PandaX 实验介绍和进展

季向东, 刘江来, 谌勋*

上海交通大学物理与天文系, 粒子物理与核物理研究所, 上海 200240

* 联系人, E-mail: chenxun@sjtu.edu.cn

2015-12-01 收稿, 2015-12-15 修回, 2015-12-15 接受, 2016-04-19 网络版发表

摘要 PandaX是一个利用惰性元素“氙”作为探测介质进行粒子及天体物理稀有事件探测的大型实验装置. PandaX的一期和二期实验主要利用“二相型氙”时间投影室技术来进行弱相互作用暗物质粒子的直接探测. 其中一期实验使用了120 kg氙, 目标是在低质量暗物质区域检验以往其他实验所发现的疑似信号. 一期实验的结果不支持这些疑似信号, 并对 $10\text{ GeV}/c^2$ 以下质量的暗物质性质给出了严格的限制. 二期实验升级后的探测器使用了500 kg的氙. 二期实验目前正在进行调试和试运行, 它将在2015年末正式开始数据采集. PandaX第三期实验将采用高压的富氙-136(90%富集度)气体探测器进行无中微子双贝塔衰变探测, 以研究中微子的本质. 三期实验正在进行概念设计和原型测试.

关键词 液氙探测器, 暗物质, 中微子

当代的粒子天体物理面临着一系列急需回答的问题, 例如: 暗物质是否是一种粒子? 中微子是否是它自身的反粒子? 中微子的质量是多少? 这些问题只能通过物理实验进行回答. 一个重要的实验途径是去寻找和研究这些问题可能涉及的物理过程所产生的信号. 例如, 目前理论上最流行的暗物质粒子候选者之一叫做弱相互作用重粒子(weakly interactive massive particles, WIMPs)^[1], 它如果存在的话, 能够和普通物质相互作用, 并转移一部分能量, 从而产生可供探测的信号. 但是这些过程非常罕见, 其产生的信号很容易被本底噪声所掩盖, 从而无法识别. 由于对这些过程来说, 宇宙线会产生大量的本底, 因此, 科学家通常在能够有效屏蔽宇宙射线辐射的低本底地下实验室里面, 使用精心设计的探测器来进行这些稀有过程的寻找. 比如在位于意大利的深达1400 m的Gran Sasso国家实验室^[2]里面, 就运行和建设着诸如XENON^[3], DAMA/LIBRA^[4], CRESST^[5]等暗物质直接探测实验和GERDA^[6], CUORE^[7]等无中微子双贝

塔衰变过程探测实验. 在美国的深度为1480 m的Sanford地下实验室里, 则运行着暗物质直接探测实验LUX^[8]和无中微子双贝塔衰变探测实验Majorana^[9]. 这些实验采用了不同的探测物质和探测技术, 虽然到目前为止还没有能够发现这些稀有事件的确凿证据, 但是对相应的物理过程给出了越来越强的限制.

PandaX就是一个位于中国锦屏地下实验室^[10]内, 利用氙作为探测介质进行粒子及天体物理稀有事件探测的大型实验装置. PandaX已完成的一期(PandaX-I)和正在进行的二期(PandaX-II)内主要进行WIMP的直接探测. PandaX计划在未来的三期(PandaX-III)里面开展无中微子双贝塔探测实验, 以验证中微子是否是其本身的反粒子.

1 氙与稀有信号探测

作为一种优异的探测介质, 氙在粒子物理和天体物理的稀有事件探测中得到了广泛的应用. 综述

引用格式: 季向东, 刘江来, 谌勋. PandaX 实验介绍和进展. 科学通报, 2016, 61: 2264–2272

Ji X D, Liu J L, Chen X. Status and plan of the PandaX experiment (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2264–2272, doi: 10.1360/N972015-01131

文献[11]详细讨论了液氙的性质及其在粒子及天体物理实验方面的应用. 我们在此对液氙在暗物质探测和无中微子双贝塔衰变探测实验里的应用做一个简要的介绍.

1.1 氙与暗物质直接探测

如果基于广义相对论的宇宙学是正确的, 那么关于星系旋转曲线的天文学观测证据表明暗物质在星系里面广泛存在, 其中也包括我们所在的银河系, 而地球很可能随着太阳系一起在暗物质构成的“晕”里面穿行^[12]. 在很多超出标准模型的粒子物理理论中, WIMP是一种最为流行的暗物质候选者, 它的质量可能在 $10\sim 1000\text{ GeV}/c^2$ 范围内, 并与夸克存在某种弱相互作用. 如果WIMP是银河系内的暗物质的主要组成部分, 那么地球在暗晕里面穿行时, WIMP将以微小的几率和普通物质的原子核发生碰撞, 即产生核反冲. 在液氙里面, 反冲的原子核获得几个keV(千电子伏特)到几十keV的能量, 这些能量以光子和电离的电子等形式释放出来, 从而被探测到.

