

直接探测暗物质和中国暗物质实验*

刘书魁 岳骞[†]

(清华大学工程物理系 清华大学粒子与辐射成像教育部重点实验室 北京 100084)

2015-09-17收到

[†] email: yueq@mail.tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20151103

Dark matter direct detection and China dark matter experiment

LIU Shu-Kui YUE Qian[†]

(Key Laboratory of Particle and Radiation Imaging (Ministry of Education) and Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要 暗物质探测已成为当今科学最重要的课题之一。弱相互作用重粒子(weakly interacting massive particles, WIMPs)是众多理论模型中最有可能的暗物质候选者之一。暗物质直接探测原理是: WIMPs与地面探测器的靶核通过弱相互作用,发生弹性散射,反冲核被弹出,探测器将反冲核能量记录下来,得到暗物质与探测器相互作用的信号。文章介绍了国际上主流的暗物质直接探测的方法、现状以及未来直接探测的路线。还介绍了世界最深地下实验室——中国锦屏地下实验室的现状和二期扩建情况。文章最后详细介绍了中国暗物质合作组的研究历程、探测技术、研究取得的成果和未来规划。

关键词 暗物质直接探测, 弱相互作用重粒子, 中国暗物质实验, 中国锦屏地下实验室, 高纯锗探测器

Abstract The nature of dark matter in our universe is one of the most challenging problems in science today. A most probable class of dark matter is the weakly interacting massive particles (WIMPs), which exhibit a wide range of features. Current experiments searching for dark matter aim for direct detection via the elastic scattering off ordinary matter in terrestrial detectors. This paper will present the main methods, status and roadmap for the direct detection of dark matter. The world's deepest laboratory, China Jinping underground laboratory and its extension, will also be described. Finally, we will give a detailed introduction to the research history, detection technologies, current results, and future prospects of China dark matter experiment (CDEX).

Keywords direct detection of dark matter, WIMPs, CDEX, CJPL, high purity germanium detector

1 暗物质的直接探测法

暗物质是现代宇宙学核心问题之一, 各种各样的数据和观测结果均表明, 暗物质毫无疑问地存在于宇宙的各个角落。约85%的宇宙物质质量

就是由不发光, 没有电磁相互作用, 没有强相互作用, 只有引力贡献的暗物质构成。对如此多的主导宇宙物质运动和演化过程的暗物质, 人类目前还不清楚它的身份, 对暗物质的构成、分布、运动状态和性质也知之甚少。

暗物质有引力作用, 地球附近的暗物质被银河系所吸引, 形成所谓的暗物质晕。在对暗物质

* 国家自然科学基金(批准号: 11475099)资助项目

晕分布了解不清楚的情况下，通常使用简单的标准晕模型，图1为该模型提出的银河系以及暗物质晕分布的假想图^[1]。该模型假设暗物质晕呈球对称分布，没有特定的流动和绕银河系的旋转速度^[2]。也就是说，暗物质被银河系牢牢地抓住，随银河系一起运动，相对于银河系速度为0，不绕银河系中心旋转，暗物质密度在大尺度下与距离银河系中心距离的平方成反比。对地球上的我们来说，仿佛生活在暗物质的“浓雾”中。我们相对“浓雾”的速度有多快呢？这主要取决于我们太阳系所处位置和绕银河系运动速度大小，目前该速度的观测值为 $v_0 = 220 \pm 20 \text{ km s}^{-1}$ 。暗物质浓雾的密度是多少呢？目前天文学观测的结果为 $0.3 \text{ GeV}/c^{-2}\text{cm}^{-3}$ ，假设暗物质粒子的质量为 100 GeV ，那么地球所处位置的暗物质粒子个数约为 $7 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，也就是说，可能每秒有将近十万个暗物质粒子正高速穿过我们的指甲！面对如此多的暗物质粒子，物理学家们将探测器放在

屏蔽体中，排除外界环境本底的干扰，静候暗物质 WIMPs 粒子(WIMPs 粒子是弱相互作用重粒子)打在探测器的原子核上，通过测量原子核是否被暗物质击中来确认暗物质是否存在。这就是暗物质直接探测的原理。

WIMPs 粒子与探测器靶的原子核发生弹性散射后，原子核被反冲并带走部分的 WIMPs 粒子动能。测量反冲核的能量属于常规的核辐射探测的测量方式，有成熟的探测技术，但 WIMPs 粒子与



图1 银河系以及暗物质晕分布的假想图，暗物质被银河系束缚形成暗物质晕(蓝色晕)^[1]

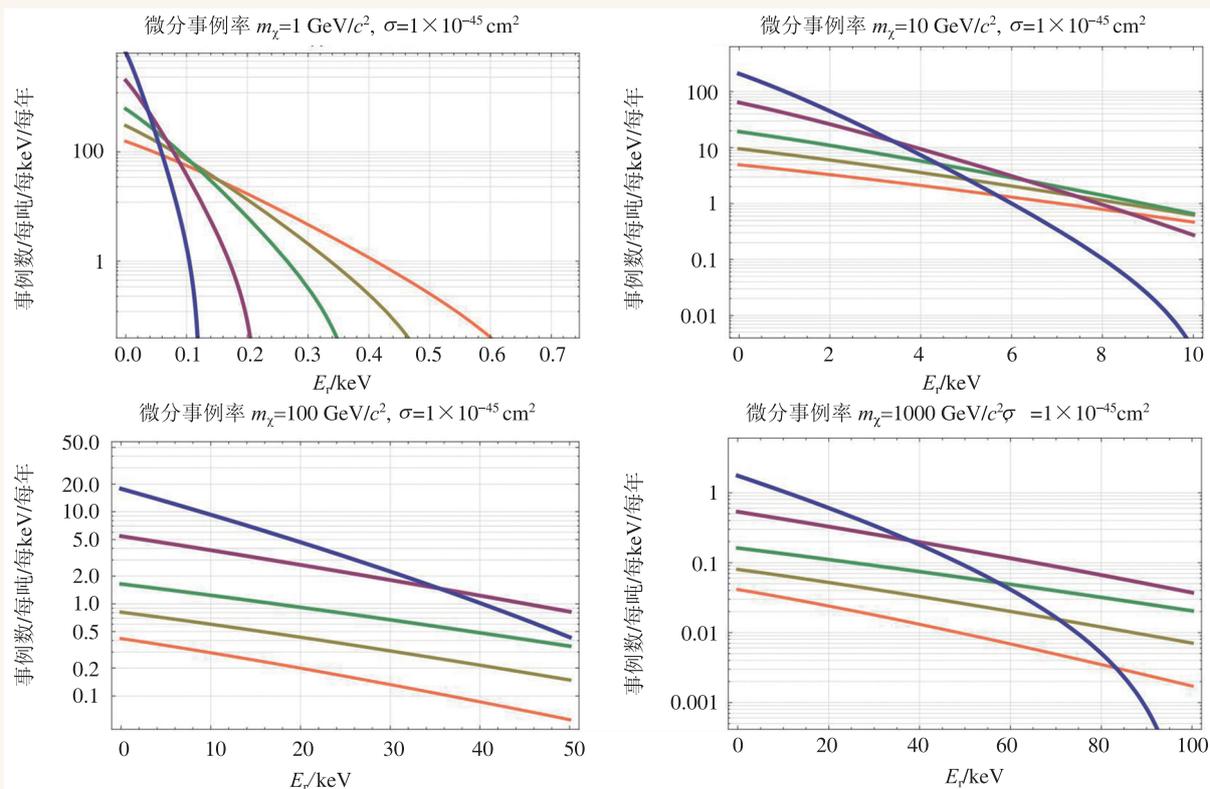


图2 理论预期的在不同WIMPs粒子质量下不同靶核的微分事例率与反冲靶核之间的能量关系(图中 m_χ 为WIMPs粒子质量, σ 为反应截面, 横坐标 E_r 为反冲能量。蓝色为Xe, 紫色为Ge, 绿色为Ar, 棕色为Si, 橘色为Ne)^[3]

