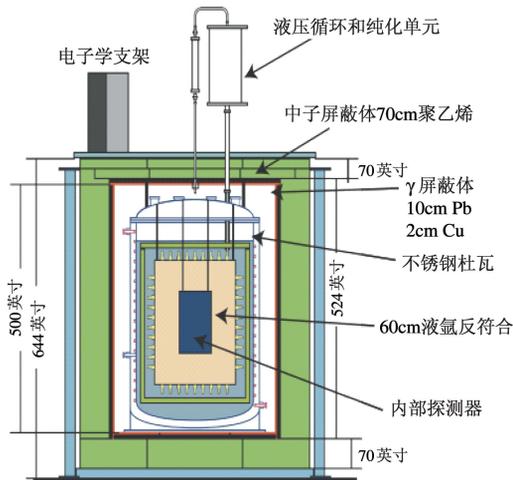


图 12 WarP 实验组的液氙探测器组装图

3.4 闪烁晶体探测器

闪烁晶体探测器是高能物理和核物理经常使用的探测器. 它具有密度大、体积小、结构简单、有脉冲形状甄别(PSD)能力等特点. 暗物质粒子 WIMP 进入晶体中与晶体中原子核碰撞, 反冲核将晶体的分子激发而产生荧光. 闪烁晶体的一端或两端用光电倍增管接受闪烁荧光, 并将荧光转换成电脉冲信号. 一般本底 X 射线虽然也同样有荧光信号, 但脉冲的形状不同, 可以通过脉冲形状甄别的方法来扣除本底. 欧洲的 DAMA 和韩国的 KIMS 都是采用闪烁

晶体来寻找 WIMP 的实验组, 前者使用 NaI(Tl) 晶体, 后者使用 Cs(Tl) 晶体. 图 13 是探测器外形的照片, Cs(Tl) 晶体两端是光电倍增管. 图 14 是将很多晶体排成阵列放到屏蔽体内的照片.



图 13 探测器外形照片



图 14 屏蔽体内晶体探测器阵列

除了上面介绍的 4 种探测技术以外, 还有不少其他的技木, 如电荷耦合器件(CCD)、气泡室探测技术等, 这里就不再一一介绍了.

4 直接探测实验的最新结果

图 15 给出目前探测实验得到的物理结果. 纵坐标是相互作用的截面, 横坐标是暗物质的质量. 如果我们测量得到了暗物质的信号, 就能给出暗物质的质量范围以及相应的相互作用的截面. 如图 15 中标有 DAMA 和 CoGent 的区域就是 DAMA 实验组依据年度调制效应和 CoGent 实验组利用拟合 HPGc 探测器能谱给出的结论. 图中还标有几条不同颜色的曲线, 分别是 CDMS 和 XENON100 实验组给出的排除线. 排除线以上的区域被认为基本不会有 WIMP 与核的碰撞事例, 表明在他们的测量灵敏度

下没有看到 WIMP 的信号. 排除线也可以表示其实验所能达到的灵敏度. 不难看出, 不同实验的排除线不同, 排除的区域就不同, 其结论不完全一致.

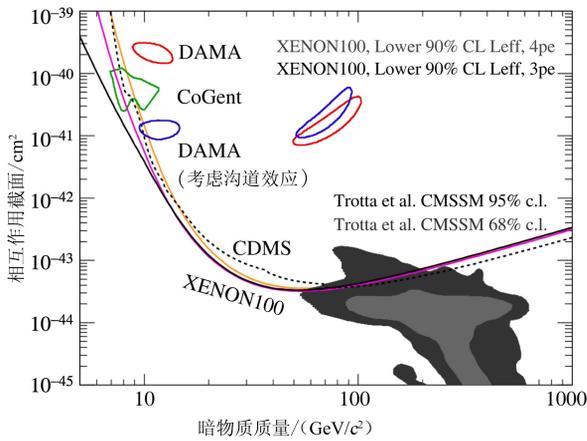


图 15 目前直接探测实验得到的物理结果

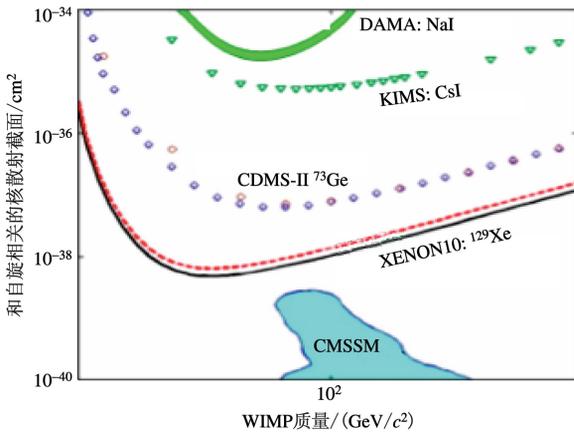


图 16 与自旋有关的最新实验结果

图 16 给出了与自旋有关的最新实验结果. 图中不同颜色曲线分别给出 DAMA, KIMS, CDMS-II, XENON10 等实验组的结果. 从图中的曲线不难看出, CDMS-II 等实验结果都否定了 DAMA 的结论. 图中标有 SMSSM 区域是理论预言的可能的质量范围及截面的大小. 不难看出, 目前的实验结果还不能达到理论要求的灵敏度, 无法证明该理论正确与否.

总之, 到目前为止, 还没有真正的被大家公认的、能直接观察到 WIMP 的实验. 不过, 科学家们并没有就此罢休, 仍然在压低本底提高灵敏度和降低测量阈值两个方面努力, 提出了更多改进的或新的实验方案. 相信不久的将来会在暗物质的寻找和研究方面取得突破性进展.

参考文献

- [1] Bertone Gianfranco, Hooper Dan, Silk Joseph. FERMILAB-Pub-04/047-A hep-ph/040415
- [2] Aprile E *et al.* Physical Review Letter, 2010, 105:131302
- [3] Aalseth C E. arXiv:1002.4703v1[astro-ph. Co]25Feb 2010
- [4] Ahmed Z *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2009, 102:011301
- [5] Ahmed Z *et al.* arXiv:1011.2482 v1 [astro-ph. Co] 10 Nov. 2010
- [6] Akerib D S *et al.* Phys. Rev. D, 2010, 82:122004
- [7] Lee H S *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2007, 99(9):091301
- [8] Bernabei R, Belli P. AIP Conf. Proc. , 2010, 1200:993
- [9] Yue Qian *et al.* High Energy Physics and Nuclear Physics, 2004, 28:8
- [10] Lin S T *et al.* Physics Review D, 2009, 79:061101