氙在对WIMP的探测上具有很大的优势. 首先, 由于WIMP与原子核碰撞的事例率正比于原子量的平方, 因此WIMP在穿过具有较大原子量的氙会有较高的碰撞事例率. 其次, 液氙在所有的惰性气体当中具有最高的电离产额和闪烁光产额, 其内部的能量沉积能够产生强烈的可供探测的闪烁光信号和电离电子信号. 此外, 由于氙没有长寿命的放射性同位素, 液氙内部的放射性杂质主要是放射性的氦和氩, 它们都可以通过循环提纯的方法加以控制, 氙内部的本底因此能比较容易的保持在非常低的水平. 液氙具有很高的辐射阻止能, 来自外界的大部分伽玛射线本底能够被阻止在液氙的外层, 产生所谓的“自屏蔽”效应, 使得我们可能在中间本底更低的区域来寻找暗物质信号. 液氙的沸点在一个大气压下是 165.05 K , 并且随气压升高变化不大, 因此对液氙状态的维持由相对容易的制冷系统即可完成, 实现的难度较低. 最后, 基于液氙和气氙的探测器比较容易做大, 从而通过提高单位时间的事例率来提高探测的灵敏度.

近年来, 大部分的液氙暗物质直接探测实验都采用了二相型氙时间投影室(Dual Phase Xenon Time Projection Chamber)技术, 例如XENON100^[3], LUX^[8]及PandaX-I^[13], 即将运行的PandaX-II和建设中的

XENON1T^[14], 规划中的LZ实验^[15,16]也将采用该技术. 这种技术在大约10年前首先由XENON10^[17]和ZEPLIN-II^[18]实验所研发, 其基本原理如图1所示. 探测器上下各有一个光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)阵列, 用于探测闪烁光信号. 探测器内部的氙分为液态(下)和气态(上)两部分, 其中施加了向下的电场, 电场在两部分的氙里面各自是均匀的. 外部辐射在液氙里面发生核反冲或者电子反冲, 沉积的能量可产生激发态的氙原子和电离的电子-离子对, 部分电子-离子对会发生重结合(recombination)产生额外的激发态原子. 激发态氙原子跃迁到基态时会产生闪烁光信号(通常被称为S1), 这个信号能够被PMT阵列探测到. 剩余的自由电子在电场作用下以匀速向探测器上方漂移, 在气液分界面处被强电场攫取到气氙中, 并在里面产生正比闪烁光信号(通常被称为S2), 其光强正比于电子数目. S2信号也能被PMT阵列探测到. 电子在液氙里漂移的速度大约是每微秒 $1\sim 2\text{ mm}$ 的量级, 探测器接收到S2和S1的时间差可以用来计算反冲事件所发生的纵向位置. 由于电离电子在漂移时仅有较小的横向扩散, 因此顶部PMT阵列所接收到的S2信号分布可用于重建碰撞事件的水平位置. 重建得到的碰撞事件的三维空间位置的分辨率能达到毫米量级的精确度, 这意味着可以通过选取液氙内部本底较低的基准区域内的事例进行分析, 排除掉外面本底较高的区域, 从而提高实验灵敏度.

图1 (网络版彩色)二相型氙时间投影室工作原理. 液氙内部的碰撞产生可被光电倍增管阵列探测的S1/S2信号, 来源于核反冲及电子反冲的S1/S2信号大小的相对区别可以用于区分它们, 多个S2信号能够用于识别中子本底

Figure 1 (Color online) Work principle of the dual phase xenon time projection chamber. The collision inside liquid xenon generates S1/S2 signals that can be detected by the PMT arrays. The difference between the relative size of the S1/S2 signals in nuclear recoil and electron recoil can be used to discriminate them. Multiple S2 signals can be used to identify the neutron background

二相型氙时间投影室技术排除本底的方法主要有以下两种: 首先, 电离电子在核反冲事件中发生重结合的概率大于在电子反冲事件里面的概率, 因此和电子反冲相比, 核反冲事件里面S2信号与S1信号的比值更小, 这是一个非常重要的排除电子反冲本底的判据. 其次, 中子本底也会在探测器里面产生核反冲事例. 但是由于中子在液氙里面的平均自由程较小, 大部分中子会散射多次, 形成多个S2信号, 来源于WIMP的事例通常仅有一个S2信号, 这使得排除部分中子本底成为可能.