普通物质反应截面极低，决定了它的信号很难被捕捉。图2给出了在不同质量下不同靶核理论预期的WIMPs粒子能谱，这些能谱有共同的特点：首先它们的事例数都非常稀少，例如对100 GeV的WIMPs粒子，对1吨质量的探测器在观察一年的情况下，对10 keV以下的每个keV的能量区间，能观测到的暗物质事例不超过20个；其次事例率随着反冲核能量的增加而指数下降，另外暗物质粒子的质量越低，能谱分布越集中在低能区，也就是说探测器的能量阈值越低，可以探测到的WIMPs粒子的事例率越高，对低质量WIMPs粒子的灵敏度也就越高。为了捕捉如此稀有和低能量的事例，需要极低本底的实验环境，极低阈值和大质量的探测器。常规的探测技术已经不再适用，科学家们尝试通过发展各种新的探测技术和手段，使暗物质探测灵敏度不断提升。

地球相对暗物质除了有绕银河系的速度外，还有绕太阳的公转，这一现象会导致在一年中不同时间地球相对于WIMPs粒子的运动速度不同，从而使得实验探测到的WIMPs粒子信号具有年度周期性的变化。因为环境中大部分的放射性本底并不具有这种年度时间调制效应，所以年度调制

效应为探测暗物质提供了强有力的探测方法^[4]。

2 国际上常规直接探测方法

直接探测暗物质WIMPs粒子的历史也是探测器技术发展的历史。直接探测实验在过去30年得到了长足发展，基本上每18个月暗物质探测灵敏度就会增加一倍，这些得益于探测技术的不断革新。总体说来可探测的信号有三种类型：电离、闪烁光和声子(热振动)信号。通过对其中一种或多种方式进行测量就可以探测和研究暗物质及其性质^[5]。

理论上预期WIMPs粒子能量分布非常广，从1 GeV量级到10 TeV量级，与普通物质的反应截面从 10^{-40} 到 10^{-50} cm^2 量级^[6]。在不同的探测技术下，如何统一标准进行实验结果的比较呢？首先实验需要扣除所有已知本底，扣除后如果仍有疑似暗物质事例，那么由暗物质事例的能谱分布，可得到WIMPs粒子最有可能出现的“质量—截面”允许区域，如图3封闭区域所示；如果扣除后的本底没法确定由暗物质做出的贡献，那么可以假设暗物质的能谱不会超过它，扫描不同的

WIMPs粒子的质量会得到相应的反应截面上限，这样可以给出WIMPs粒子“质量—截面”的排除线，如图3所示的不同曲线即为不同实验组给出的暗物质排除线，其右上方是被该实验组排除的暗物质存在区域。

因为对WIMPs粒子与普通物质反应的自旋相关性缺乏了解，所以实验结果分为“自旋无关(spin independent, SI)”与“自旋相关(spin dependent, SD)”两种结果。在自旋无关情况下，WIMPs粒子与靶核中的质子、中子反应截面相等，为了对不同靶核进行实验比较，通常将反应截面转化为WIMPs粒子与核子的反应截面。在自旋相关的情况下，成对的质子或中子效果相互抵消，只对未配对的质子或中子有

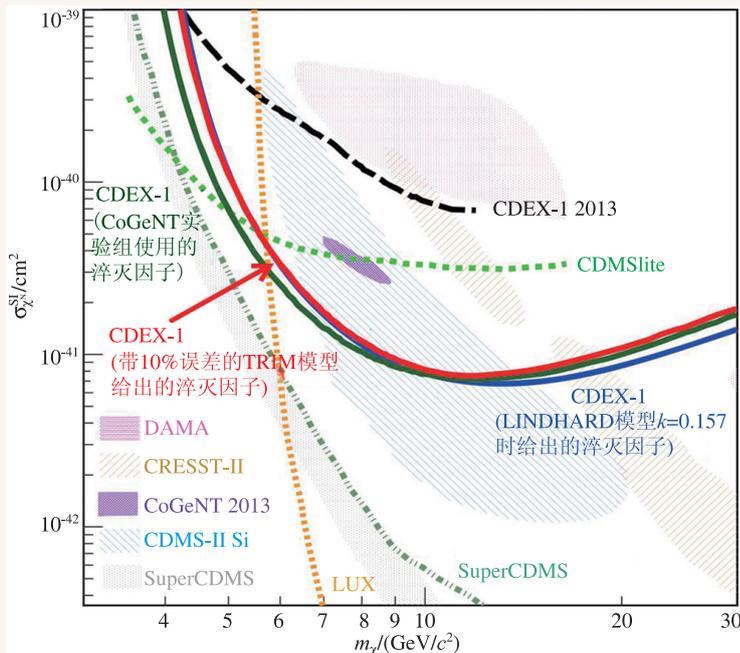


图3 WIMPs粒子自旋无关排除线结果比较^[7]

贡献。所以在自旋相关的情况下，可以分为质子和中子两种不同的反应截面的结果。目前直接探测对自旋无关过程更灵敏，所以国际上通常给出自旋无关的实验结果。

目前全世界有超过20个实验组正在进行或计划进行暗物质直接探测实验，这其中主要分为两大趋势：一是在高质量区域(大于10 GeV/c²)，代表实验是液氙探测器和液氙探测器；二是在低质量区域，代表实验是利用超低阈值的半导体探测器探测低质量暗物质粒子。主要探测技术分为5大类，下面对这5种探测技术进行详细介绍。