采用二相型氙技术的LUX实验在大部分暗物质可能质量区域给出了迄今为止最为严格的暗物质与原子核反冲截面上限^[19].

1.2 氙与无中微子双贝塔衰变的探测

氙具有多种天然同位素, 其中丰度为8.9%的¹³⁶Xe可以用来探测无中微子的双贝塔衰变(0νββ)过程. 双贝塔衰变是一类能够释放出两个电子的原子核衰变, 通常发生在一些由于能量守恒的限制而无法发生贝塔衰变的原子核上, 这些原子核的质子数 Z 和中子数 N 都为偶数. 由于贝塔衰变是弱相互作用过程, 伴随着电子会有电子反中微子产生, 因此正常的双贝塔衰变会有两个反中微子产生(2νββ)^[20]. 但是如果中微子是其本身的反粒子, 即所谓的马约拉纳(Majorana)粒子^[21,22]的话, 这个过程的两个中微子可以相互抵消, 从而衰变的能量几乎完全由电子携带, 并破坏了轻子数守恒, 这就是无中微子双贝塔衰变. 观察到无中微子双贝塔衰变, 能够验证中微子是马约拉纳粒子, 并能够推出等效的马约拉纳中微子质量, 甚至给出中微子质量序(neutrino mass hierarchy)的信息. 目前世界上的实验还没有找到0νββ的事例, 基于液氙的EXO实验给出了¹³⁶Xe里面发生0νββ过程的半衰期下限为 1.1×10^{25} 年^[23], 基于锗的GERDA实验给出了⁷⁶Ge发生0νββ过程的半衰期下限为 2.1×10^{25} 年^[24].

0νββ探测实验的本底主要来源于2νββ过程、探测器本底和实验室本底. 通常应用电子中微子的等效马约拉纳质量 $m_{\beta\beta}$ 的灵敏度来评价一个0νββ探测实验^[25], 它和实验条件的关联可以写为

$$m_{\beta\beta} \propto \sqrt{1/\varepsilon} \left(\frac{b\Delta E}{Mt} \right)^{1/4},$$

其中, ε 是信号探测效率, M 是实验所用的双贝塔衰变

同位素质量, t 是数据获取时间, ΔE 是能量分辨率, b 是在感兴趣能量区域(region of interest, ROI)内部的本底事例率. 气氙探测器具有良好的能量分辨率, 低本底事例率, 特别是可以根据看到事件中所产生两个电子的径迹来排除本底, 并能通过增大气压的方式增加所用的¹³⁶Xe的质量, 这些因素的共同作用使得高压气氙探测器对 $m_{\beta\beta}$ 的探测可以达到非常高的灵敏度, 从而有利于发现可能的0νββ过程.

2 暗物质探测实验

PandaX-I和PandaX-II都是使用二相型氙时间投影室技术的暗物质直接探测实验. PandaX实验于2009年作为当时即将建设的锦屏地下实验室内两个暗物质直接探测实验提出, 另一个是清华大学领导的以高纯锗作为探测介质的CDEX实验^[26].

PandaX-I是PandaX探测项目的第一步, 主要目标是检验由国际上其他实验所报告的质量在10 GeV/ c^2 附近的轻暗物质信号^[13]. 它得到了上海交通大学、科技部和国家自然科学基金委的支持. 在最初设计的时候, PandaX-I的基础设施, 包括屏蔽体、低温系统和气体处理系统都是为可升级到吨量级的实验准备的, 这样的设计加快了后续实验的进度并大大节约了成本. 在短短的几年时间, PandaX-I完成了设计和探测器建造, 并加入了WIMP搜寻的竞争当中. PandaX-I探测器的时间投影室(TPC)内部使用了120 kg的氙, 于2014年3月开始进行数据采集. 2014年8月, PandaX-I发布了首批17天暗物质搜寻数据的分析结果, 显示了在暗物质低质量区域内优异的探测灵敏度^[27]. PandaX-I在2014年10月底停止了取数, 并开始了到PandaX-II的升级. PandaX-II的TPC里面使用了500 kg的氙, 预期在2015年年底之前开始正式运行. PandaX-I的完整数据分析结果已经于今年5月正式发布, 该结果确认了首批数据分析结果的正确性, 并在多方面改进了数据分析方法^[28]. 两次结果都对国际上其他实验所发现的疑似暗物质信号提出了质疑.

PandaX合作组从PandaX-I实验的成功运行里面获取了相当的低温惰性气体处理、电子学和信号系统以及大量数据处理的经验, 现在正将这些经验运用于新的PandaX-II上. PandaX-II位于PandaX-I的同样的位置, 并沿用了PandaX-I的基础设施(屏蔽体、低温和气体处理系统). 随着锦屏实验室二期(CJPL-II)的修建, PandaX可能在将来建设20~30吨级液氙终极暗

物质探测器,以期对质量为 $100 \text{ GeV}/c^2$ 的WIMP与原子核反应截面的探测灵敏度达到 10^{-49} cm^2 ,即大气中微子与原子核反应的本底信号区域。

2.1 PandaX暗物质探测实验装置

PandaX-I和PandaX-II位于锦屏地下实验室一期的实验大厅内。锦屏实验室提供了厚达2400 m的岩石覆盖,有效屏蔽了宇宙射线。实验室内 μ 子的流量相当于62事例/(平方米·年)^[29],它们在探测器、岩石和混凝土里面所产生的中子在探测器里面形成的本底可以忽略。

PandaX暗物质探测实验装置包括屏蔽体、低温和气体循环处理系统以及探测器三大部分。PandaX-I和PandaX-II使用了同一个屏蔽体及低温和气体循环处理系统。

屏蔽体用于屏蔽实验室的岩石及混凝土里面由 ^{238}U , ^{232}Th 及其衰变产物所产生的伽玛射线和中子,其设计目标是保证每年从外界进入探测器感兴趣区域内的中子和伽玛本底事件数目少于一个。如图2所示,屏蔽体从外到内分别由聚乙烯、铅、聚乙烯及铜组成,再向内是高纯无氧铜罐,用于放置不锈钢的内罐(包括探测器)。当探测器放入后,铜罐内部需抽成真空,以减少内外的热交换。整个屏蔽体的重量达到了93 t。屏蔽体的顶盖部分可以方便的移开,以便于进行探测器的安装和系统维护操作。

PandaX正式运行的时候需要保持大约 -100°C 的低温。同时,由于使用的容器以及探测器和氦接触的部分会释放杂质气体到液氦当中,这会引入放射性本底,并导致电子收集效率的下降。因此,需要将液

氦连续不断地抽出,让其通过气体纯化器以除去杂质,再重新注入到探测器中。PandaX的低温和气体处理系统被设计为实现相应需求,它能够安全、稳定、高效的完成制冷、气体循环和提纯。其中,低温系统被设计为由共同的制冷总线所连接的具有不同功能的独立模块组成的结构,采用脉冲管制冷机进行制冷。低温和气体循环系统与绝热容器相连。制冷及气体循环系统的照片可见图3。

暗物质探测器被放置在双层的低温绝热容器里面。绝热容器的外层即前面提到的铜罐,内罐则使用不锈钢制作。PandaX-II使用了新的低本底不锈钢重新制作了内罐。

PandaX-I的一个重要的科学目标是进行低质量暗物质的探测。探测器被设计成圆饼状(同类实验XENON100及LUX的探测器都是圆柱状),其直径为60 cm,电子漂移长度仅15 cm,这种设计能够增强光的采集效率,从而降低探测能量的阈值,最终提高对低质量暗物质探测的灵敏度。PandaX-I的探测器示意图及照片见图4。PandaX-II具有更大的探测器,其直径不变,但是电子漂移长度达到了60 cm,从而能够容纳500 kg的液氦。

探测器的基本结构包括三部分:顶部PMT阵列、电场笼及底部PMT阵列。顶部PMT阵列的主要目的是用于探测S2信号,并根据S2信号的分布重建出碰撞事件的水平位置分布,底部PMT阵列可用于探测S1及S2信号。电场笼的作用是保证在液氦中施加的

图2 (网络版彩色)PandaX的屏蔽体示意图

Figure 2 (Color online) A schematic view of the PandaX shielding

图3 (网络版彩色)PandaX暗物质实验的制冷和气体循环系统照片,倾斜的管道是制冷总线,上方的不锈钢罐体里面是不同的功能模块

Figure 3 (Color online) A photo of the cryogenics and gas recycling system of PandaX dark matter experiment. The inclined tube is the cooling bus, and the different functional modules are placed in the stainless steel vessels above it