2.1 低温固体探测器

该技术主要分为两大类，一个是只测量电离能，另一个同时测量声子和电离能，或声子和闪烁光。

第一种技术使用的是在液氮温度下(77 K)工作的高纯锗探测器。高纯锗探测器是20世纪70年代左右发展起来的一种新型半导体探测器，得益于锗提纯技术的革新，制成高纯锗晶体可以达到12—13个9的纯度，即锗纯度大于99.999999999%或99.999999999%。而24K金或万足金，即首饰成色中纯度最高值，也不过99.99%的纯度。该探测器有最好的能量分辨率(例如，10 keV左右的半高宽为3%左右)，有较低的阈值(1—2 keV)，能进行商业化的生产，并具有长期稳定的探测状态。随着点电极高纯锗的运用，探测器电容被有效降低，使得噪声更低(<400 eVee，“eVee”是指electron equivalent energy，即等效电子能量)。目前国际上使用该探测器的主要实验组有CDEX^[7-12]，TEXONO^[13-15]和CoGeNT^[16-18]。CDEX实验组目前得到了最好的排除线结果^[7, 11, 12]。CoGeNT实验组在2013年发表了年度调制效应的结果，宣称发现可能的暗物质年度调制信号，并给出允许的质量—截面区域^[17]。但使用同样技术的CDEX实验组的结果将CoGeNT实验组的允许区域排除^[7]。在该类实验中，目前最主要的本底来自于周围环境中天然的γ射线。通过仔细选择探测器周围材料和严格控制探测器的组装过程，可以进一步压

低本底。

第二种技术中探测器通常在温度小于100 mK的超低温环境下运行。它可同时测量两种不同种类的信号，用这两种信号的比例来甄别核反冲信号和电子反冲信号。这种主动事例甄别的方法开创了一种新的暗物质探测途径。国际上走在前列的是美国的CDMS实验组，他们测量声子和电离信号，先后使用Si和Ge进行实验。CDMS-II (Si)实验组在2013年发现了暗物质疑似事例^[19]，目前已经基本被其他实验组结果排除^[7, 20-23]。在Si探测器之后，CDMS实验组使用Ge作为探测器测量声子和电离，在2014年获得了第一个SuperCDMS实验组的物理结果，在低能部分有一定优势^[22]。另外，在2013年，CDMS实验组使用同样的Ge探测器但在不同高压下得到的更具低能优势的CDMSlite^[24]实验组的结果，其阈值达到170 eVee，但在该工作条件下无法分辨核反冲和电子反冲事例。欧洲的EDELWEISS实验组使用Ge探测器同样测量声子和电离，也得到了物理结果^[25, 26]。CRESST实验组则使用CaWO₄晶体在超低温下测量声子和闪烁光信号^[27]。

2.2 液氙探测器

液氙是直接探测暗物质最好的材料之一。它可以通过提纯达到很高的纯度，其密度和原子序数较大，所以γ射线的射程较短，绝大部分γ射线事例分布在探测器的四周，通过探测器的位置分辨，去除探测器四周的事例，仅保留探测器的中心区域作为有效探测区域。因此大的液氙探测器有良好自屏蔽的功能。另外氙没有天然放射性核素。

液氙探测器分为两类：一类不加电场；一类加电场。

第一类液氙探测器只测量初次闪光(S1)，此时光电倍增管浸没在液氙中。XMASS实验组使用该方法探测WIMPs粒子，其中液氙的总质量是835 kg，他们计划使用最内部，最低背景的100 kg有效质量液氙进行暗物质探测，其阈值能够达到

5 keVee。

第二类液氙探测器也称气液二相氙时间投影室。原理如图4所示,探测器由下部的液氙和上部的气氙以及上下光电倍增管阵列组成。下部液氙加0.05—4 kV/cm的电场,上部气氙电场更强,约为10 kV/cm。当液氙中有能量沉积时,有一部分沉积能量转化为荧光,立即被上下光电倍增管探测,记为S1;有一部分沉积能量转化为电子离子对,电子在电场的作用下向气氙漂移,由于气氙的强电场,电子从液氙中被“拽出”,接着在气氙强电场中发生二次电离,产生二次荧光,记为S2。因为核反冲和电子反冲会在液氙中造成荧光与电离的比例不同,所以会导致S1, S2的比例不同,可用来甄别去除电子反冲信号。另外由电子在液氙中的漂移时间信息可以得到 z 方向的位置信息,上下光电倍增管阵列可以得到 x, y 方向位置信息,所以该探测器可以进行三维位置定位。

目前在6 GeV以上的WIMPs粒子探测最好的物理结果来自LUX^[21]实验组,其最灵敏的区域已经达到了 10^{-45} cm^2 以下(WIMPs粒子质量在30—40 GeV之间)。LUX实验组使用350 kg液氙,有效质量为118 kg。中国上海交通大学的PandaX实验组也在2014年发表了第一个物理结果^[20],其有效质量为37 kg。因为拥有更高的光收集效率,在 $\sim 7 \text{ GeV}$ 以下有比LUX实验组更好的物理结果。

PandaX实验组计划于2016年在中国锦屏地下实验室(CJPL)建造有效质量为1400 kg的探测器,目标为两年曝光量达到 $2 \times 10^{-46} \text{ cm}^2$ 的灵敏度^[29]。

2.3 液氙探测器

液氙探测器的原理与液氙类似,但也有自身的特点:

(1)液氙产生的闪烁光波长较短,波长转换后,才可以被普通光电倍增管探测。

(2)液氙自身就有极好的波形甄别本领。液氙的闪烁光有明显的快成分和慢成分,对于电子反冲信号和核反冲信号,它们的快慢成分比例不同,可以很好地区分这两种信号。

(3)天然的Ar里存在由宇宙线照射产生的放射性核素 ^{39}Ar (我们简称这类宇宙线照射生成的放射性核素为宇生核素)。 ^{39}Ar 是100%纯 β^- 衰变,会产生一个连续的本底谱,且半衰期较长,为269年。虽然液氙有极好的波形甄别能力,但对低能电子的事例仍不易区分。下一代探测器有可能用地下采集的贫 ^{39}Ar 的氙作为探测原料^[30], DarkSide-50实验组已经采集了大量的贫 ^{39}Ar 的Ar。