图4 (网络版彩色)PandaX-I的探测器截面图(a)及实物照片(b). 照片里面, 顶部PMT接上了供电及信号读出线缆

Figure 4 (Color online) The cross-section view (a) and photo (b) of the PandaX-I detector. Power supplement and readout cables were connected with the top PMTs in the photo

电场足够均匀, 并反射碰撞事件里面产生的光子, 提高光子采集效率, 从而更准确地测量信号的大小. 此外, 在顶部PMT阵列的下方布置阳极, 液面下方放置栅极, 底部PMT阵列上方放置阴极, 这些电极在探测器内部的氙里面产生了向下的电场.

PandaX-I的顶部PMT阵列由143个滨松R8520-406型1英寸PMT构成, 底部PMT阵列则包括了37个滨松R11410-MOD型3英寸PMT. 电场笼由内部的聚四氟乙烯(PTFE)反射板及外面的同心高纯无氧铜环构成. PandaX-I运行期间, 栅极和阴极在液氙漂移区内产生的漂移电场达到667 V/cm.

PandaX-II的上下PMT阵列都各自使用了55个3英寸PMT来探测光信号, 同时在TPC上下外侧各布置了24个1英寸PMT做本底的反符合(Veto, 当其探测到信号时, 内部PMT记录的事件属于本底事件). 相对于PandaX-I, PandaX-II的电场笼外侧多加了一层PTFE的反射板, 防止外部的光进入探测器内部. PandaX-II的探测器示意图如图5所示.

2.2 PandaX-I的暗物质探测结果

PandaX合作组于2014年8月发布了首批17.4天有效时间内利用37 kg基准质量液氙进行暗物质探测的结果, 没有观测到暗物质候选者事例. 因此该结果为暗物质与原子核发生自旋无关碰撞的截面设置了上限, 其最小值在暗物质质量为49 GeV/ c^2 处达到, 其值为 3.7×10^{-44} cm². 在90%的置信区间上, 这个结果不支持之前其他实验报告的所有暗物质疑似信号, 这些实验包括DAMA^[30-32], CoGeNT^[33-35], CRESSST^[36]和CDMS II-Si^[37]. 和同类型的XENON100实验结果相比, PandaX的结果和XENON100第一批的结果相

图5 (网络版彩色)PandaX-II的内罐和探测器示意图

Figure 5 (Color online) Schematic view of the inner vessel and detector for PandaX-II

近^[38], 但是在低质量区域给出了更加严格的限制, 这证明了PandaX-I探测器的低能量阈值的优势.

合作组于今年5月发布了PandaX-I基于全部的80.1天有效时间和54 kg基准质量的液氙的最终暗物质探测结果. 相对于去年发布的第一批结果, 新的结果所采用的数据分析方法有了较大的改进, 例如采用了基于加速决策树(BDT)的方法来进行S1和S2信号的识别, 采用了基于蒙卡模板的方法进行事例位置重建, 并使用了子集似然方法(profile likelihood method)来给出最终的截面限制. 由于新的数据集里面一部分PMT因不稳定而被禁用, 以及基线计算方法的变化, 新的分析得到PandaX-I探测器在零电场下对122 keV能量的光产额是6.0光电子/电子反冲等

效千电子伏特(PE/keVee), 低于首次分析的7.3 PE/keVee, 但依然远高于XENON100的3.9 PE/keVee. 在PandaX-I运行的全部时间内, 2到30光电子之间找到了542个符合要求的单次散射事例, 其中绝大部分都符合电子反冲, 只有7个事例位于中子刻度的核反冲数据中线之下. 实际上, 根据模拟和对探测窗口外数据的分析, 我们期待能够在这个区域看到6.9个事例的本底, 因此观测结果符合本底的预期. 通过子集似然方法所得到的最佳拟合给出在暗物质质量为27.5 GeV/ c^2 的时候, 暗物质粒子与原子核的反应截面上限为 $4.1 \times 10^{-45} \text{ cm}^2$.

PandaX-I的两次数据分析结果不支持已经报道的其他实验结果的疑似信号的WIMP解释. 在液氙实验里面, PandaX-I对于低于5.5 GeV/ c^2 的暗物质质量区间给出了最好的结果, 证明了液氙在低暗物质质量区域的探测能力.