与液氙相同,液氙探测器也分为两类:一类只收集闪烁光,另一类为气液二相,收集闪烁光和电离信号。

为了获得最大的光收集效率,单相液氙探测

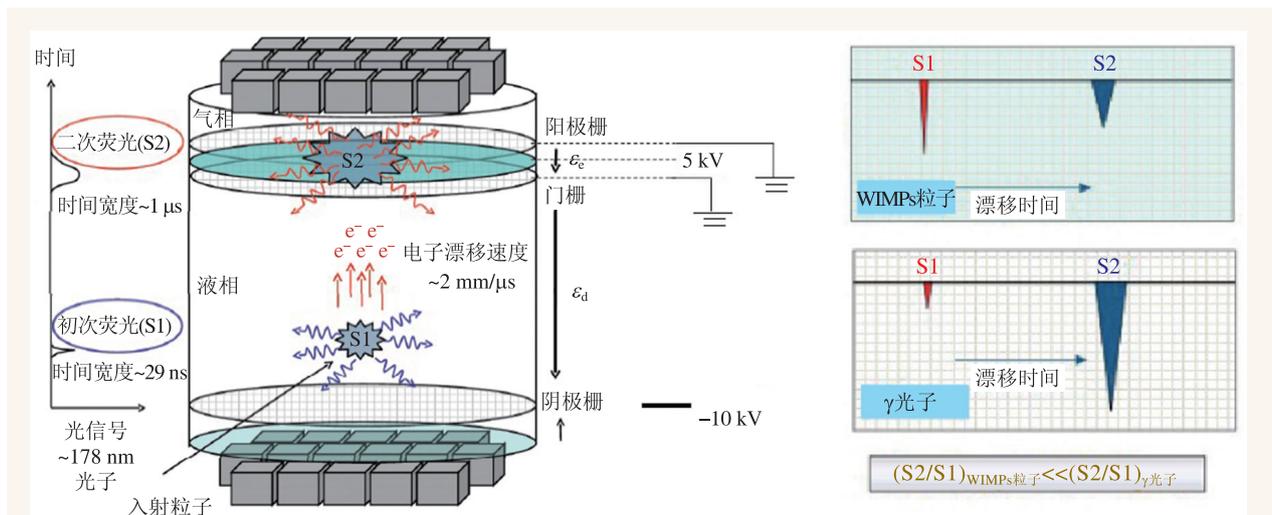


图4 液氙探测器示意图(左)和两次信号之间的关系(右)^[28]

器通常设计成球形。目前国际上有两个实验组 (MiniCLEAN 和 DEAP) 进行 WIMPs 粒子探测。MiniCLEAN^[31, 32] 实验组计划使用 500 kg, 有效质量为 150 kg 的液氙。它的一个特点是, 使用 ³⁹Ar 源来研究液氙探测器电子反冲和核反冲的甄别能力; 另一个是研究液氙作为探测器的应用前景。DEAP 实验组已经完成了 DEAP-3600 探测器的组装, 它总质量为 3600 kg, 有效质量为 1000 kg, 设计本底计数率为 0.2 每吨每年^[33], 设计阈值 60 keVr, 计划达到 10^{-46} cm² 的灵敏度。

双相液氙探测器的原理同液氙相同。它的优点是有双重的甄别能力: 一个是初次闪烁光快慢成分的波形甄别; 另一个是 S1, S2 信号的比例甄别。但二相探测器要求去除 ³⁹Ar, 这给大质量液氙探测器建设带来困难。

DarkSide 实验组正在建设 DarkSide-50 探测器^[34], 它的有效质量是 50 kg, 使用贫 ³⁹Ar 的液氙, 预期阈值为 25 keVr, 目标为 3 年曝光量达到 2×10^{-45} cm²。该探测器的最大特点是第一个暗物质实验使用 4π 反符合中子探测器, 该中子探测器为掺硼液闪。如图 5 所示, 反符合中子探测器外是 1000 吨的切连科夫宇宙线反符合探测器。这一套反符合探测器还可以用来研究中子诱发的事例在液氙中的贡献, 以及研究剩余中子本底在液氙中的贡献。

2.4 闪烁晶体

无机闪烁体, 主要是 NaI 和 CsI 晶体, 也是探测暗物质的重要探测器。它的特点是价钱较低, 有成熟的分析技术, 有较好的波形甄别本领, 可以去除电子反冲本底, 可以利用探测器阵列之间的符合信号排除其他本底事例。它的主要缺点是事例率不容易降低, 探测系统在几年内的稳定性难以维持。

这里最重要的结果就是 DAMA/LIBRA 的年度调制效应^[35]。如图 6 所示, 在不同的能量区间均能看到明显周期信号, 该信号与理论预期的年度调制效应完全同步, 在最明显的 2—6 keV 能区达到 8.8σ 的置信水平。但其他实验结果并不支持

DAMA 实验组的结论, 如图 3 所示。目前国际上还没有成功的实验和理论对其结果进行解释。为了独立验证 DAMA 实验组的实验结果, 国际上其他几个实验组正在进行尝试。其中 DM-Ice 实验组正在使用 17 kg NaI(Tl) 探测器在南极点进行探测, 并计划在 2015 年升级到 250 kg。DM-Ice 实验组的实验可以用来检验 DAMA 的年度调制效应是和季节相关(在南半球和北半球相位不同步)还是和地球相对银河系速度相关(在南半球和北半球相位同步)。

2.5 阈值探测技术

这类探测器主要包括气泡室和过热微滴探测器。探测器处在轻微过热状态时, 如有反冲核能量沉积, 便会有气泡在探测器中凝结。然而, 电子反冲事例由于能量损失率较低, 不足以产生气泡, 从而达到去除电子反冲事例的目的。对 α 粒子事例来说, 由于 α 粒子事例能量损失率很高, 能够产生气泡, 在气泡产生的同时发出声音, 通过对声音信号进行特定处理, 可以辨别去除 α 粒子事例。该探测器有非常好的自旋相关的探测灵敏度。但目前该探测技术还不十分成熟, 处于优化材料选择, 增加材料稳定性和增大有效质量的阶段。另一个缺点是, 该探测器因为很难进行能量刻度, 每次只能测量一种能量, 需

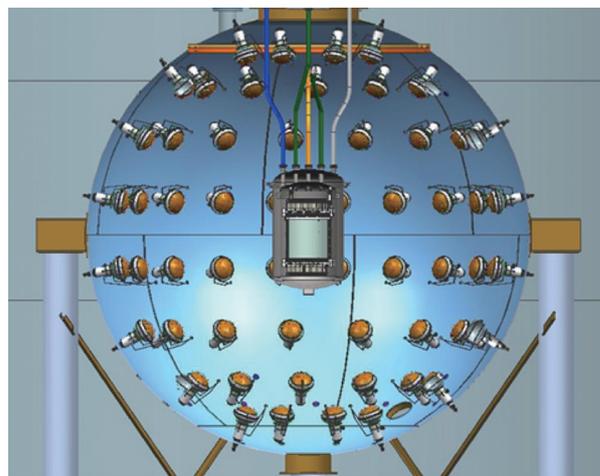


图 5 DarkSide-50 气液二相氙探测器示意图(外层 4π 方向, 30 吨含硼液闪作为中子反符合探测器, 再外层 1000 吨切连科夫宇宙线反符合探测器)^[3]