2.3 PandaX-II展望

PandaX-II目前已经完成了探测器的安装, 正在进行试运行. 其相对于PandaX-I主要的改变集中在内罐和探测器上. 新的不锈钢内罐的放射性本底比原来低一个数量级, 这能够有效降低实验的本底. 探测器外侧上下各放置了24个反符合PMT, 这能够用于鉴别出多次散射的伽玛本底和中子本底.

PandaX-II预期在2015年年底前正式开始运行, 并连续工作一年以上时间. PandaX-II的基准质量可能达到300 kg, 我们期待其能够将目前PandaX-I的暗物质探测灵敏度再提高两个数量级, 从而探索目前其他实验尚未达到的WIMP参数空间.

3 无中微子双贝塔衰变探测实验

PandaX-III是计划中的无中微子双贝塔衰变实验. PandaX-III的合作组于2015年3月成立, 包括了多个国内外科研单位, 计划在二期的锦屏实验室里面建造超低本底和高灵敏度的大尺寸气体成像探测器, 进行基于高压 ^{136}Xe 气体的 $0\nu\beta\beta$ 探测实验.

PandaX-III首期将建造一个探测器模块, 其中容纳200 kg的高压的富 ^{136}Xe 气体, 并最终建造五个同样规格的模块, 达到吨量级, 希望在国际上的同目标实验中首先观察到稀有的无中微子双贝塔衰变过程. PandaX-III所设计的探测器模块的示意图如图6所示, 其目标是探测氙气中的能量沉积所生成的电子. 它

图6 (网络版彩色)PandaX-III计划的低本底高精度成像探测器结构示意图

Figure 6 (Color online) Conceptual design of the low background high precision imaging detector for the PandaX-III project

由时间投影室(TPC)、读出平面、读出电子学和低本底高压容器等部分组成. 氙气中的能量沉积产生的电子在时间投影室内部的电场作用下向读出平面漂移. 读出平面包括了电子放大平面和读出像素, PandaX-III计划首先采用较为成熟的MicroMegas(MM)技术进行电子放大, 并同时研发一种称为TopMetal的新型读出技术. TopMetal技术有望在PandaX-III的第二阶段得到应用. 读出电子学系统用于对读出的信号进行放大和数字化.

为了降低实验本底, 探测器的部件需要使用具有低放射性本底的高纯度材料来进行制造. 蒙特卡罗模拟结果表明, 高压容器是实验里面本底的主要来源, 因此对于高压容器材料的选取是实验需要重点解决的一个问题. 前端电子学系统也是本底的重要来源之一, 因此需要研发低本底的前端电子学系统, 并对其进行有效屏蔽. 来自实验室环境内的放射性也是一个重要的本底来源. PandaX-III计划使用水来屏蔽实验室的本底, 将在锦屏二期实验室内建设一个大型的水池, 使得水池表面任意一点到达探测器模块的最小距离不小于5 m, 从而保证环境本底在探测器内部感兴趣的能量区间内造成的事件少于每年一个.

PandaX-III所设计的探测器的一个重要的优势是它不仅能够测量事件的能量, 还能够重建出不同的事件在探测器里面留下的径迹. 所期待的无中微子双贝塔衰变事件的总能量在2.5 MeV附近, 它包括两

个高能电子,这两个电子径迹末端将形成明显的布拉格峰,这是一般的本底事件所不具备的. PandaX-III探测器能够通过径迹重建来排除大部分的本底事例,从而达到更高的探测灵敏度.

PandaX-III目前处于预研阶段,合作组内的不同小组正在进行容器、电子学、气体处理、本底预期、水提纯等相关技术的研发.此外,包括水屏蔽在内的锦屏二期实验室的建设将于2016年内竣工. PandaX-III希望能够在2018年完成首个探测器模块的安装和调试,并正式开始运行.

4 总结与展望

中国锦屏地下实验室的建设为我国提供了一个

加入国际上低本底粒子物理及天体物理实验竞争,进行基础前沿科研的极好机会. PandaX合作组采用氙作为主要的工作介质进行暗物质直接探测,在过去的几年时间里,从无到有完成了探测器的建设,并发布了暗物质探测结果. PandaX在一期实验的实践中积累了大量暗物质探测的经验,并将其运用到正在进行的二期实验中,预期取得更加重要的暗物质探测结果. PandaX计划建造国际上最为先进的大型高精度气体成像探测器来进行无中微子双贝塔衰变的探测实验,对中微子的本性进行研究,并检验轻子数守恒这一物理学基本规律的可能破坏. PandaX系列实验的成功实施将会催生重大的原创性科研成果,有效推动中国科学原始创新的跨越式发展.