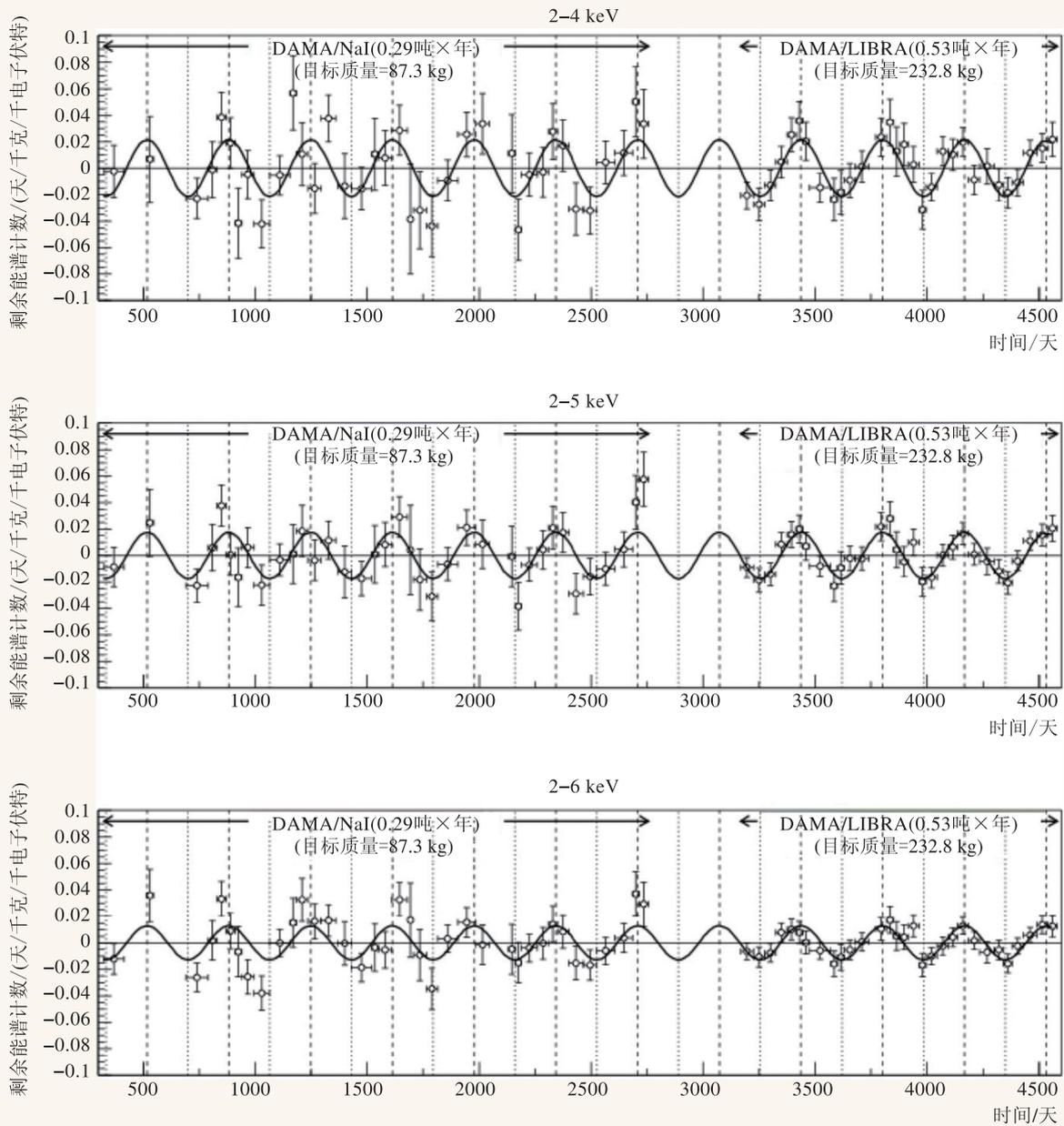


图6 DAMA 实验各个能量区间的年度调制效应结果^[35]

要通过不断调节温度和压强去测不同的能量，从而得到能谱。

COUPP 实验组使用气泡室，是其中的代表性实验。气泡用照相机记录，记录的触发信号由气泡室外观变化给出。对 α 粒子事例，使用声音甄别法去除此类事例，该方法的效率高于99.3%。另外，该探测器有极好的位置分辨本领和极好的中子多次散射事例的分辨本领，如图7所示。COUPP 实验组目前得到了最灵敏的自旋相关的实

验结果^[36]。

3 直接探测的路线

3.1 寻找暗物质粒子

由于多种理论均预言WIMPs粒子的存在，所以WIMPs粒子的质量范围分布广泛，利用各种探测技术对大范围的WIMPs粒子质量进行扫描，试

图寻找 WIMPs 粒子存在的证据。随着探测灵敏度的不断提高, 可能在发现 WIMPs 粒子之前就能够达到探测太阳中微子、大气中微子或超新星爆发中微子与核子的相干散射的灵敏度, 如图 8 粗橙色虚线所示。研究中微子与核子的相干散射也是非常重要且有重大意义的物理课题。在此情况下, 需要更进一步了解中微子的背景, 才能继续寻找 WIMPs 粒子。针对低质量和高质量 WIMPs 粒子实验, 距离中微子相干散射截面都有类似的距离要走。对 5 GeV 低质量 WIMPs, 目前最好的实验结果由 SuperCDMS 实验组给出, 在 10^{-40} 量级, 距离 10^{-44} 约有 4 个数量级的差距。对 50 GeV 高质量 WIMPs 粒子, 目前最好的结果由 LUX 给出, 在 10^{-45} 量级, 距离 10^{-49} 同样约有 4 个数量级的差距。目前暗物质直接探测仍属于该阶段。

3.2 确认发现暗物质粒子

WIMPs 粒子有可能很快就被发现, 但确认其真实性仍需要较长时间。它要满足两个必要条件: 首先必须使用其他不同探测技术的实验对任何 WIMPs 存在的证据进行交叉验证; 其次必须使用更加灵敏的拥有相同探测技术的独立实验进行验证。例如 DAMA 的年度调制实验, 虽然多个实验早已将其发现的暗物质区域排除, 但是仍缺少在相同探测技术下实验的验证, 所以国际上没法真正否定其结果。再例如 CoGeNT 的暗物质允许区域虽比 DAMA 更灵敏, 但结果已经被否认。因为其结果不仅被其他探测技术所排除, 而且被有相同探测技术且更灵敏的 CDEX 实验所排除。

3.3 深入研究暗物质各项属性

如果 WIMPs 粒子信号已确认, 那么需要长期稳定实验, 并从不同的探测技术中尽量挖掘出 WIMPs 粒

子的各项性质。

4 到极深的地下

只有先进的探测技术还远远不够, 因为环境中的本底信号实在太多了。以我们的身体为例, 保守估计每秒钟环境本底射线能和我们身体发生的反应大于 100 次, 一天时间发生约上亿次反应, 而根据目前 WIMPs 粒子预期的反应截面, 虽然每秒钟穿透我们身体的暗物质粒子有约上亿个, 但是即使过了一天时间, 能与我们身体反应的暗物质大概不到 1 个, 也就是说本底信号比暗物质信号多至少 1 亿倍! 最大限度地降低周围环境本底以及探测器自身本底是暗物质实验的必要条件。

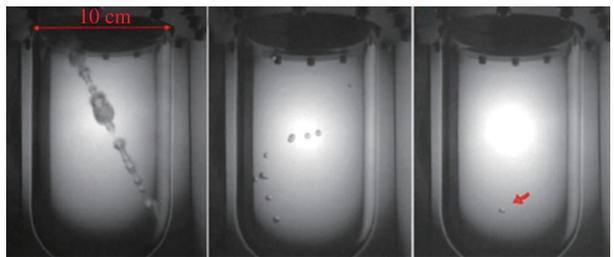


图 7 COUPP 气泡室的分辨能力(左图为 μ 子产生的气泡; 中间图为中子多次散射事例; 右图为中子单次散射事例)^[9]

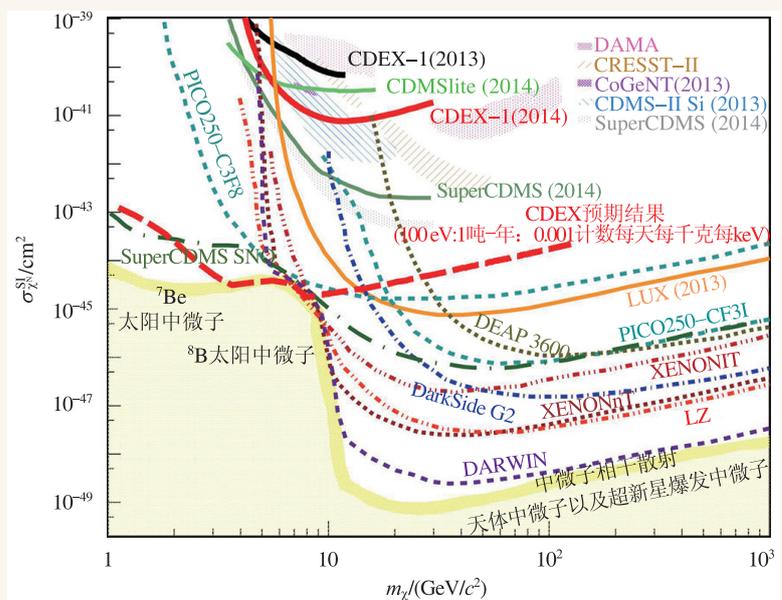


图 8 自旋无关条件下的 WIMPs 粒子允许区间和排除线的实验结果(实线为截止目前为止的结果, 虚线为未来计划实验的预期结果)。同时给出近似的太阳中微子, 天体中微子以及超新星爆发中微子能被弹性散射探测到的预期截面线

本底的其中一个来源是探测器以及探测器周围材料中的光子、中子、电子以及 α 粒子的贡献。对于探测器外部的放射性本底要求我们必须采用精心设计的屏蔽体结构来阻挡。屏蔽体通常由高密度的铅和铜，以及低原子序数的聚乙烯搭建，前者用来阻挡 γ 射线，后者用来慢化快中子和吸收热中子。搭建屏蔽体的原材料必须经过严格的低放射性挑选，为了挑选出最好的屏蔽体材料，科学家们可谓绞尽脑汁。例如CoGeNT实验组使用2000多年前古罗马帝国幸存下来的老铅作为内层屏蔽体。那时船只为了配重，在船底放入铅块，不幸的是，这艘船因为种种原因沉入海底。当时的悲剧为今天的暗物质实验提供了绝佳的屏蔽材料。这是因为铅在海平面被宇宙线照射会生成宇生放射性核素，且它们的半衰期很长，在实验时这些宇生的放射性像幽灵一样挥之不去，对暗物质实验造成严重影响，所以正常的铅并不适合作为内层屏蔽材料；但2000多年前沉入深海的铅，那里宇宙线大大减少，宇生放射性核素衰变殆尽，低放射性再加上高密度是理想的 γ

射线屏蔽材料。这种古罗马老铅数量极其稀少，价格也极其昂贵。

另一个重要的本底来源是宇宙射线。宇宙射线造成的影响体现在两个方面，一是瞬时影响，二是长时间影响。对于直接打入探测器的宇宙射线，容易通过在探测器周围安置宇宙线反符合探测器去除。但对于宇宙线打入周围材料产生的中子所造成的本底，无法通过反符合探测器去除，且对于目前所有的探测技术，都无法甄别中子与WIMPs产生的反冲核信号。另一方面，宇宙射线可以与靶核粒子反应，生成具有放射性的子核，例如液氩探测器中的 ^{39}Ar 即为宇生放射性核素，它是液氩探测器中重要的本底来源。这些都要求暗物质实验必须到很深的地下去，利用厚的岩石来阻挡穿透力极强的宇宙射线。

5 最深的地下实验室——中国锦屏地下实验室

目前世界最深的地下实验室中国锦屏地下实验室(China Jinping underground laboratory, CJPL)位于四川省凉山彝族自治州锦屏山下(见图9)^[37]。雅砻江流域水电开发有限公司在锦屏山下修建了约17.5 km的锦屏山隧道作为施工的交通隧道，用来运输工程物资^[38]，2008年两条交通隧道成功贯通。2009年清华大学与雅砻江流域水电开发有限公司开始在锦屏交通隧道中部联合建设中国锦屏地下实验室。2010年9月，实验室一期工程完成，并于2012年12月12日正式投入使用。

中国锦屏地下实验室岩石覆盖厚度至少2400 m，约6700 m等效水深，空间容积约为4000 m³，测得的宇宙线通量为 $61.7 \pm 11.7 \text{ m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ ^[39]，也就是说每星期每平方米仅有约一个宇宙射线能够达到实验室，是目前国际上宇宙线通量最低的地下实验室。在这种极低的宇宙线通量下，宇宙线瞬时所产生的本底影响几乎可以忽略。

地下实验室建设地点的岩石取样分析结果表明，中国锦屏地下实验室周围岩石主要由大理岩构成，其天然放射性核素含量较低，主要岩石放

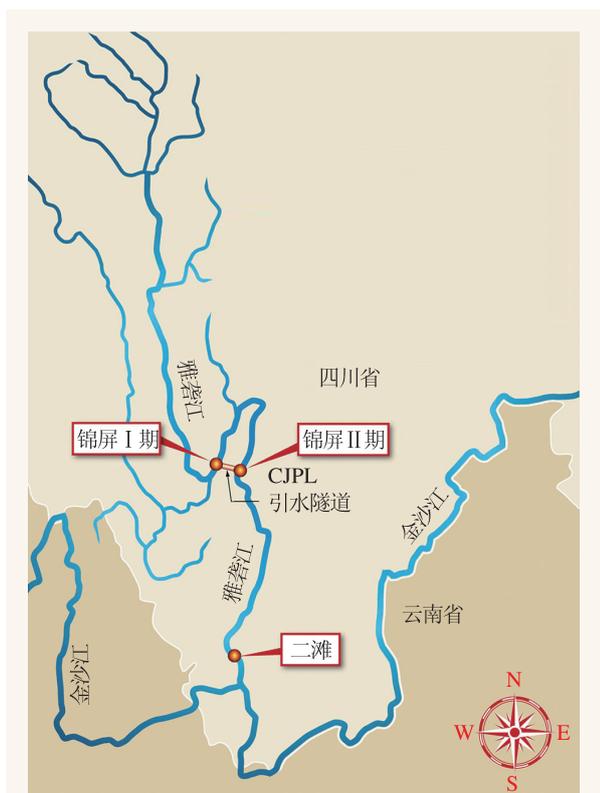


图9 中国锦屏地下实验室(CJPL)地理位置示意图^[37]