参考文献

- Jungman G, Kamionkowski M, Griest K. Supersymmetric dark matter. *Phys Rept*, 1996, 267: 195–373
- Votano L. Origin and status of the Gran Sasso INFN Laboratory. *Mod Phys Lett A*, 2014, 29: 1430040
- Aprile E, Arisaka K, Arneodo F. The XENON100 dark matter experiment. *Astropart Phys*, 2012, 35: 573–590
- Bernabei R, Belli P, Bussolotti A, et al. The DAMA/LIBRA apparatus. *Nucl Instrum Meth A*, 2008, 592: 297–315
- Lang R, Seidel W. Search for dark matter with CRESST. *New J Phys*, 2009, 11: 105017
- Agostini M, Allardt M, Andreotti E, et al. Measurement of the half-life of the two-neutrino double beta decay of Ge-76 with the Gerda experiment. *J Phys G*, 2013, 40: 035110
- Alfonso K, Artusa D, Avignone F, et al. Search for neutrinoless double-beta decay of ^{130}Te with CUORE-0. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 102502
- Akerib D, Bai X, Bedikian S. The large underground xenon (LUX) experiment. *Nucl Instrum Meth A*, 2013, A704: 111–126
- Gaitskill R, Barabash A, Kononov S, et al. The Majorana zero neutrino double beta decay experiment. *arXiv: nucl-ex/0311013*
- Kang K, Cheng J, Chen Y, et al. Status and prospects of a deep underground laboratory in China. *J Phys Conf Ser*, 2010, 203: 012028
- Aprile E, Doke T. Liquid xenon detectors for particle physics and astrophysics. *Rev Mod Phys*, 2010, 82: 2053–2097
- Bertone G, Hooper D, Silk J. Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints. *Phys Rept*, 2005, 405: 279–390
- Cao X, Chen X, Chen Y. PandaX: A liquid xenon dark matter experiment at CJPL. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2014, 57: 1476–1494
- Davide F. Direct WIMP searches with XENON100 and XENON1T. *EPJ Web Conf*, 2015, 95: 04019
- Malling D, Akerib D, Araujo H, et al. After LUX: The LZ program. In: *Proceedings of the 2011 Meeting of the Division of Particles and Fields of the American Physical Society*. *arXiv:1110.0103*
- Harris A, Rosero R, Yeh M, et al. LUX-ZEPLIN(LZ) conceptual design report. *arXiv:1509.02910*
- Angle J, Aprile E, Arneodo F, et al. First results from the XENON10 dark matter experiment at the gran sasso national laboratory. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 021303
- Alner G, Araujo H, Bewick A, et al. Limits on spin-dependent WIMP-nucleon cross-sections from the first ZEPLIN-II data. *Phys Lett B*, 2007, 653: 161–166
- Akerib D, Araujo H M, Bai X, et al. First results from the LUX dark matter experiment at the Sanford underground research facility. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 091303
- Goeppert-Mayer M. Double beta-disintegration. *Phys Rev*, 1935, 48: 512–516
- Majorana E. Theory of the symmetry of electrons and positrons. *Nuovo Cim*, 1937, 14: 171–184
- Racah G. On the symmetry of particle and antiparticle. *Nuovo Cim*, 1937, 14: 322–328
- Albert J, Auty D, Barbeau P, et al. Search for Majorana neutrinos with the first two years of EXO-200 data. *Nature*, 2014, 510: 229–234
- Agostini M, Allardt M, Andreotti E, et al. Results on neutrinoless double- β decay of Ge76 from phase I of the GERDA experiment. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 122503