放射性核素含量是北京地表正常环境水平的约几十分之一到几百分之一，是一个非常好的天然低本底环境。另外，为了防止氡气聚集并降低氡气含量，实验室从隧道东端洞口外取新鲜空气，经过约10 km长的通风管道送入地下实验室。长期的监测结果表明，在通风设备工作良好的情况下氡气含量约20 Bq/m³。

锦屏地下实验室的建成和使用为我国开展自主暗物质、双β衰变等低本底实验提供了非常好的实验场所。目前清华大学领导的CDEX实验团队以及上海交通大学领导的PANDAX团队同时在锦屏地下实验室开展直接探测暗物质实验，并取得了具有国际竞争力的物理结果。

目前锦屏实验室二期工程已经开始进行建设，实验室由4个14 m×14 m×130 m的子隧道构成，容积约13万立方米，比锦屏地下实验室一期工程大约大30倍。建成投入使用后可以更好地开展大型直接探测暗物质实验，也可为开展岩体力学、地球结构演化、生态学等多学科提供良好的研究环境。

6 中国暗物质实验

6.1 中国暗物质实验发展历史

2003年，清华大学的研究人员通过理论研究和分析，率先提出了利用极低能量阈值的高纯锗探测器进行轻质量WIMPs粒子的直接探测计划并开展了相关的实验研究。2004年，清华大学成立了暗物质研究组，利用韩国Y2L地下实验室开始了利用高纯锗进行暗物质直接探测的实验研究^[40]，这标志着我国自主暗物质直接探测实验研究的开始。2007年，清华大学暗物质研究组参与的TEXONO实验组发表了第一个暗物质直接探测实验的物理结果，确定了利用低能量阈值高纯锗探测器探测轻质量WIMPs粒子的可行性^[15]。2009年，清华大学联合四川大学、南开大学、中国原子能科学研究所和雅砻江流域水电开发有限公司等正式成立了中国暗物质实验(China dark matter

experiment, CDEX)合作组。CDEX实验是国内首个完全自主的暗物质探测实验，计划利用吨量级的点电极高纯锗探测器开展暗物质直接探测和无中微子双β衰变的实验研究。2011年，CDEX合作组在CJPL利用20 g超低阈值高纯锗开展低质量暗物质直接探测实验CDEX-0，并于2014年在*Physics Review D*上发表了最新结果，实现了相同探测器技术下177 eVee最低能量阈值，并给出了相同探测技术3.5 GeV以下最灵敏的结果^[12]。随后，CDEX-1，即单体质量为1 kg的点电极高纯锗探测器(point contact germanium detector, PC-Ge)，开始测试运行，并于2014年在*Physics Review D*上发表重要物理结果：CDEX-1利用与美国CoGeNT实验组相同的探测技术进行独立的实验研究，如图3所示，确定地将CoGeNT实验组允许区域排除^[7]。

6.2 CDEX探测技术

锗是人类可以提纯的最纯的元素，高纯锗探测器以P型或N型高纯锗晶体为基底，通过锂蒸气扩散法/硼离子注入法在晶体表面形成高度掺杂的N⁺层/P⁺层电极，形成N⁺PP⁺结构或P⁺NN⁺结构。N⁺层/P⁺层厚度一般为毫米/微米水平。在N⁺和P⁺电极上加载反向偏压，使耗尽层逐渐扩展到

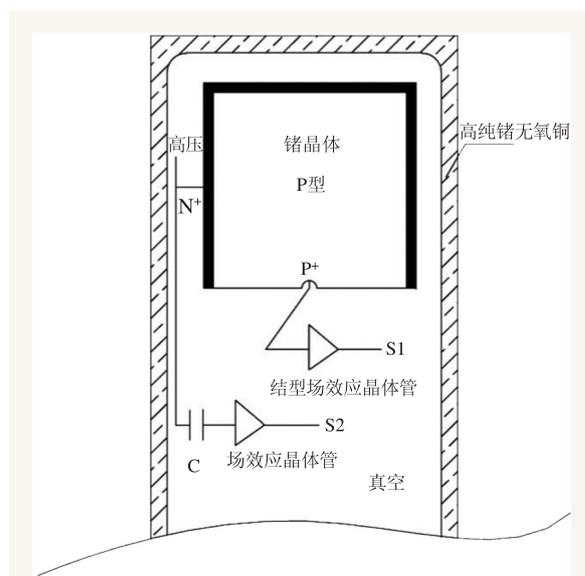


图10 P型点电极高纯锗结构示意图

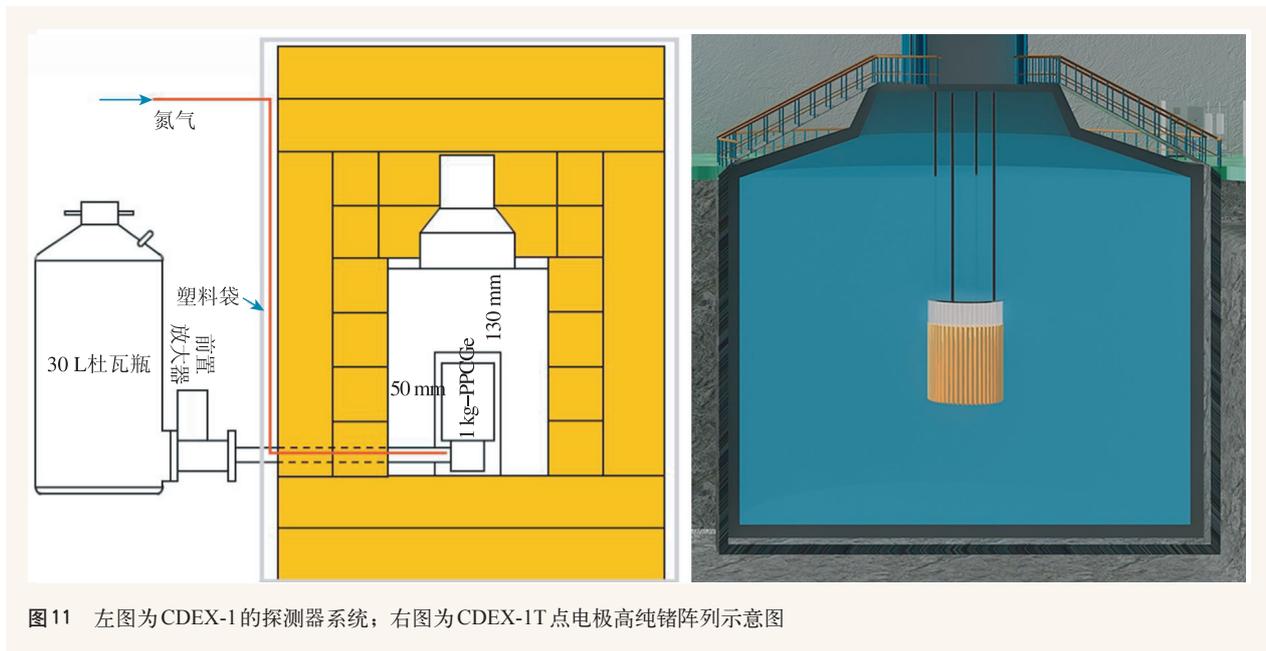


图 11 左图为 CDEX-1 的探测器系统；右图为 CDEX-1T 点电极高纯锗阵列示意图

整个晶体，实现最大的灵敏体积，探测器就可以正常工作，进行辐射探测。因为高纯锗探测器的噪声和它自身的电容有关，电容越大噪声越大，所以 CDEX 为了降低探测器阈值，采用了点电极高纯锗探测器 (point contact germanium detector, PCGe)。如图 10 所示，中心 P⁺ 点电极的尺寸为 1 mm 左右，电容可以达到 pF 量级，能量阈值可以达到 100 eVee 的水平。超低的能量阈值为探测低质量暗物质提供了强有力的工具。

为了进一步降低本底水平，CDEX 实验组发展了主动屏蔽技术——反符合探测器。设计思路是：将 PCGe 放置在反符合探测器里面，因为 WIMPs 粒子的反应截面很低，所以在两个探测器里都产生信号的概率几乎为 0，但是环境中的放射性本底可能会在两个探测器中都产生信号，由此可以去掉这类干扰。CDEX-1 实验使用井型的高纯 NaI(Tl) 作为反符合探测器包围 PCGe，如图 11 左图所示。CDEX-10 实验以及未来的吨量级高

纯锗实验计划使用液氩(或液氮)探测器作为反符合探测器，另外高纯锗探测器可以直接浸泡在液氩或液氮中，用其提供低温环境，其结构如图 11 右图所示。

CDEX 实验组在运行 CDEX-0 和 CDEX-1 实验积累的经验上，从 2014 年开始了 CDEX-10 阶段的实验工作，进行了由 3 个单体 1 kg PCGe 构成的阵列探测器的测试工作，为 CDEX-10 等大阵列 PCGe 实验积累经验。期望在未来几年内利用 PC-Ge 阵列探测器将暗物质的探测灵敏度提高 1—2 个量级，特别是对轻质量的 WIMPs 粒子。同时 CDEX 合作组也开始了高纯锗晶体生长和 PCGe 技术的自主研发，为未来开展吨量级高纯锗暗物质实验储备技术和锻炼队伍。

另一方面，由于 PCGe 具有能量线性范围宽(可以达到几个 MeV)和能量分辨率好等特点，CDEX 实验组未来计划利用吨量级的点电极高纯锗探测器进行暗物质和无中微子双 β 衰变的实验研究。

参考文献

- [1] <http://www.livescience.com/19796-dark-matter-alternatives.html>
- [2] Freese K, Frieman J A, Gould A. Phys. Rev. D, 1988, 37: 3388
- [3] Cushman P *et al.* arXiv: 1310.8327
- [4] Freese K, Lisanti M, Savage C. Rev. Mod. Phys., 2013, 85: 1561

- [5] Lewin J D, Smith P F. Astropart. Phys., 1996, 61: 87
- [6] Bauer D *et al.* arXiv: 1305.1605
- [7] Yue Q *et al.* Phys. Rev. D, 2014, 90: 091701(R)
- [8] Kang K J *et al.* J. Phys. Conf. Ser., 2010, 203: 012028

- [9] Yue Q, Wong H T. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2012, 375:042061
- [10] Kang K J *et al.* *Chinese Phys. C*, 2013, 37:086002
- [11] Zhao W *et al.* *Phys. Rev. D*, 2013, 88:052004
- [12] Liu S K *et al.* *Phys. Rev. D*, 2014, 90:032003
- [13] Li H B *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110:261301
- [14] Li H B *et al.* *Astropart. Phys.*, 2014, 56:1
- [15] Lin S T *et al.* *Phys. Rev. D*, 2009, 79:061101
- [16] Aalseth C E *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 106:131301
- [17] Aalseth C E *et al.* *Phys. Rev. D*, 2013, 88:012002
- [18] Aalseth C E *et al.* arXiv:1401.3295
- [19] Agnese R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 111:251301
- [20] Xiao M J *et al.* *Sci. China-Phys. Mech. Astron.*, 2014, 57(11): 2024
- [21] Akerib D S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 112:091303
- [22] Agnese R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 112:241302
- [23] Aprile E *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 109:181301
- [24] Agnese R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 112:041302
- [25] EDELWEISS Collaboration, Armengaud E *et al.* *Phys. Lett. B*, 2011, 702:329; arXiv:1103.4070 [astro-ph.CO]
- [26] EDELWEISS Collaboration, Armengaud E *et al.* *Phys. Rev. D*, 2012, 86:051701
- [27] Angloher G, Bauer M, Bavykina I *et al.* *Eur. Phys. J. C*, 2012, 72:1971, arXiv:1109.0702 [astro-ph.CO]
- [28] Aprile E *et al.* *Asotropart. Phys.*, 2011, 34:9
- [29] Li Z *et al.* arXiv:1207.5100
- [30] Xu J *et al.* arXiv:1204.6011v1
- [31] Hime A. arXiv:1110.1005
- [32] Mini-CLEAN Collaboration, McKinsey D. *Nuc. Phys. B*, 2007, 173:152
- [33] DEAP Collaboration, Boulay M. arXiv:1203.0604
- [34] DarkSide Collaboration, Alexander T *et al.* *Astropart. Phys.*, 2013, 49:44
- [35] DAMA/LIBRA Collaboration, Bernabei R *et al.* *Eur. Phys. J. C*, 2010, 67:39; arXiv:1002.1028 [astro-ph.GA]
- [36] COUPP Collaboration, Behnke E *et al.* *Phys. Rev. D*, 2012, 86: 052001; arXiv:1204.3094 [astro-ph.CO]
- [37] <http://www.sciencemag.org/content/324/5932/1246.full>
- [38] 杨先武, 李胜蓝. 世界第二深埋隧道——锦屏山隧道贯通. 天府早报, 2008-08-10. <http://sichuan.scol.cn/dwzw/20080810/200881074951.htm>
- [39] Wu Y C *et al.* *Chinese Phys. C*, 2013, 37:086001
- [40] 岳骞, 程建平, 李元景等. 高能物理与核物理, 2004, 28(8): 877

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕》
——《物理》四十年集萃

2012年《物理》创刊40周年，为答谢广大读者长期以来的关爱和支持，《物理》编辑部特推出优惠订阅活动：向编辑部连续订阅两年（2016—2017年）《物理》杂志的订户，将免费获得《岁月留痕——物理》四十年集萃》一本（该书收录了从1972年到2012年在《物理》各个栏目发表的四十篇文章，476页精美印刷，定价68元，值得收藏）。

欢迎各位读者订阅《物理》（银行汇款请注明“《物理》编辑部”）
（编辑部直接订阅优惠价180元/年）

咨询电话：(010)82649266；82649277

Email: physics@iphy.ac.cn

订阅方式

(1) 邮局汇款

地址：
100190，北京603信箱
《物理》编辑部收

(2) 银行汇款

开户行：
农行北京科院南路支行
户名：
中国科学院物理研究所
帐号：
11250101040005699