- 25 Gomez-Cadenas J, Martin-Albo J, Sorel M, et al. Sense and sensitivity of double beta decay experiments. *J Cosmol Astropart Phys*, 2011, 1106: 007
- 26 Kang K, Cheng J, Li J, et al. Introduction to the CDEX experiment. *Front Phys China*, 2013, 8: 412–437
- 27 Xiao M, Xiao X, Zhao L, et al. First dark matter search results from the PandaX-I experiment. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2014, 57: 2024–2030
- 28 Xiao X, Chen X, Tan A, et al. Low-mass dark matter search results from full exposure of PandaX-I experiment. *Phys Rev D*, 2015, 92, 5: 052004
- 29 Wu Y, Hao X, Yue Q, et al. Measurement of cosmic ray flux in China JinPing Underground laboratory. *Chin Phys C*, 2013, 37, 8: 086001
- 30 Bernabei R, Belli P, Cappella F, et al. [DAMA Collaboration]. First results from DAMA/LIBRA and the combined results with DAMA/NaI. *Eur Phys J C*, 2008, 56: 333–355
- 31 Bernabei R, Belli P, Cappella F, et al. [DAMA Collaboration]. New results from DAMA/LIBRA, *Eur Phys J C*, 2010, 67: 39–49
- 32 Bernabei R, Belli P, Cappella F, et al. [DAMA Collaboration]. Final model independent result of DAMA/LIBRA-phase1. *Eur Phys J C*, 2013, 73: 2468
- 33 Aalseth C E, Barbeau P S, Colaresi J, et al. [CoGeNT Collaboration]. Results from a search for light-mass dark matter with a p-type point contact germanium detector. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 131301
- 34 Aalseth C E, Barbeau P S, Colaresi J, et al. [CoGeNT Collaboration]. CoGeNT: A search for low-mass dark matter using p-type point contact germanium detectors. *Phys Rev D*, 2013, 88: 012002
- 35 Aalseth C E, Barbeau P S, Leon J D, et al. Maximum likelihood signal extraction method applied to 3.4 years of CoGeNT data. *arXiv:1401.6234*
- 36 Angloher G, Bauer M, Bavykina I, et al. [CRESST Collaboration]. Results from 730 kg days of the CRESST-II dark matter search. *Eur Phys J C*, 2012, 72: 1791
- 37 Agnese R, Ahmed Z, Anderson A J, et al. [CDMS Collaboration]. Silicon detector dark matter results from the final exposure of CDMS II. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 251301
- 38 Aprile E, Arisaka K, Arneodo F, et al. [XENON100 Collaboration]. First dark matter results from the XENON100 experiment. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 131302

Status and plan of the PandaX experiment

Ji XiangDong, LIU JiangLai & CHEN Xun

Institute of Particle and Nuclear Physics, Department of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

PandaX is a large scale apparatus for the detection of rare events in particle physics and astrophysics with xenon. It is located in the China Jinping Underground Laboratory, which is the deepest underground laboratory all over the world to date. The first and second stages of the PandaX experiment utilize the dual phase xenon time projection chamber technology for the direct detection of one hypothetical candidate of dark matter, the weakly interacting massive particles (WIMPs), in the Galaxy halo. The technology makes it possible to measure both the scintillations and ionizations generated by the scattering of WIMP with nucleus, and thus backgrounds can be suppressed by the character of the measured signals. The aim of the first stage of PandaX, PandaX-I, is to test the possible signals reported by other experiments in low dark matter mass region with 120 kg of xenon. The first results of the PandaX-I experiment were released in August, 2014. No dark matter candidates were observed. Thus the 90% exclusion upper limits on the spin-independent WIMP-nucleon elastic scattering cross section were set. The results disfavored the WIMP interpretation of those signals and placed stringent limit to the property of dark matter below $10 \text{ GeV}/c^2$. The final results of PandaX-I were released in 2015 based on $54 \times 80.1 \text{ kg d}$ of exposure with significantly improved analysis. The new analysis supported the conclusion of the first results and gave stringent limitation on the WIMP-nucleon cross section for WIMP mass smaller than 10 GeV , demonstrating the detection potential of xenon at low WIMP mass region. The second stage, PandaX-II, with an updated detector capable of containing 500 kg of xenon, is being tested and will start data taking in the end of 2015. The sensitivity of PandaX-II is expected to go far beyond the current limits being set by all the experiments so far. Unattainable parameter space of WIMPs will be explored by it. PandaX-III, the third stage, will be an experiment to detect the neutrinoless double beta decay with enriched high pressure ^{136}Xe (to 90%) gaseous detector, so that the nature of neutrino is studied. The detector is able to measure the track of radiations inside it, helping to suppress the background by inspecting the different topological properties of desired signals and background. PandaX-III plans to build such a detector with 200 kg enriched ^{136}Xe first, then build another 4 identical modules to reach ton scale. The initial design and prototype testing of PandaX-III is carrying out by different groups from the institutions all over the world. The first detector module of PandaX-III is expected to be finished construction and start operation in 2018. The success running of the PandaX experiments may lead to important discoveries in physics.

liquid xenon detector, dark matter, neutrino

doi: 10.1360/N972015-01131